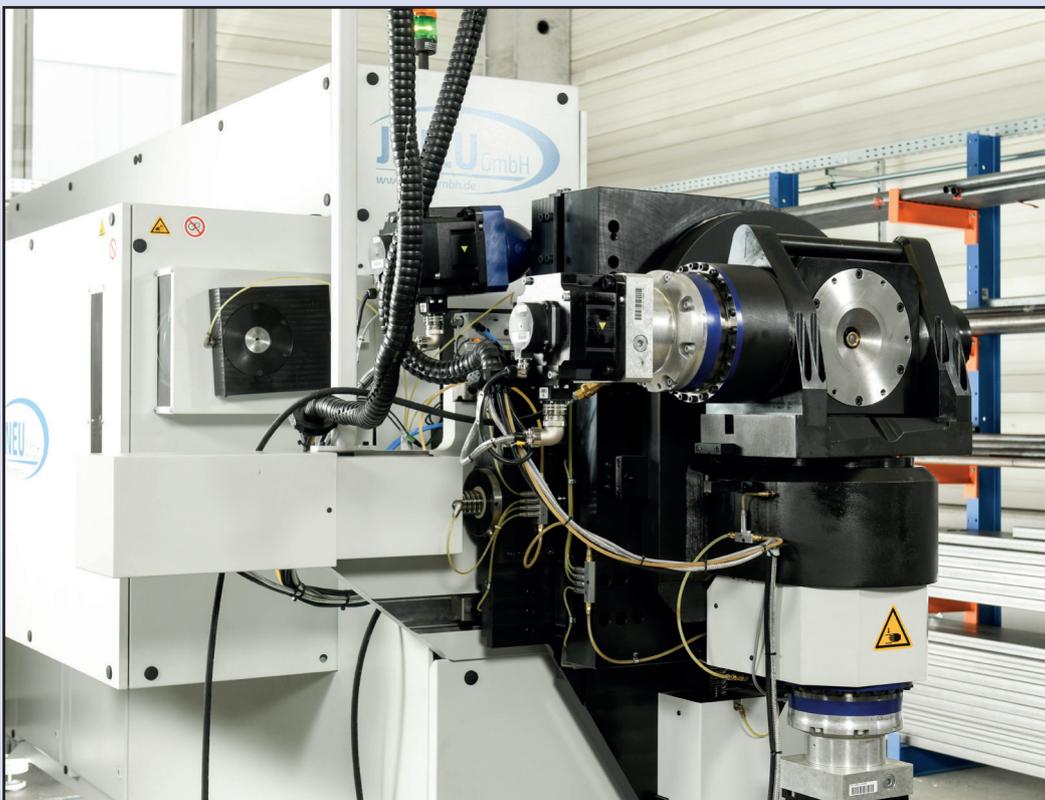


Daniel Georg Maier

Eigenschaftsflexibles Freiformbiegen mit bewegter Matrize



45

Maschinenbau

Lehrstuhl für
Umformtechnik
und Gießereiwesen

*Schriftenreihe Umformtechnik
und Gießereiwesen*

Eigenschaftsflexibles Freiformbiegen mit bewegter Matrize

Daniel Georg Maier

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München zur Erlangung eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation.

Vorsitz:

Prof. Dr.-Ing. Boris Lohmann

Prüfer*innen der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk
2. Prof. Dr.-Ing. Sebastian Münstermann
3. Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel

Die Dissertation wurde am 25.09.2023 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 15.01.2024 angenommen.

Kreativität ist Intelligenz, die Spaß hat.

Albert Einstein

Vorwort

Das Freiformbiegen mit bewegter Matrize versetzt mich immer wieder in Erstaunen und weckt gleichzeitig den Ingenieur in mir. Wie kann ein so ästhetisch und einfach anmutender Prozess in seiner wissenschaftlichen Analyse so komplex sein? Diese Frage habe ich mir während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität München (TUM) immer wieder gestellt und ohne die Hilfe so mancher Kollegen, Freunde und Wegbegleiter würde ich mir wahrscheinlich heute noch den Kopf darüber zerbrechen und hätte sicher nicht meine fertige Dissertation in der Hand. So schreibe ich dieses Vorwort, um mich bei all den wichtigen Menschen zu bedanken, die mich auf diesem Meilenstein meiner akademischen Laufbahn begleitet haben.

Zunächst möchte ich mich bei meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk, herzlich bedanken. Ihre fachliche Expertise und Ihr Engagement für meine akademische Entwicklung haben den Grundstein für diese Dissertation gelegt. Sie haben mir nicht nur wertvolle Einblicke in das komplexe Forschungsgebiet der Umformtechnik gewährt, sondern mir auch die Fähigkeit zu analytischem Denken und kritischer Reflexion vermittelt. Ich danke Ihnen für Ihre Unterstützung, Ihre Geduld und Ihren inspirierenden Zugang zu Forschung und Lehre. Mein besonderer Dank gilt auch meiner Prüfungskommission, bestehend aus Prof. Dr.-Ing. Boris Lohmann, Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel und Prof. Dr.-Ing. Sebastian Münstermann, die sich die Zeit genommen haben, meine Arbeit zu begutachten und mir wertvolles Feedback zu geben. Ihre Anregungen haben dazu beigetragen, meine Dissertation zu verfeinern und in eine Form zu bringen, auf die ich stolz sein kann.

Wenn ich an mein Arbeitsumfeld am Lehrstuhl denke, dann gilt mein besonderer Dank meinen beiden Biegekollegen und Freunden Lorenzo und Matthias sowie meinen langjährigen HiWis Christoph und Jojo. Ich bin euch allen sehr dankbar für die offenen Diskussionen, die kritischen Fragen und die vielen Stunden, die wir gemeinsam damit verbracht haben, die Besonderheiten und Herausforderungen des Freiformbiegens zu verstehen und zu lösen. Die Zusammenarbeit mit euch hat nicht nur meine Forschung bereichert, sondern ich schätze mich auch sehr glücklich, euch als Freunde zu haben. Da die gesamte Dissertation im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojektes mit dem Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen und dem Lehrstuhl für Regelungstechnik der TUM entstanden ist, danke ich natürlich auch meiner Projektpartnerin Sophie Stebner und meinem Projektpartner Ahmed Ismail für die aufschlussreichen Diskussionen und die super Zusammenarbeit mit euch.

Meine Familie hat mich während meiner gesamten akademischen Laufbahn immer bedingungslos unterstützt. Ich schätze mich sehr glücklich, eine Familie zu haben, die immer an meine Fähigkeiten geglaubt und mich zu Höchstleistungen angespornt hat. Ganz besonders möchte ich mich bei meinem Opa Georg und meiner Oma Rosi für ihre ständige Unterstützung während meines Studiums und darüber hinaus bedanken. Leider kann mein Opa diese Zeilen nicht mehr lesen, aber ich bin mir sicher, dass er sehr stolz auf mich ist. Ebenso möchte ich mich bei meinen Eltern Georg und Regina für die Unterstützung und den Rückhalt in allen Phasen meines Lebens bedanken. Auch meinen beiden Brüdern Christoph und Thomas, auf die ich mich immer verlassen kann, sowie meinen beiden Onkeln Wolfi und Hansei, die mir immer mit wertvollen Ratschlägen zur Seite standen, möchte ich von ganzem Herzen danken. Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner großen Liebe Anna bedanken. Du bist meine größte Inspiration und deine Unterstützung, deine Geduld und dein Glaube an mich haben es mir wesentlich erleichtert, diese Arbeit so unbeschwert schreiben zu können. Welche Herausforderungen auch immer auf uns zukommen, mit dir an meiner Seite sind sie lösbar.

Eure Unterstützung war meine stärkste Motivation und ich widme diese Arbeit euch allen.

Daniel Georg Maier

September 2023

Kurzbeschreibung

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit widmet sich dem Thema des eigenschaftsflexiblen Freiformbiegens mit bewegter Matrize und der damit verbundenen Entkopplung der geometrischen und mechanischen Eigenschaften. Im Allgemeinen ermöglicht das Freiformbiegen mit bewegter Matrize die Herstellung komplexer dreidimensionaler Biegebauteile mit fließenden Übergängen ohne Werkzeugwechsel und bietet somit ein hohes Maß an Designfreiheit und Individualisierbarkeit. Das eigenschaftsflexible Freiformbiegen mit bewegter Matrize zielt darauf ab, die mechanischen Eigenschaften eines Bauteils unabhängig von seiner Geometrie gezielt zu beeinflussen. Damit eröffnen sich neue Möglichkeiten, Bauteile mit maßgeschneiderten Eigenschaften herzustellen, um den Anforderungen einer immer differenzierteren Produktpalette gerecht zu werden.

Ein Teilschwerpunkt der Dissertation liegt in der Identifizierung geeigneter Messverfahren und Auswertekonzepte zur Bestimmung der geometrischen und mechanischen Eigenschaften der freiformgebogenen Bauteile. Hierzu wird zur Erfassung der Biegegeometrie ein optischer Laserscanner eingesetzt, während zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften sowohl ein UCI-Härtemessgerät als auch ein mikromagnetischer Barkhausenrauschsensor verwendet werden. Bei den mechanischen Eigenschaften liegt der Fokus auf der Bestimmung der Veränderung des Eigenspannungszustandes, da die Eigenspannungen einen erheblichen Einfluss auf die Qualität der Biegebauteile haben. Anhand von Simulationen und experimentellen Freiformbiegeversuchen werden die Stellgrößen zur Entkopplung der geometrischen und mechanischen Eigenschaften ermittelt, was den Schwerpunkt der Dissertation widerspiegelt. Es zeigt sich, dass durch eine nicht-tangentiale Positionierung der Biegematrize Bauteile mit unterschiedlichen Spannungszuständen auf der Außen- und Innenseite hergestellt werden können, ohne die gewünschte Zielgeometrie zu beeinträchtigen. Abschließend werden experimentelle Musterbauteile mit unterschiedlichen Spannungszuständen bei gleichbleibender Geometrie gebogen und bezüglich des Rückfederungsverhaltens und der Belastbarkeit untersucht, um die positiven Effekte des eigenschaftsflexiblen Freiformbiegens zu bestätigen.

Das eigenschaftsflexible Freiformbiegen mit bewegter Matrize bietet somit einen vielversprechenden Weg, um den Anforderungen der modernen Industrie und den Megatrends der Zukunft erfolgreich zu begegnen. Es liefert die Grundlagen für eine flexiblere, effizientere und nachhaltigere Produktionstechnik und ebnet somit den Weg für resiliente Fabriken der Zukunft.

Executive Summary

The present scientific work is dedicated to property-flexible free-form bending with a movable die and the associated decoupling of geometric and mechanical properties. In general, free-form bending with a movable die enables the production of complex three-dimensional bent components with smooth transitions without tool changes and thus offers a high degree of design freedom and customizability. Property-flexible free-form bending aims to specifically influence the mechanical properties of a component independently of its geometry. This innovative bending strategy opens up new possibilities for producing components with tailored properties to meet the requirements of an increasingly differentiated product range.

A partial focus of the dissertation is on identifying suitable measurement methods and evaluation concepts to determine the geometric and mechanical properties of the free-form bent components. An optical laser scanner is used to acquire the bending geometry. A UCI hardness tester and a micromagnetic Barkhausen noise sensor are used to determine the mechanical properties. For mechanical properties, the focus is on determining the change in residual stress state since residual stresses significantly impact the quality of bent components. With the help of simulations and experimental free-form bending tests, the control variables for decoupling the geometric and mechanical properties are determined, reflecting the dissertation's primary focus. The non-tangential positioning of the bending die can produce components with different stress states on the outside and inside without compromising the desired target geometry. Finally, experimental sample components with varying forms of stress and unchanged geometry are manufactured and investigated concerning spring back behavior and load capacity to confirm the positive effects of property-flexible free-form bending.

Property-flexible free-form bending with a moving die thus offers a promising way to successfully meet modern industry's requirements and future megatrends. It lays the foundations for more flexible, efficient, and sustainable production technology that can pave the way for the factories of the future.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Kurzzeichen	XVII
Verzeichnis der Abkürzungen	XXI
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik und Forschung	3
2.1 Grundlagen	3
2.1.1 Mechanische Kennwerte und Tribologie	4
2.1.2 Eigenspannungen	8
2.1.3 Biegeverfahren	11
2.1.4 Materialien und Halbzeuge	16
2.1.5 Geometrische und mechanische Eigenschaften am gebogenen Rohr	17
2.2 Freiformbiegen mit bewegter Matrize	19
2.2.1 Prozessbeschreibung und Werkzeuge	19
2.2.2 Numerische Prozessmodellierung mittels FEM	22
2.2.3 Auslegung und Absicherung freiformgebogener Biegebauteile	24
2.3 Systematische Messtechnik für Geometrie und mechanische Eigenschaften	26
2.3.1 Messtechnik für geometrische Eigenschaften	26
2.3.2 Messtechnik für mechanische Eigenschaften	28
2.4 Fazit aus dem Stand der Technik	32
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	33
4 Ressourcen	37
4.1 Freiformbiegeanlage mit bewegter Matrize	37
4.2 Halbzeuge	41
4.3 Messsysteme und Sensoren	44
4.3.1 Optisches Geometriemesssystem	44
4.3.2 UCI-Härtemessgerät	45
4.3.3 Mikromagnetischer Barkhausensensor	47

5	Bestimmung geometrischer und mechanischer Eigenschaften	51
5.1	Geometrische Eigenschaften	51
5.1.1	Biegegeometrie	52
5.1.2	Querschnittsgeometrie	55
5.2	Mechanische Eigenschaften	59
5.2.1	Härte	60
5.2.2	Eigenspannungen	63
5.3	Bewertung der Ergebnisse	68
6	Simulationsmodell	71
6.1	Experimentelle Biegeversuche	71
6.2	Numerische Modellierung des Freiformbiegeprozesses	74
6.3	Validierung und Bewertung der Ergebnisse	79
7	Sensitivitätsanalyse prozessrelevanter Stell- und Einflussgrößen	81
7.1	Einfluss der Kinematik der Biegematrize	81
7.2	Einfluss der Halbzeugschwankungen	96
7.3	Einfluss des Abstandes zwischen Biegematrize und Rohrführung	105
7.4	Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse	108
8	Untersuchungen zur Rückfederung und Belastbarkeit	111
8.1	Versuchsdurchführung	111
8.2	Versuchsergebnisse und Diskussion	114
9	Zusammenfassung und Ausblick	119
9.1	Zusammenfassung	119
9.2	Ausblick und Potentiale des eigenschaftsflexiblen Freiformbiegens	121
A	Abbildungsverzeichnis	123
B	Tabellenverzeichnis	127
C	Literaturverzeichnis	129

Ergänzende Informationen

Veröffentlichungen

Einige Ergebnisse dieser Arbeit wurden bereits unter meiner Autorenschaft in wissenschaftlichen Fachzeitschriften und Tagungsbänden veröffentlicht. Diese Publikationen sind im Folgenden aufgeführt und werden in dieser Arbeit nicht noch einmal gesondert zitiert.

MAIER, D., STEBNER, S., ISMAIL, A., DÖLZ, M., LOHMANN, B., MÜNSTERMANN, S. und VOLK, W. (2021). „The influence of freeform bending process parameters on residual stresses for steel tubes“. In: *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering* 2, S. 100047.

MAIER, D., KERPEN, C., WERNER, M., SCANDOLA, L., LECHNER, P., STEBNER, S., ISMAIL, A., LOHMANN, B., MÜNSTERMANN, S. und VOLK, W. (2022). „Development of a partial heating system for freeform bending with movable die“. In: *Proceedings Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel*, S.767-774.

MAIER, D., SCANDOLA, L., WERNER, M., STEBNER, S., ISMAIL, A., LOHMANN, B., MÜNSTERMANN, S., VOLK, W. und LECHNER, P. (2023). „Experimental analysis on the influence of freeform bending on Barkhausen noise for steel tubes“. In: *Materials Research Proceedings*, S. 2091–2100.

MAIER, D., SCANDOLA, L., WERNER, M. und VOLK, W. (2023) „Influencing geometric stability in free-form bending by exploiting non-tangential bending“. In: *Tagungsband 6. Biegeforum Siegen*

STEBNER, S., MAIER, D., ISMAIL, A., DÖLZ, M., LOHMANN, B., VOLK, W. und MÜNSTERMANN, S. (2022). „Extension of a Simulation Model of the Freeform Bending Process as Part of a Soft Sensor for a Property Control“. In: *Key Engineering Materials* Vol. 926

STEBNER, S., MAIER, D., ISMAIL, A., DÖLZ, M., LOHMANN, B., VOLK, W. und MÜNSTERMANN, S. (2023). „Sensitivity Analysis of Barkhausen Noise Measurements for Residual Stress Correlation“. In: *Proceedings of Conference Sensor and Measurement Science International*

ISMAIL, A., MAIER, D., STEBNER, S., VOLK, W., MÜNSTERMANN, S. und LOHMANN, B. (2021). „A Structure for the Control of Geometry and Properties of a Freeform Bending Process“. In: *IFAC-PapersOnLine* Vol. 54 no. 11. p. 115-120

ISMAIL, A., MAIER, D., STEBNER, S., VOLK, W., MÜNSTERMANN, S. und LOHMANN, B. (2022). „Control System Design for a Semi-Finished Product Considering Over- and Underbending“. In: *Engineering Proceedings* 26, no. 1 p. 16.

Hinweis zur Zitierweise

Steht der Quellenverweis im Satz oder vor dem Punkt am Ende des Satzes, bezieht er sich direkt auf ein Wort, eine Wortgruppe oder die Aussage des Satzes. Befindet sich der Verweis am Ende eines Absatzes nach dem Punkt, bezieht er sich auf den Inhalt des gesamten vorangegangenen Absatzes.

Mittelwert und Standardabweichung

Der Mittelwert (arithmetisches Mittel) und die Standardabweichung werden im gesamten Verlauf der Arbeit nach den folgenden Gleichungen berechnet:

$$MW = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Gleichung 0.1})$$

$$SD = \pm \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_{arithm})^2} \quad (\text{Gleichung 0.2})$$

Verzeichnis der Kurzzeichen

A	Aktuelle Querschnittsfläche
A_0	Anfangsquerschnittsfläche
A_{80}	Bruchdehnung
A_g	Gleichmaßdehnung
A_L	Konstante für das Ludwik Fitting
A_{UCI}	Kontaktfläche UCI-Härteprüfung
B	Biegefaktor
B	Magnetische Flussdichte
b_L	Fließgrenze für das Fitting nach Ludwik
D_A	Außendurchmesser
d_{BMRf}	Abstand zwischen Biegematrize und Rohrführung
E	Elastizitätsmodul
E_{eff}	Effektives Elastizitätsmodul
F	Belastung
F_{max}	Maximale Kraft
F_N	Normalkraft
F_R	Reibkraft
F_{UCI}	Prüfkraft UCI-Härteprüfung
f_0	Resonanzfrequenz
H	Profilhöhe
H	Magnetische Feldstärke
HV_{UCI}	Härtewerte bestimmt mit dem UCI-Härteprüfverfahren
KF	Korrekturfaktor
$k_{0,V}$	Sättigungsspannung nach Voce
L	Rohrlänge
L_U	Länge des Rohrumfangs
l_0	Ausgangslänge
l	Aktuelle Länge
n_L	Konstante für das Ludwik Fitting
Q_V	Verhältnis von Sättigungsspannung und Fließgrenze
R	Biegeradius
R_G	Globaler Radius zwischen zwei Biegeschenkeln

R_{Ist}	Ist-Biegeradius
R_m	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	Dehngrenze bei einer plastischen Dehnung von 0,2 %
R_{Sim}	Simulation-Biegeradius
R_{Soll}	Soll-Biegeradius
s	Wanddicke
s_a	Wanddicke auf der Außenseite
s_i	Wanddicke auf der Innenseite
s_m	Mittlere Wanddicke
s_{SN}	Wanddicke an der Schweißnaht
s_{90}, s_{180}, s_{270}	Wanddicke um 90°, 180° und 270° versetzt zur Schweißnaht
t_n	n-ter Zeitpunkt
U	Matrizenauslenkung
W	Wanddickenfaktor
α	Biegewinkel
α_{Ist}	Ist-Biegewinkel
α_L	Gewichtungsfaktor für Anteile der Voce/Ludwik-Gleichung
α_{Sim}	Simulation-Biegewinkel
α_{Soll}	Soll-Biegewinkel
β_V	Voce Konstante
Δf	Frequenzänderung
ΔL_T	Wegänderung der Traverse der Universalprüfmaschine
Δl	Längenänderung
Δt	Infinitesimaler Zeitschritt
ϵ	Technische Dehnung
ϵ_R	Radiusfehler
ϵ_W	Winkelfehler
κ	Krümmung
$\bar{\kappa}$	Mittlere Krümmung im konstant gebogenen Bereich
κ_G	Globale Krümmung zwischen zwei Biegeschenkeln
μ	Reibzahl
σ	Spannung
σ_0	Technische Spannung
σ_D	Druckspannung
σ_Z	Zugspannung

$\sigma^I, \sigma^{II}, \sigma^{III}$	Eigenspannungen 1., 2. und 3. Art
φ	Logarithmische Dehnung
φ_{el}	Linear elastische Dehnung
φ_{pl}	Plastische Dehnung
F	Verformungsgradient
M	Aktueller Zustand
M_r	Entspannter Zustand
M₀	Ausgangszustand
X	Ortsvektor im Ausgangszustand
x	Ortsvektor im aktuellen Zustand

Verzeichnis der Abkürzungen

3MA	Mikromagnetische Multiparameter- Mikrostruktur- und Spannungsanalyse
BHN	Barkhausenrauschen
CAD	Computer-Aided Design (dt. rechnerunterstütztes Konstruieren)
CPU	Central Processing Unit (dt. Zentrale Verarbeitungseinheit)
DAU	Data Acquisition Unit (dt. Datenerfassungseinheit)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DRSB	3-Rollen-Schubbiegen
ED	Energy Detector (dt. Energiedetektor)
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFT	Fast Fourier Transform (dt. schnelle Fourier-Transformation)
KI	Künstliche Intelligenz
MW	Mittelwert
NC	Numerical Control (dt. numerische Steuerung)
OES	Optisches Emissionsspektrometer
PCHIP	Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial
POM	Polyoxymethylen
SD	Standardabweichung
SN	Schweißnaht
TSS	Torque Superposed Spatial
TUM	Technische Universität München
UCI	Ultrasonic Contact Impedance
VDI	Verein deutscher Ingenieure
utg	Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
WEZ	Wärmeeinfluszone
XRD	X-Ray Diffraction (dt. Röntgenbeugung)

1 Einleitung

In einer zunehmend globalisierten Welt sind Megatrends wie Individualisierung, Nachhaltigkeit und Digitalisierung von entscheidender Bedeutung für die Evolution ganzer Wirtschaftsbereiche. Sie dienen nicht nur als Leitfaden für gesellschaftliche Entwicklungen, sondern stellen auch einen maßgeblichen Ausgangspunkt für tiefgreifende Veränderungen in Unternehmen und Organisationen dar. Vor allem im Bereich der Produktionstechnik, insbesondere in der Umform- und Biegetechnik, spielen diese Megatrends eine zunehmend wichtigere Rolle. Um mit den sich stetig wandelnden Anforderungen Schritt zu halten, bedarf es einer verstärkten Forschung, Entwicklung und Implementierung innovativer und neuartiger Verfahren. Die zunehmende Bedeutung von Biegeverfahren für eine Vielzahl von Anwendungen verdeutlicht die Notwendigkeit, diese Technologie weiterzuentwickeln und den steigenden Anforderungen gerecht zu werden. Das Streben nach einer nachhaltigen und ressourcenschonenden Produktion steht dabei im Einklang mit den gesellschaftlichen Forderungen nach umweltverträglichen Technologien.

In diesem Kontext stehen Ziele wie die Erhöhung des Materialnutzungsgrades zur Förderung der Nachhaltigkeit sowie die Erweiterung der Prozessgrenzen zur Erhöhung der Designfreiheit und Individualisierbarkeit im Vordergrund, um nicht nur Energie und natürliche Ressourcen, sondern auch Kosten einzusparen. Diese Denkweise bildet die Grundlage der vorliegenden Dissertation, die mit ihren wissenschaftlichen Erkenntnissen einen Beitrag zur erfolgreichen Umsetzung der Megatrends im Bereich der Biegetechnologie leistet. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Erforschung und wissenschaftlichen Durchdringung des Freiformbiegens mit bewegter Matrize, um durch das eigenschaftsflexible Freiformbiegen den Materialnutzungsgrad zu erhöhen und somit die Ressourceneffizienz zu steigern, was langfristig zur Förderung der Nachhaltigkeit in der Produktion beiträgt. Im Zentrum der wissenschaftlichen Ausarbeitung steht die Fragestellung, ob das Freiformbiegen mit bewegter Matrize als geeignetes Verfahren angesehen werden kann, um eine Entkopplung der mechanischen Eigenschaften von den geometrischen Merkmalen bei Biegebauteilen zu ermöglichen.

Um diese zentrale Forschungsfrage beantworten zu können, werden zunächst im Stand der Technik die grundlegenden materialtheoretischen und verfahrenstechnischen Kenntnisse erläutert und die aktuelle Forschung auf dem Gebiet des Freiformbiegens von Rundrohren und Profilen dargestellt. Dabei werden gängige Methoden aus der Literatur vorgestellt, wie z. B. die numerische Simulation, um das Prozessverständnis zu erweitern. Des Weiteren werden Modelle und Verfahren zur Kompensation von Geometrieabweichungen vorgestellt, um die Gesamtqualität

des Bauteils zu erhöhen. Aus der Analyse des aktuellen Forschungsstandes werden anschließend die wichtigsten Forschungshypothesen abgeleitet, die sich auf die Messung der geometrischen und mechanischen Eigenschaften während des Freiformbiegens mit bewegter Matrize, deren gezielte Entkopplung und den Nachweis eines positiven Einflusses konzentrieren. Im weiteren Verlauf der Dissertation werden innovative Sensor- und Auswertekonzepte eingeführt, die einen Zusammenhang zwischen den physikalischen Messwerten und den prozessrelevanten Eigenschaften herstellen. Dadurch wird es möglich, den Einfluss verschiedener Parameter auf die Veränderung mechanischer Eigenschaften und geometrischer Merkmale zu bestimmen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf einer experimentellen und simulativen Sensitivitätsanalyse zur Identifikation prozessrelevanter Stell- und Einflussgrößen und deren Einfluss auf die Biegegeometrie, die Härte und den Eigenspannungszustand. Die gewonnenen Erkenntnisse werden anschließend auf ausgewählte Bauteilgeometrien übertragen und der Nachweis der positiven Wirkung eigenschaftsflexibler Freiformbiegeteile anhand verschiedener Prüfversuche erbracht. Die Arbeit schließt mit einer umfassenden Zusammenfassung und einem Ausblick in die Zukunft, der die Möglichkeit eines eigenschaftsgeregelten Freiformbiegeprozesses in Aussicht stellt.

Der Hauptaspekt dieser Arbeit besteht darin, die derzeitigen Beschränkungen des Freiformbiegens zu überwinden und das Verfahren weiterzuentwickeln, um hochkomplexe, funktionsorientierte Strukturbauteile mit hoher Präzision und Wiederholgenauigkeit herzustellen. Dies ist von großer Bedeutung für Industriezweige wie die Automobilindustrie, in der die optimale Leistungsfähigkeit der Bauteile entscheidend für die Sicherheit und Funktionalität der Fahrzeuge ist. Im Einklang mit den oben genannten Zielen und Herausforderungen untersucht diese Arbeit intensiv die Mechanismen und Einflussfaktoren, die die mechanischen Eigenschaften von freiformgebogenen Bauteilen beeinflussen. Durch die Integration innovativer Sensorik und Auswertekonzepte soll ein Zusammenhang zwischen prozessrelevanten Parametern und den gewünschten mechanischen Eigenschaften hergestellt werden. Dies ermöglicht eine gezielte Steuerung des Freiformbiegeprozesses zur Steigerung der Bauteilqualität und zur Minimierung der Ausschussproduktion. Die vorliegende Dissertation leistet damit einen wichtigen Beitrag, die Potenziale der Freiformbiegetechnologie auszuschöpfen und die Umsetzung der Megatrends in diesem wichtigen Bereich der Produktionstechnik voranzutreiben. Die gewonnenen Erkenntnisse haben das Potenzial, die Industrie bei der Herstellung qualitativ hochwertiger und langlebiger Produkte zu unterstützen und damit einen Beitrag zur Gestaltung einer zukunftsfähigen und ressourcenschonenden Wirtschaft zu leisten.

2 Stand der Technik und Forschung

Zunächst werden die wesentlichen Begriffe und Kennwerte aus der Umformtechnik und der allgemeinen Rohrbiegetechnik erläutert. Anschließend wird das Freiformbiegen mit bewegter Matrize näher betrachtet, da dieses Biegeverfahren in der vorliegenden Arbeit zur Anwendung kommt. Dabei wird insbesondere auf die Biegewerkzeuge und die Prozesskinematik eingegangen sowie die Grenzen des Verfahrens und die Qualitätsmerkmale gebogener Bauteile beschrieben. Es folgen die Grundlagen der Finite-Elemente-Methode (FEM) und eine nähere Betrachtung des aktuellen Stands der Technik auf dem Gebiet der numerischen Abbildung des Freiformbiegens. Anschließend werden aktuelle Methoden und Modelle zur Kompensation geometrischer und mechanischer Abweichungen vorgestellt und ein erster Einblick in die grundlegende Messung mechanischer Eigenschaften beim Freiformbiegen von Rohren oder Profilen gegeben. Den Abschluss des Kapitels bildet ein Fazit zum Stand der Technik, der die Grundlage für die Forschungshypothesen dieser Arbeit ist.

2.1 Grundlagen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit spielen neben den geometrischen Eigenschaften auch die mechanischen Eigenschaften eine zentrale Rolle. Um den Zusammenhang zwischen den umformtechnischen und den werkstofftheoretischen Wirkmechanismen besser einordnen zu können, wird zunächst auf die umformtechnischen Grundlagen eingegangen. Dazu gehören die werkstofftheoretische Beschreibung des elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens durch mechanische Kennwerte sowie eine allgemeine Beschreibung der Eigenspannungen und deren Entstehungsursachen. Des Weiteren werden die Grundlagen des Rohrbiegens erläutert, das nach DIN 8580:2022-12 zur Hauptgruppe Umformen gehört und somit als Verfahren definiert ist, bei dem die Form eines Körpers unter Beibehaltung seiner Masse und seines Zusammenhalts plastisch verändert wird. Im weiteren Verlauf des Kapitels wird der Detaillierungsgrad weiter erhöht und es werden typische Halbzeuge der Rohrbiegetechnik mit ihren Eigenschaften und Herstellungsverfahren vorgestellt. Den Abschluss der Grundlagen bildet eine Betrachtung der Eigenschaften am gebogenen Rohr, wobei auch hier die grundlegenden Begriffe definiert werden.

2.1.1 Mechanische Kennwerte und Tribologie

Die Grundlage der materialtheoretischen Beschreibung des elastisch-plastischen Materialverhaltens ist die Zerlegung der Dehnung in einen elastischen und einen plastischen Anteil. Dies lässt sich prinzipiell durch die multiplikative Aufspaltung des Verformungsgradienten \mathbf{F} in einen elastischen \mathbf{F}_{el} und einen plastischen Anteil \mathbf{F}_{pl} darstellen. Zu diesem Zweck wird ein relaxierter Zustand \mathbf{M}_r zwischen dem Ausgangszustand \mathbf{M}_0 und dem aktuellen Zustand \mathbf{M} eingeführt sowie der Verformungsgradienten \mathbf{F} mithilfe der Vektoren \mathbf{x} (Ortsvektor in \mathbf{M}) und \mathbf{X} (Ortsvektor in \mathbf{M}_0) definiert. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2.1 grafisch dargestellt. (Lemaitre und Chaboche, 2002)

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{x}}{d\mathbf{X}} = \mathbf{F}_{el} \cdot \mathbf{F}_{pl} \quad (\text{Gleichung 2.1})$$

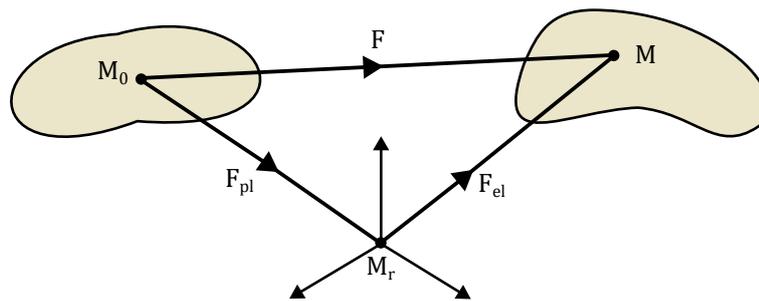


Abbildung 2.1: Ausgangszustand (\mathbf{M}_0), aktueller Zustand (\mathbf{M}) und entspannter Zustand (\mathbf{M}_r) bei endlicher Verformung

Ausgehend von den erläuterten Zusammenhängen wird in dieser Arbeit die Dehnung φ als wahre Dehnung (Umformgrad) oder Hencky-Dehnung (Hencky, 1928) definiert. Nach Siegert (2015) gilt speziell für den einachsigen Fall folgender formelmäßiger Zusammenhang zwischen der aktuellen Länge l und der Ausgangslänge l_0 :

$$\varphi = \ln \frac{l}{l_0} \quad (\text{Gleichung 2.2})$$

Die wahre Dehnung ist gemäß Vitzthum et al. (2018) zur Beschreibung der Verformung geeignet, weil die additive Zerlegung der elastischen Dehnung φ_{el} und der plastischen Dehnung φ_{pl} zulässig ist und geschrieben werden kann als:

$$\varphi = \varphi_{el} + \varphi_{pl} \quad (\text{Gleichung 2.3})$$

Weiterhin gilt, dass Dehnungen dieses Dehnungsmaßes zu einer Gesamtdehnung kumuliert werden können, weil in der Umformtechnik typischerweise der plastische Dehnungsanteil deutlich größer als der elastische Anteil ist. Die Gesamtdehnung ist also gleich der Summe der Dehnungen der einzelnen Umformstufen. Im Gegensatz zur wahren Dehnung wird die technische Dehnung ϵ als das Verhältnis der Längenänderung Δl zur Ausgangslänge l_0 bezeichnet. (Doege und Behrens, 2016)

Als technische Spannung σ_0 wird das Verhältnis der Belastung F zur Anfangs-Querschnittsfläche A_0 bezeichnet, wohingegen die wahre Spannung σ , auch Cauchy-Spannung genannt, als das Verhältnis der Belastung F zur aktuellen Querschnittsfläche A definiert ist. Für den einachsigen Spannungszustand gilt somit:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Gleichung 2.4})$$

Die aktuelle Querschnittsfläche wiederum wird auf der Grundlage der Annahme von Volumenkonstanz folgendermaßen berechnet:

$$A = \frac{A_0 l_0}{l_0 + \Delta l} \quad (\text{Gleichung 2.5})$$

mit der Anfangsquerschnittsfläche A_0 , der Anfangsmesslänge l_0 und der Längenänderung Δl (Banabic, 2000). Die wahre Spannung kann in Kombination mit der wahren Dehnung verwendet werden, da die Größen zueinander arbeitskonjugiert sind (Macvean, 1968). Üblicherweise wird die Spannung mit der auftretenden Dehnung in Form eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms in Beziehung gesetzt (Banabic, 2000). Mithilfe des Spannungs-Dehnungs-Diagramms wird das Verhalten von Materialien unter einachsiger Zug- oder Druckbelastung dargestellt, wobei es in die elastische Beanspruchung, die elastisch-plastische Verformung und die elastische Entlastung bzw. die Druckbeanspruchung unterteilt werden kann. Abbildung 2.2 zeigt eine beispielhafte Kurve der wahren Spannung gegenüber der wahren Dehnung und die wichtigsten mechanischen Kennwerte, die im folgenden kurz erläutert werden.

Im Sonderfall des einachsigen Zugs wird der lineare Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung durch das Hook'sche Gesetz beschrieben, das auf den Annahmen von Hooke (1676) basiert und eine rein elastische Formveränderung des Materials zu Beginn einer Belastung beschreibt. Genauer gesagt bedeutet dies, dass die Verformung reversibel ist und das Bauteil nach Wegnahme der äußeren Belastung in seinen ursprünglichen Zustand zurückkehrt. Mit dem Hooke'schen Gesetz kann für den einachsigen Belastungsfall der Elastizitätsmodul E auf Basis der Cauchy-Spannung σ und der elastischen Dehnung φ_{el} berechnet werden, wobei ein ideales linear-elastisches Verhalten angenommen wird (Siegert, 2015). Formelmäßig lässt sich

das Hook'sche Gesetz, umgestellt nach dem Elastizitätsmodul, folgendermaßen ausdrücken:

$$E = \frac{\sigma}{\varphi_{el}} \quad (\text{Gleichung 2.6})$$

Der anfängliche Elastizitätsmodul ist dabei eine materialtheoretische Beschreibung der proportionalen Spannungs-Dehnungs-Beziehung bei rein elastischer Verformung und repräsentiert dementsprechend die elastische Steifigkeit des Materials (Doege und Behrens, 2016).

Am Ende des elastischen Bereichs setzt ab einem bestimmten Punkt die plastische Verformung ein. Dabei wird Verformungsarbeit abgebaut und das Material verhält sich nichtlinear bzw. plastisch und kann nach Wegnahme der Belastung nicht wieder vollständig in seinen ursprünglichen Ausgangszustand zurückkehren (Huber, 1904). Wird das Material nun weiterhin belastet und weiter gedehnt, dann sind sowohl elastische als auch plastische Dehnungsanteile unter Last vorhanden. Die tatsächliche Gesamtdehnung umfasst somit sowohl reversible als auch irreversible Verformungsanteile. Wird das Material nun entlastet, springt die reversible elastische Dehnungskomponente nach der linear-elastischen Theorie mit der gleichen Steigung zurück wie im Bereich der elastischen Belastung. Nach der vollständigen Entlastung spiegelt die verbleibende plastische Verformung die wahre plastische Dehnung wieder. Wird das Bauteil nun in entgegengesetzter Richtung belastet, was einer Stauchung entspricht, dann kommt es auch hier zur nichtlinearen elastisch-plastischen Verformung, wenn die Elastizitätsgrenze überschritten wird. Die Elastizitätsgrenze ist nun jedoch geringer als bei der erstmaligen Belastung. Dieses Phänomen wird als Bauschinger-Effekt (Bauschinger, 1886) bezeichnet und ist auf Eigenspannungen zurückzuführen, die nach der Entlastung aufgrund ungleichmäßiger Verteilung

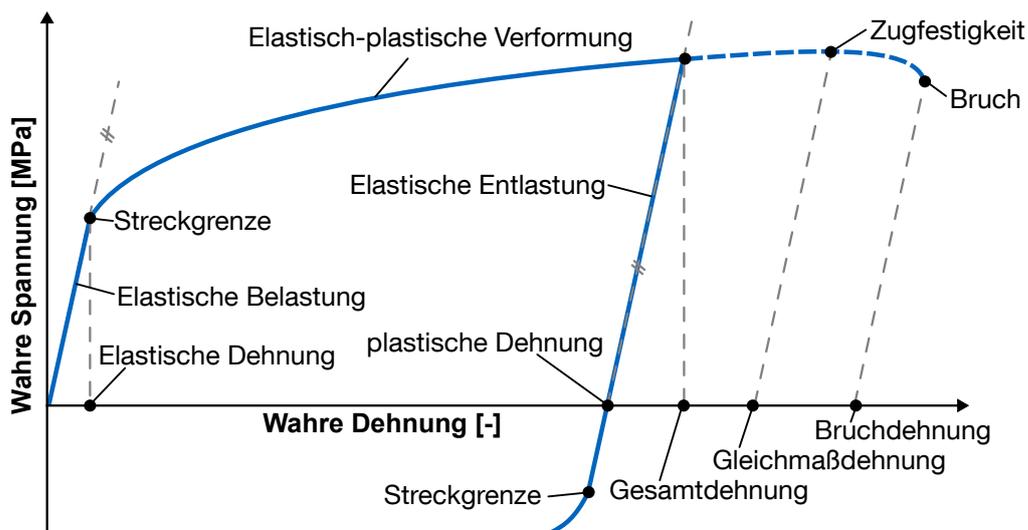


Abbildung 2.2: Beispielhafter Verlauf eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms mit Kennzeichnung der wichtigsten Bereiche und mechanischen Kennwerte

der Werkstoffverformungen zurückbleiben oder bei Umkehrung der Belastungsrichtung eine frühere Aktivierung von Versetzungsbewegungen bewirken (Doege und Behrens, 2016).

Abbildung 2.2 zeigt neben der mechanischen Wechselbeanspruchung auch den Fall, dass das Material nicht entlastet, sondern einachsigt bis zum Bruch weiter belastet wird. Dabei wird die maximale Spannung, die vor der Einschnürung auftritt, d. h. bevor die Spannung wieder abnimmt, als Zugfestigkeit R_m bezeichnet (Doege und Behrens, 2016). Die zugehörige Dehnung wird als Gleichmaßdehnung A_g bezeichnet und ist die Dehnung bis zu der sich die Zugprobe gleichmäßig dehnt und nicht einschnürt (Bargel, 2022). Nach der Einschnürung findet die plastische Dehnung nur noch in diesem Bereich, wobei die Dehnung an der Bruchstelle des Materials als Bruchdehnung A_{80} bezeichnet wird (Doege und Behrens, 2016).

Im Bereich der Umformtechnik spielt neben den bereits diskutierten mechanischen Kennwerten auch das tribologische System, insbesondere die Reibung, eine bedeutende Rolle. Vor allem im Bereich geringer Blechdicken kann die Reibung einen entscheidenden Faktor in Bezug auf die Machbarkeit und die Qualität der Bauteile ausmachen. Im Gegensatz dazu sinkt der Einfluss der Reibung bei zunehmender Blechdicke ab. Im Allgemeinen lassen sich dabei drei Arten der Reibung unterscheiden: Festkörperreibung, die ohne Verwendung von Schmierstoff auftritt; Mischreibung, bei der zwar ein Schmierstoff vorhanden ist es aber teilweise noch zu Kontakt in den Rauigkeitsspitzen zwischen Werkzeug und Werkstück kommt; und Flüssigkeitsreibung, bei der der eingesetzte Schmierstoff für eine vollständige Trennung der Oberflächen sorgt. Diverse Faktoren beeinflussen die Reibung, darunter die Temperatur, die Belastung, die relative Bewegungsgeschwindigkeit der Komponenten und einige mehr, wie Abbildung 2.3 veranschaulicht. (Czichos und Habig, 2015)



Abbildung 2.3: Einflussfaktoren auf den Reibwert während des Umformprozesses (modifiziert von Doege und Behrens (2016))

Da die Reibung einer Relativbewegung entgegenwirkt und dadurch den Prozessablauf erschwert, ist eine möglichst geringe Reibkraft erstrebenswert. In der Umformtechnik wird diese im Allgemeinen durch die Mischreibung erreicht, was auch durch die sogenannte Striebeck-Kurve gezeigt werden kann. Um auch in der Simulation die Reibung abbilden zu können, ist eine mathematische Formulierung des Kontakts zwischen Werkzeug und Werkstück erforderlich. In der Blechumformtechnik wird die Reibung vorwiegend mit dem Coulomb'schen Reibgesetz beschrieben und dementsprechend über die Reibzahl μ charakterisiert. Nach Coulomb besteht folgender formelmäßiger Zusammenhang zwischen der Reibkraft F_R , der Reibzahl μ und der senkrecht wirkenden Normalkraft F_N :

$$F_R = \mu \cdot F_N \quad (\text{Gleichung 2.7})$$

In der Praxis wird für die Reibzahl ein konstanter Mittelwert angenommen, wobei ausreichende Erfahrungs- und Versuchswerte für diverse Umformverfahren und Materialien bereits vorhanden sind. Als natürliche Grenze der Reibkraft ist die Schubfließgrenze des Werkstoffs zu sehen, da bei Überschreiten der Schubfließgrenze ein Abscheren des Blechbauteils entstehen würde. Im Coulomb'schen Reibgesetz bleibt die Schubfließgrenze jedoch unbeachtet, wodurch eine Beschreibung von Systemen mit hohen Normalspannungen nicht möglich ist. (Doege und Behrens, 2016; Popov, 2009)

2.1.2 Eigenspannungen

In einem geschlossenen System sind Eigenspannungen innere Spannungen, auf die keine äußeren Kräfte, Lasten und Momente einwirken (Macherauch et al., 1973). Die inneren Kräfte und Momente müssen sich im mechanischen Gleichgewicht befinden, wobei auch ein Temperaturgleichgewicht vorherrschen muss (Heyn, 1913; Withers und Bhadeshia, 2001b). Ein Kräftegleichgewicht besteht immer dann, wenn die Summe der inneren Kräfte bezüglich jeder Schnittfläche durch das abgeschlossene System gleich Null ist und die inneren Momente ebenfalls verschwinden (Macherauch et al., 1973).

Eigenspannungen entstehen durch eine Vielzahl von Prozessen, einschließlich Fertigungsprozessen wie Umformen oder Schweißen, sowie durch thermische oder chemische Effekte wie Wärmebehandlung und Abkühlung (Habschied et al., 2015). In der Regel sind Eigenspannungen unerwünscht, da sie die Lebensdauer von Bauteilen verkürzen können. Sie können auch zu Rissen und Deformationen führen, die die Funktion des Materials oder des Bauteils beeinträchtigen oder zu unerwarteten Versagen des Bauteils führen (Issler et al., 2003). Nach Volk et al.

(2021) liefern Eigenspannungen per se auch das Potenzial, die mechanischen Eigenschaften von umformtechnisch hergestellten Bauteilen zu verbessern. So hat beispielsweise J. Stahl (2021) in seiner Arbeit den Einfluss des Scherschneidvorgangs auf den Eigenspannungszustand und der daraus resultierenden Schwingfestigkeit anhand der Near-Net-Shape-Blanking-Verfahren untersucht und die Nutzbarkeit prozessinduzierter Eigenspannungen zur Schwingfestigkeitssteigerung von Zahnrädern gezeigt. Darüber hinaus wurden in weiteren Untersuchungen positive Effekte von gezielt eingebrachten Eigenspannungen nachgewiesen. Zum Beispiel konnte durch das Induzieren von Druckeigenspannungen mittels Kugelstrahlen das Ermüdungsverhalten eines Bauteils erfolgreich verbessert werden (Issler et al., 2003). Anhand dieser Ergebnisse lässt sich bereits erkennen, wie wichtig es ist, Eigenspannungen zu identifizieren und zu kontrollieren, um sicherzustellen, dass die gefertigten Bauteile ihren beabsichtigten Zweck erfüllen und den geforderten Belastungen standhalten.

Neben Metallen können auch in vielen anderen Materialien, wie beispielsweise Kunststoffen, Keramiken und Verbundwerkstoffen, Eigenspannungen auftreten (Busch, 2022). Dabei hängen die Höhe der Eigenspannungen und deren Verteilung von vielen Faktoren ab, einschließlich der Art des Materials, der Mikrostruktur oder der thermischen Behandlung (Busch, 2022). Um die Eigenspannungen zu charakterisieren wurden diese von Macherauch et al. (1973) in drei Gruppen anhand der Ausdehnung unterteilt. Abbildung 2.4 stellt die Einteilung der makroskopischen, mikroskopischen und submikroskopischen Eigenspannungen anschaulich dar.

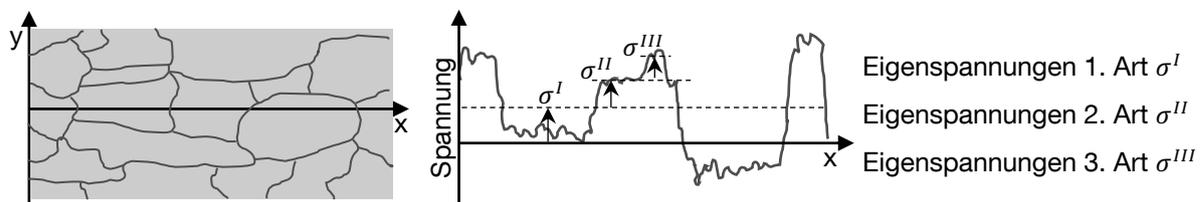


Abbildung 2.4: Klassifizierung der Eigenspannungen nach Macherauch et al. (1973)

Die Eigenspannungen 1. Art, auch makroskopische Eigenspannungen genannt, charakterisieren den über größere Bauteilbereiche und über mehrere Körner wirksamen Eigenspannungsanteil, wobei die Quantifizierung mit Gleichung 2.8 beschrieben werden kann (Habschied et al., 2015). Diese Art von Eigenspannungen sind auf der oberflächlichen Ebene oder in der Nähe der Oberfläche des Materials am stärksten ausgeprägt. Wenn das Gleichgewicht der Eigenspannungen vom Typ I gestört ist, kommt es zu makroskopischen Änderungen der Abmessungen des Bauteils oder zu Rissen im Bauteil.

$$\sigma^I = MW(\sigma) \quad (\text{Gleichung 2.8})$$

Als Eigenspannungen 2. Art werden die innerhalb eines Kornes wirksamen Anteile beschrieben (Habschied et al., 2015). Diese Eigenspannungen sind mikroskopischer Art und werden deswegen über einen Kristallit bzw. ein Korn gemittelt (Gleichung 2.9) oder können als Abweichung der Eigenspannungswerte 1. Art angesehen werden (Habschied et al., 2015). Über eine hinreichend große Anzahl an Körner besteht ein inneres Kräfte- und Momentengleichgewicht, wodurch Abweichungen in diesem Gleichgewicht auch zu makroskopischen Veränderungen führen können (Kloos, 1979).

$$\sigma^{II} = MW(\sigma) - \sigma^I \quad (\text{Gleichung 2.9})$$

Eigenspannungen 3. Art sind über submikroskopische Werkstoffbereiche inhomogen und werden daher als lokale Abweichung der vorliegenden Eigenspannungen von der Summe aus Eigenspannungen 1. und 2. Art beschrieben (Habschied et al., 2015; Kloos, 1979). Eigenspannungen 3. Art variieren auf atomarer Ebene beziehungsweise innerhalb eines einzelnen Kornes und verursachen daher keine makroskopischen Änderungen der Abmessungen des Teils, wenn das Gleichgewicht gestört wird. In allen typischerweise verwendeten Werkstoffen sind diese Spannungen überlagert. (Macherauch et al., 1973; Withers und Bhadeshia, 2001a)

$$\sigma^{III} = \sigma - (\sigma^I + \sigma^{II}) \quad (\text{Gleichung 2.10})$$

Eigenspannungen resultieren primär aus Inkompatibilitäten in der Deformation, die durch äußere Beanspruchungen entstehen und sowohl mechanische, thermische als auch chemische Ursachen haben können (Kloos, 1979; Withers und Bhadeshia, 2001b). Habschied et al. (2015) erklärt, dass Eigenspannungen infolge von rein mechanischer Beanspruchung durch eine Plastifizierung von Teilbereichen innerhalb eines Bauteils entstehen. Thermisch induzierte Eigenspannungen hingegen entstehen, wenn die thermische Ausdehnung in Teilbereichen eines Bauteils behindert wird und es dadurch lokal zu einer plastischen Deformation kommt, die nach einer Homogenisierung der Temperatur zu Anpassungsdehnungen zwischen den plastisch und den elastisch deformierten Teilbereichen führt (Habschied et al., 2015). Darüber hinaus können auch chemische Prozesse zu Eigenspannungen führen, wie zum Beispiel beim Nitrieren, wo Eigenspannungen in der Diffusionsschicht durch eine lokale Aufweitung des Kristallgitters durch die Eindiffusion von Stickstoff entstehen (Günther et al., 2004; Hoja et al., 2012). Da ein Bauteil bei jedem Fertigungsprozess verschiedenen Beanspruchungen ausgesetzt ist, führt jeder Fertigungsprozess zu einem charakteristischen Eigenspannungsprofil. Dabei sind die Art der Beanspruchung, der verwendete Werkstoff, die Prozessführung und die Prozessverkettung entscheidend für den finalen Eigenspannungszustand. Die erzeugten Eigenspannungsprofile unterscheiden sich hinsichtlich der Lage und der Höhe des Eigenspannungsmaximums sowie der Wirkungstiefe. (Habschied et al., 2015)

2.1.3 Biegeverfahren

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die Grundlagen der Plastizitätstheorie und der Eigenstressungen detailliert beschrieben wurden, folgt nun die Einteilung der Biegeverfahren, um auch aus produktionstechnischer Sicht die Grundlagen des Rohrbiegens zu erläutern. Das Biegen ist nach DIN 8580:2022-12 ein Fertigungsverfahren der Umformtechnik und nach DIN 8586:2003-09 definiert als das Umformen von festen Körpern, wobei der plastische Zustand im Wesentlichen durch eine Biegebeanspruchung herbeigeführt wird. Die Einteilung der einzelnen Verfahren wird aufgrund der Werkzeugbewegung getroffen, wobei zwischen gradliniger und drehender Bewegung, sowie dem Biegen mit Wirkenergie unterschieden wird. In Anlehnung an die Einteilung nach VDI 3430 zeigt die Abbildung 2.5 einige ausgewählte Beispielfahrverfahren.

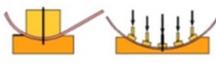
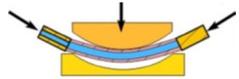
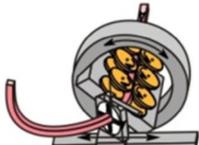
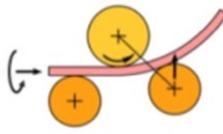
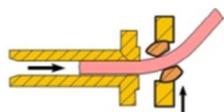
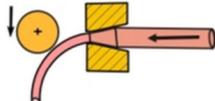
	Drehende Werkzeugbewegung		Gradlinige Werkzeugbewegung	
Formgebundene Kontur	Klassisches Rohrbiegen 	Rotationszugbiegen 	Gesenkbiegen 	Biegen unter Innendruck 
Kinematische Formgebung	Mehrrollenbiegen mit Torsionsüberlagerung 	Drei-Rollen-schubbiegen 	Freiformbiegen mit bewegter Matrize 	Biegen mit Durchdrücken 

Abbildung 2.5: Beispielhafte Einteilung formgebundener Biegeverfahren in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3430

Von den dargestellten Verfahren ist das Rotationszugbiegen das am häufigsten in der Industrie eingesetzte Verfahren, welches zur Gruppe der formgebundenen Verfahren mit drehender Werkzeugbewegung gehört, wobei die Kavität, in der das Halbzeug geführt ist den äußeren Abmessungen des Halbzeugquerschnittes entspricht (Borchmann, 2021). Um das Halbzeug schließlich umformen zu können, ist entsprechend der VDI 3430 und nach Hinkel (2013) ein Biegemoment erforderlich, welches zusätzlich von einer Kraft in Längsrichtung überlagert wird. Neben Rundrohren unterschiedlicher Wanddicken und Außendurchmesser gehören zu den gängigsten Halbzeugen des Rotationszugbiegens auch diverse Voll- und Hohlprofile. Besondere Anwendung findet das Verfahren bei Biegeaufgaben mit engen Radien und dünnwandigen Rohren (D. Stahl, 2002). Nach H. Hoffmann et al. (2012) sind dabei sogar Biegeradien kleiner als der

Durchmesser des Rohrs möglich, wobei diese Aufgabe eine Ausnahme darstellt. Nachteil des Verfahrens ist, dass für jeden Biegeradius eine eigene Biegeform und für jede Biegegeometrie ein eigener Werkzeugsatz benötigt wird (Borchmann, 2021). In Abbildung 2.6 ist das Rotationszugbiegen schematisch dargestellt und die notwendigen Werkzeugkomponenten beschriftet.

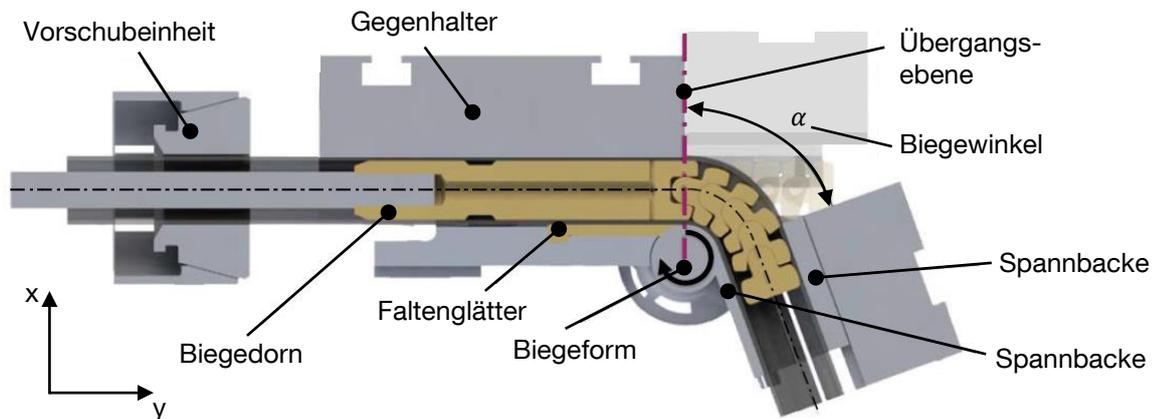


Abbildung 2.6: Prinzipskizze Rotationszugbiegen in Anlehnung an Borchmann (2021)

Zu Beginn des Prozesses wird das Halbzeug am hinteren Ende im Spannfutter fixiert und am vorderen Ende mit den beiden Spannbacken geklemmt. Dann startet die Umformung, wobei die Biegeform und die Spannbacken rotieren und das eingespannte Halbzeug entlang der Kavität der Biegeform gebogen wird. Um bei komplizierten Biegeaufgaben ein Ausknicken oder eine Faltenbildung möglichst zu vermeiden werden entsprechend angepasste Biegedorne verwendet. Zusätzlich wird das Bauteil beim Biegen von außen durch den Faltenglätter gestützt. Welche Auswirkungen die korrekte Einstellung der Prozessparameter und Werkzeugkomponenten auf die Qualität des Biegebauteils hat, zeigt die Arbeit von Borchmann (2021). Es wird eine wissenschaftliche Methode vorgestellt, welche die Faltenbildung während des Biegeprozesses selbstständig, durch Anpassen der Zustellung des Gegenhalters oder der Vorschubgeschwindigkeit verhindert und dadurch das Prozessfenster erweitert (Borchmann, 2021).

Im Allgemeinen wurde bereits von Engel et al. (2008) das Prozessfenster des Rotationszugbiegens in Form eines Arbeitsdiagramms ermittelt, welches in Abbildung 2.7 anschaulich dargestellt ist. Dabei ist auf der Ordinate der Biegefaktor B (Gleichung 2.11) und auf der Abszisse der sogenannte Wanddickenfaktor W (Gleichung 2.12) aufgetragen. Der Biegefaktor dient dabei als Vergleichswert für Biegeaufgaben und ist nach VDI 3430 definiert als der Quotient des Biegeradius R , gemessen an der neutralen Faser, zur Profilhöhe H , die bei Rundrohren dem Außendurchmesser D_A entspricht. Um auch Halbzeuge vergleichbar machen zu können wird der Wanddickenfaktor als Quotient der Profilhöhe in Biegerichtung bezogen auf die Wanddicke s

berechnet.

$$B = \frac{R}{D_A} \quad (\text{Gleichung 2.11})$$

$$W = \frac{D_A}{s} \quad (\text{Gleichung 2.12})$$

Neben einer Abschätzung des minimal herzustellenden Biegeradius, kann aus dem Arbeitsdiagramm auch abgelesen werden, welche Dorngeometrie für die Fertigung des gewünschten Bauteils benötigt wird.

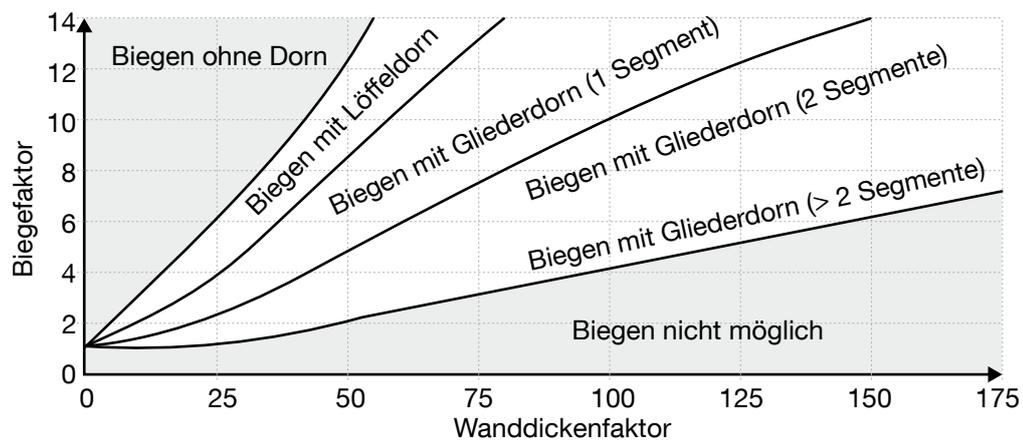


Abbildung 2.7: Arbeitsdiagramm für das Rotationszugbiegen in Anlehnung an Engel et al. (2008)

Das Rotationszugbiegen ist in der Industrie weit verbreitet, vor allem aufgrund der hohen Qualität der gebogenen Bauteile, der präzisen Ausführung diverser Biegeaufgaben, der guten Zuverlässigkeit und des fortgeschrittenen Entwicklungsstandes. Das Rotationszugbiegen hat aber auch aufgrund des formgebundenen Prozesses einige Schwächen, wie beispielsweise die Notwendigkeit einer Bogen-Linien-Konstruktion und dem damit verbundenen geraden Stück zwischen zwei Bögen, welches sich nur mit erheblichen Mehraufwand in der Werkzeugfertigung vermeiden lässt. Darüber hinaus müssen für jede neue Biegegeometrie neue Werkzeuge gefertigt werden, was den Prozess kostenintensiv macht und auch die Designfreiheit einschränkt. (Beulich, 2022; Landgrebe et al., 2015)

Im Gegensatz zu den konventionellen formgebundenen Biegeverfahren bieten die Biegeverfahren mit kinematischer Formgebung den entscheidenden Vorteil der Flexibilität und liefern eine nahezu vollständige Designfreiheit des Biegebauteils innerhalb der Prozessgrenzen. Der Verlauf der Biegelinie wird bei den kinematischen Biegeverfahren durch eine Relativbewegung der Biegewerkzeuge zueinander und zum biegenden Halbzeug erzeugt. Darüber hinaus sind die Biegewerkzeuge der Außenkontur des Halbzeuges angepasst und können damit bei einer Änderung der Geometrie der Biegelinie weiterhin eingesetzt werden. Somit können mit nur einem

Werkzeugsatz unterschiedliche Biegegeometrien auf derselben Biegemaschine gefertigt werden. Dadurch entsteht gegenüber formgebundener Biegeverfahren der Vorteil, dass eine wesentlich höhere Gestaltungsflexibilität erreicht wird und ein breiteres Teilespektrum gefertigt werden kann. Zusätzlich sind die Kosten der Werkzeuge deutlich geringer als im Vergleich mit den formgebunden Biegeverfahren. (Groth, 2020)

Chatti (1998) hat jedoch bereits gezeigt, dass die kinematischen Verfahren sehr anfällig für halbzeug-, prozess- oder werkzeugseitige Störeinflüsse sind. Darüber hinaus wurden in unterschiedlichen Arbeiten, beispielsweise von Beulich (2022), Kersten (2013) und Vatter (2015) gezeigt, dass Schwankungen in den geometrischen und mechanischen Eigenschaften des Halbzeuges einen hohen Einfluss auf die Qualität der Biegebauteile bei kinematischen Biegeverfahren haben. Die kinematischen Verfahren haben zwar eine hohe Anzahl an Prozessparametern und Einstellgrößen, um auf solche Schwankungen reagieren zu können, jedoch ist nach H. Hoffmann et al. (2012) genau diese hohe Anzahl an Freiheitsgraden und deren Wechselwirkungen untereinander für einen geringen Automatisierungsgrad der Prozesse verantwortlich. Die Komplexität der Prozesse und das fehlende Prozesswissen führt dazu, dass die kinematischen Biegeverfahren typischerweise noch von Experten auf empirische Weise eingestellt und korrigiert werden (Groth, 2020).

Als wichtigste Vertreter der kinematischen Biegeprozesse in der Industrie sind zum einen das Freiformbiegen mit bewegter Matrize und zum anderen das 3-Rollen-Biegen bzw. die Erweiterung des Prozesses das 3-Rollen-Schubbiegen (DRSB) zu nennen. Da das Freiformbiegen mit bewegter Matrize Hauptbestandteil dieser Arbeit ist, wird es in Kapitel 2.2 näher betrachtet und aus Gründen der Übersicht in diesem Abschnitt nur auf das DRSB eingegangen, womit auch Freiformkonturen gebogen werden können. Im Allgemeinen kann das DRSB für unterschiedliche Querschnitte eingesetzt werden und ist insbesondere in der Serienproduktion von mittleren bis großen Stückzahlen zu finden (Chatti, 1998; H. Hoffmann et al., 2012). Das DRSB wird nach Groth (2020) für die Herstellung von Biegebauteilen mit großen Radien und sich kontinuierlich ändernden Krümmungsverläufen eingesetzt. Abbildung 2.8 zeigt die schematische Darstellung des DRSB mit der Kennzeichnung aller wichtigen Werkzeugkomponenten.

Zu Beginn des Prozesses wird das Halbzeug zwischen den Rollen eingeführt und am hinteren Ende in der Vorschubeinrichtung geklemmt. Zur einfacheren Beladung bewegen sich die Stützrollen und die Umformrolle etwas von der Biegerolle weg. Die Vorschubeinheit kann das Rohr sowohl in eine Richtung schieben, als es auch um die eigene Längsachse rotieren und sorgt dadurch für die Möglichkeit auch dreidimensionale Biegegeometrien herstellen zu können. Um die Führungseigenschaften zu erhöhen und auch für mehr Formstabilität zu sorgen, werden mindestens zwei Stützrollen eingebaut, wie es auch in Abbildung 2.8 dargestellt ist.

Nachdem die Maschine beladen wurde, bewegen sich die Stützrollen und die Umformrolle zurück in Richtung der Biegerolle, um das Rohr einzuklemmen. Von dieser Ausgangsposition aus wird die Umformrolle in die Biegeposition verfahren. Die Position der Umformrolle bestimmt dabei die Krümmung des Biegebauteils und kann unter Berücksichtigung der Maschinen- und Werkzeuggrenzen frei positioniert werden. Während der Positionierung der Umformrolle wird das Rohr kontinuierlich durch die Vorschubeinheit verschoben. Über den zurückgelegten Weg der Vorschubeinheit lässt sich der Biegewinkel einstellen. Sollen hingegen Freiformgeometrien gebogen werden, muss die Position der Umformrolle und die Rotation des Rohres entsprechend der gewünschten Krümmung der Biegelinie während des laufenden Prozesses angepasst werden. Nach dem Abschluss des Biegeprozesses kann das gebogene Rohr entweder von einem Maschinenbediener oder mithilfe eines robotergestützten Handhabungssystems aus der Maschine entnommen und für weitere Verarbeitungsschritte genutzt werden. (Groth, 2020)

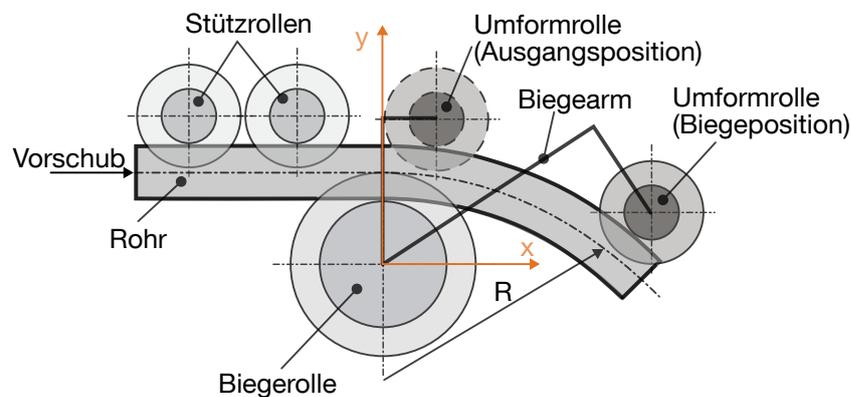


Abbildung 2.8: Prinzipskizze des 3-Rollen-Schubbiegens modifiziert von Kersten (2013)

Ein weiteres Beispiel für die Entwicklung unterschiedlichster Konzepte für Maschinen, Werkzeuge und Prozessabläufe zur Fertigung dreidimensionaler Bauteile ist das Hexabend-Verfahren. Es ist vor allem durch seine 6 hydraulisch längenveränderlichen Streben charakterisiert. Wie bei den meisten Biegeverfahren wird das Rohr mit einer Transporteinheit kontinuierlich in Rohrlängsrichtung bewegt. Es wird dabei durch eine fixierte Führungseinheit und eine bewegliche Matrize verschoben. Die Umformung erfolgt anschließend durch die Bewegung der Matrize über die aufwendige Kinematik der hydraulischen Streben. (Neugebauer, Drossel und Blau, 2001; Neugebauer, Drossel und Lorenz, 2001; Neugebauer, 2006) Darüber hinaus wurde von Hermes (2011) ein Biegeverfahren namens Torque Superposed Spatial (TSS) vorgestellt und von Staupendahl (2021) weiterentwickelt. Das Verfahren unterscheidet sich von den gängigen Verfahren dadurch, dass für den kontinuierlichen Vorschub keine verfahrbare Transporteinheit verwendet wird, sondern ein rollenbasiertes Transportsystem.

2.1.4 Materialien und Halbzeuge

Um den steigenden Kundenanforderungen und den engeren Toleranzvorgaben im Zusammenbau gerecht zu werden, müssen auch die Anforderungen an die Halbzeuge erhöht werden und gleichzeitig die verfügbare Fertigungstechnologie bis an die Grenzen ausgereizt werden (Weiß und Buchmayr, 2006). Dabei kann zur Herstellung von geschweißten Rundrohren oder Profilen je nach Anforderung eines von vielen Fertigungsverfahren ausgewählt werden, welche nach v. Breitenbach (2008) in die Gruppen Urformen, Umformen oder Umformen mit Montage eingeteilt werden können. Da in dieser Arbeit längsnahtgeschweißte Rundrohre verwendet werden, wird hier nur auf das dafür notwendige Fertigungsverfahren des Rollprofilierens eines Blechbandes mit abschließendem Längsnahtschweißen eingegangen, welches in Abbildung 2.9 dargestellt ist. Zu Beginn wird das Material von einem Spaltband mittels einer Haspel abgewickelt und anschließend in unterschiedlichen Stufen gleichmäßig eingeformt. Es folgt das Verschweißen der Bandkanten mittels Laser- oder Hochfrequenzschweißen. Zum Abschluss wird das Rohr nachkalibriert, um geometrische Abweichungen auszugleichen und lokale Spannungsspitzen abzubauen und schließlich auf die gewünschte Länge geschnitten.

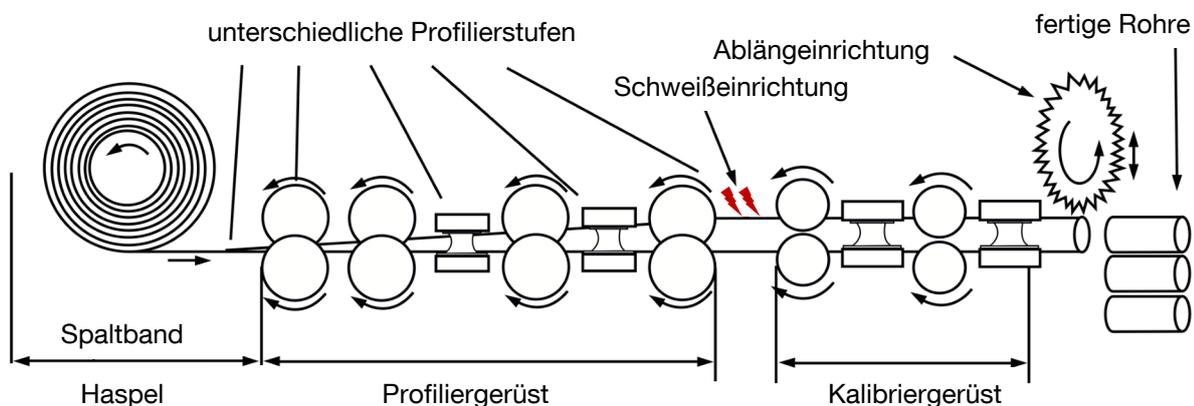


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung des Rollprofilierens zur Herstellung längsnahtgeschweißter Rohre in Anlehnung an v. Breitenbach (2008)

Nach Groche und v. Breitenbach (2008) beeinflusst das Fertigungsverfahren der Rohrherstellung und die dabei entstehenden mechanischen Eigenschaften die Qualität des Bauteils nach dessen Weiterverarbeitung. Dabei haben neben der Wanddicke auch die eingebrachten Eigenspannungen und die Verteilung der Festigkeiten entlang des Rohrumfanges einen signifikanten Einfluss auf die Umformbarkeit (Groche et al., 2005).

2.1.5 Geometrische und mechanische Eigenschaften am gebogenen Rohr

Der folgende Abschnitt klärt die wichtigsten Begriffe in Bezug auf Geometrie und mechanische Eigenschaften gebogener Rundrohre und legt die Terminologie für den weiteren Verlauf der Dissertation fest. Im Allgemeinen lassen sich die Fachausdrücke auf Franz (1961) zurückführen, der bereits vor mehr als 50 Jahren Arbeiten im Bereich des Rohrbiegens veröffentlicht hat. Seine bis heute anwendbaren Ausdrücke für geometrische Eigenschaften, sowie der Spannungszustand im elastischen und plastischen Bereich beim Rohrbiegen sind in Abbildung 2.10 dargestellt.

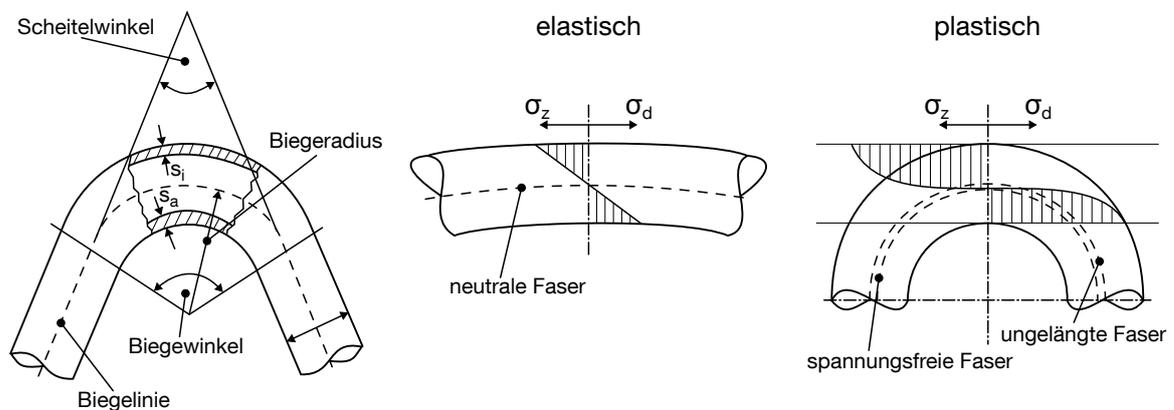


Abbildung 2.10: Grundlegende Begriffe am Rohrbogen modifiziert von Franz (1961)

Als wichtigste Begriffe in der Biegetechnik sind neben den Abmessungen der Halbzeuge vor allem der Biegeradius R und der Biegewinkel α zu nennen. Der Biegeradius bezieht sich dabei auf die neutrale Faser des gebogenen Rohrs. Franz (1961) definiert die neutrale Faser, als ungelängte Schicht die im Bereich elastischer Biegung weder Spannungen noch Längenänderungen unterworfen ist. Im Bereich der plastischen Biegung unterscheidet man zwischen der spannungsfreien Faser, in der die Längsspannungen gleich Null sind, jedoch eine Längenänderung auftritt, und der ungelängten Faser, die spannungsbehaftet ist, aber ihre ursprüngliche Länge beibehält. Um verschiedene Biegeaufgaben miteinander vergleichen zu können, wurden von Engel et al. (2008) die Kennzahlen Biegefaktor B (Gleichung 2.11) und Wanddickenfaktor W (Gleichung 2.12) eingeführt. Beide Kennzahlen basieren auf geometrischen Eigenschaften und wurden bereits im vorangegangenen Kapitel definiert und erläutert. Darüber hinaus ist in der VDI 3431 eine Zusammenfassung der wichtigsten und geläufigsten Begriffe in der Biegetechnik, Richtlinien zur Vermessung oder Prüfung von Biegebauteilen und verschiedene Qualitätsfehler gebogener Bauteile niedergeschrieben.

Wie bereits zu Beginn erläutert, lässt sich im Allgemeinen die gesamte Formänderung beim Umformen in einen elastischen und plastischen Anteil zerlegen. Franz (1961) hat diesen Zusam-

menhang genutzt und die Zerlegung der elastisch-plastischen Umformung auf das Rohrbiegen im Allgemeinen übertragen (vgl. Abbildung 2.10). Bei der elastischen Biegung ist zu erkennen, dass sowohl die Spannungen als auch die Dehnungen in der äußersten Faser am höchsten sind und in der bereits beschriebenen neutralen Faser keine Spannungen, Dehnungen oder Längenänderungen auftreten. Wird das Rohr nun plastisch umgeformt, dann verändert sich der Spannungs- und Dehnungszustand maßgeblich, da die Spannungen nun nicht proportional zu den Dehnungen verlaufen (Franz, 1961). Zusätzlich dazu verschiebt sich die spannungsfreie Faser in Richtung des Mittelpunkts der gebogenen Krümmung, während die ungelängte Faser weiter entfernt vom Krümmungsmittelpunkt zu finden ist.

Schon in den frühen 1990er Jahren führte Khodayari (1994) Berechnungen am Rohrbogen durch, um Biegemomente bei Stahlprofilen abzuschätzen. Später erweiterten Engel et al. (2008) diese Berechnungen durch Einbeziehung der Biegemaschine und deren Werkzeuge, um auch das ideelle Biegemoment der Biegemaschine zu ermitteln. Ebenfalls von Engel und Hassan (2014) wurde die Verschiebung der neutralen Faser beim Rotationszugsbiegen untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die mechanischen Eigenschaften einen Einfluss auf die Verschiebung der neutralen Faser beim Biegen haben und die Axialspannungen durch ein nach Innen wandern der neutralen Faser beeinflusst werden (Engel und Hassan, 2014). Von Guo et al. (2019) wurde untersucht, wie sich die Verschiebung der neutralen Faser beim Freiformbiegen mit 5 Freiheitsgraden von Verbundrohren aus Aluminium und Kupfer verhält. In diesem Zusammenhang wurde gezeigt, dass sich die neutrale Faser nach außen verschiebt und diese Verschiebung mit einem abnehmenden Biegeradius zunimmt. Dies resultiert daraus, dass die Vorschubeinheit bei engeren Biegungen mehr Kraft aufwenden muss und somit die Druckspannungen im Bauteil steigen, was wiederum die Verschiebung der neutralen Faser nach außen bewirkt (Guo et al., 2019). Zusätzlich wird eine analytische Beschreibung für die Verschiebung der neutralen Faser abgeleitet, die auch in der Arbeit von Cheng et al. (2022) Anwendung findet. Diese Studie untersucht den Einfluss der Schweißnahtposition beim Freiformbiegen mit 5 Freiheitsgraden. Die Untersuchung von Cheng et al. (2022) legt nahe, dass die Position der Schweißnaht einen maßgeblichen Einfluss auf die geometrischen und mechanischen Eigenschaften des Biegebauteils hat. Die Ergebnisse zeigen, dass bei großen Radien Unterschiede in der Geometrie im Vergleich zu nahtlosen Rohren erkennbar sind, jedoch bei sinkenden Radien vernachlässigbar werden. In Bezug auf die mechanischen Eigenschaften gibt es einen deutlichen Unterschied, je nachdem, ob die Schweißnaht in einem belasteten oder unbelasteten Bereich liegt. Diese Unterschiede sind auf die deutlich anderen mechanischen Eigenschaften der Schweißnaht zurückzuführen, die sowohl eine größere Härte als auch andere mechanische Kennwerte aufweist. Aufgrund des nachgewiesenen Einflusses sollte die Schweißnahtposition in der Biegestrategie berücksichtigt werden. (Cheng et al., 2022)

2.2 Freiformbiegen mit bewegter Matrize

Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf dem Freiformbiegen mit bewegter Matrize liegt, wird dieses Biegeverfahren in den folgenden Abschnitten detailliert betrachtet. Ziel ist es, ein besseres Verständnis für das Verfahren und seine Vor- und Nachteile zu erlangen und die Ergebnisse der vorliegenden Dissertation in den Kontext der aktuellen Forschung einzuordnen. Dazu wird zunächst auf die allgemeine Prozessbeschreibung eingegangen, gefolgt von den Grenzen des Verfahrens und den Qualitätsmerkmalen freiformgebogener Bauteile. Hierbei wird auch auf Kapitel 4.1 verwiesen, in der die Steuerung der verwendeten Freiformbiegeanlage explizit erläutert wird. Anschließend wird die numerische Simulation des Prozesses näher betrachtet und abschließend werden aktuelle Methoden und Modelle zur Auslegung und Absicherung freiformgebogener Bauteile vorgestellt.

2.2.1 Prozessbeschreibung und Werkzeuge

Das Freiformbiegen mit beweglicher Matrize wird umgangssprachlich auch als „MOS-Bending (Murata et al., 1989) oder „Nissin-Verfahren bezeichnet und ist dadurch gekennzeichnet, dass die Biegung des Halbzeugs durch eine Relativbewegung der beweglichen Biegematrize zu einer feststehenden Führungseinheit bei kontinuierlichem Vorschub des Halbzeugs erfolgt. Der klassische Maschinenaufbau besteht aus einer statisch gelagerten Führungseinheit, einer beweglichen Biegematrize und einer Vorschubeinheit. Bei den meisten Biegeoperationen wird zusätzlich ein Biegedorn eingesetzt, um die Qualität der gebogenen Teile zu erhöhen. Abbildung 2.11 zeigt eine schematische Darstellung des Freiformbiegens.

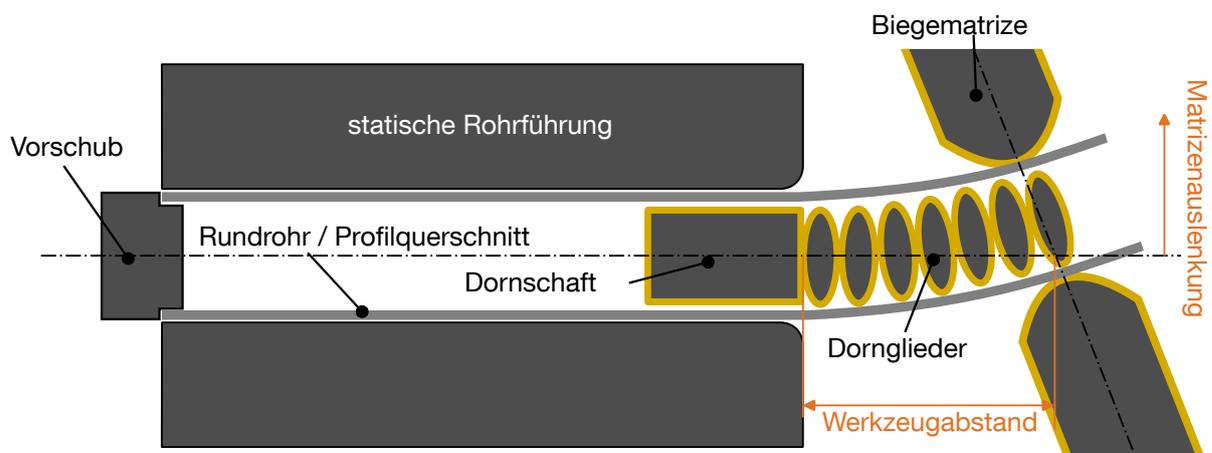


Abbildung 2.11: Freiformbiegen mit bewegter Matrize als schematische Darstellung mit Kennzeichnung der wichtigsten Werkzeugelemente

Bei Freiformbiegen mit bewegter Matrize erfolgt die Bewegung der Biegematrize anhand von Stellmotoren für jede einzelne Achse, wobei neben der Translation auch die Rotation der Matrize mittels Stellmotor eingestellt werden kann (Groth, 2020). Freiformbiegemaschinen mit bewegter Matrize können unterschiedlich viele kinematische Freiheitsgrade haben. Einen Freiheitsgrad stellt dabei immer die Vorschubeinheit dar, welche das Rohr entlang der Rohrachse mit konstanter Geschwindigkeit verschiebt. Handelt es sich um eine Maschine mit 3 Freiheitsgraden, so kann neben dem Vorschub die Matrize auf der xy -Ebene translatorisch verschoben werden. Die Rotation der Biegematrize erfolgt dabei über eine bewegliche Lagerung im Biegekopf. Erweitert man nun die Freiheitsgrade, indem neben der Translation auch die Rotation um die x -Achse als auch um die y -Achse gesteuert möglich wird, so spricht man von einer Biegemaschine mit 5 Freiheitsgraden. Als aktuellste Entwicklungsstufe des Freiformbiegen mit bewegter Matrize kann man das Biegen mit 6 Freiheitsgraden bezeichnen. Neben den 5 bereits genannten Freiheitsgraden besitzen Maschinen mit 6-Achsen die Möglichkeit den gesamten Biegekopf um die Vorschubsachse zu rotieren. Das sorgt beim Biegen von Rundrohren für mehr Designfreiheit, ist aber vor allem beim Biegen von Profilen mit symmetrischen und asymmetrischen Querschnitten von Vorteil, da nun auch noch zusätzlich eine Torsion überlagert werden kann. Aktuelle Untersuchungen, beispielsweise von Yang et al. (2023), zeigen, dass die Torsion einen positiven oder negativen Einfluss auf die Rückfederung beim Biegen von ovalen Profilen aus Edelstahl hat, je nachdem um welche Halbachse gebogen wird. Insgesamt verbindet alle Freiformbiegeverfahren, dass trotz der unterschiedlichen Antriebs- und Werkzeugsysteme eine hohe Flexibilität bei der Gestaltung der Biegegeometrie mit geringem Werkzeugeinsatz erreicht werden kann (Groth, 2020). Nach Neugebauer, Drossel und Lorenz (2001) eröffnet vor allem die kinematische Formgebung neue Möglichkeiten der Gestalterzeugung, wobei die Herausforderung mehr in der Umsetzung der Steuerung als in der Mechanik der Maschine liegt.

Beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize lässt sich die Kinematik im Allgemeinen in 3 Bereiche einteilen. Das Anbiegen, das Biegen im konstanten Bereich und das Rückbiegen, welche im späteren Verlauf der Dissertation näher erläutert werden und zusammen mit einem beispielhaften Krümmungsverlauf grafisch dargestellt sind (Abbildung 5.3). Während des Anbiegens lenkt die Matrize aus und rotiert gleichzeitig, während das Rohr kontinuierlich vorgeschoben wird. Ist der Punkt der maximalen Auslenkung und Rotation der Biegematrize erreicht, so wird dieser Punkt so lange gehalten bis durch das Verschieben des Halbzeuges der zugehörige Biege Winkel erreicht wird. Zum Ende des Rohrbogens verfährt die Matrize entweder wieder zurück in die Ausgangsposition oder direkt zur nächsten Biegeposition. Gantner et al. (2007) haben den grundlegenden Bewegungsablauf einer Freiformbiegemaschine untersucht und daraus eine ideelle Beschreibung der Kinematik der beweglichen Matrize für das Freiformbiegen von zweidimensionalen Biegebauteilen mit konstanter Krümmung abgeleitet. Um die gewünschte

Soll-Geometrie im realen Biegeprozess tatsächlich zu erreichen, wird die ideale Bewegungskurve mit einem empirisch ermittelten Korrekturfaktor KF angepasst, bis die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Bauteil innerhalb der gewünschten Toleranz liegt. Dabei entsteht eine charakteristische Beziehung zwischen dem gewünschten Soll-Radius R_{Soll} und der notwendigen Matrizenauslenkung U .

$$R_{Soll} = U_{ideell} \cdot KF \quad (\text{Gleichung 2.13})$$

Der Korrekturfaktor muss dabei für jedes Material und jeden Querschnitt des Halbzeugs gesondert ermittelt werden, da dieser abhängig von diversen geometrischen und mechanischen Eigenschaften des Halbzeugs und der Maschinenparameter ist. Anhand der Ergebnisse wird geschlussfolgert, dass eine 100-prozentige Kontrolle der Biegebauteile notwendig ist, um auf Schwankungen der Halbzeugeigenschaften reagieren zu können. (Gantner et al., 2007)

Die jeweiligen Kinematikprofile werden aneinander gereiht, um mehrere Einzelbögen innerhalb eines Prozessablaufs zu biegen. Sollten übergangslose Konturen oder dreidimensionale Bauteile gebogen werden, so wird eine Erweiterung der mathematischen Beschreibung der einfachen Bögen benötigt, wie sie in der Arbeit von Beulich (2022) beschrieben ist. Beulich (2022) hat zudem ein Arbeitsdiagramm für das Freiformbiegen mit bewegter Matrize für Rundrohre aus Aluminium anhand seiner durchgeführten Versuche, Simulationen und der Prozessgrenzen der Biegemaschine abgeleitet, welches in Abbildung 2.12 dargestellt ist.

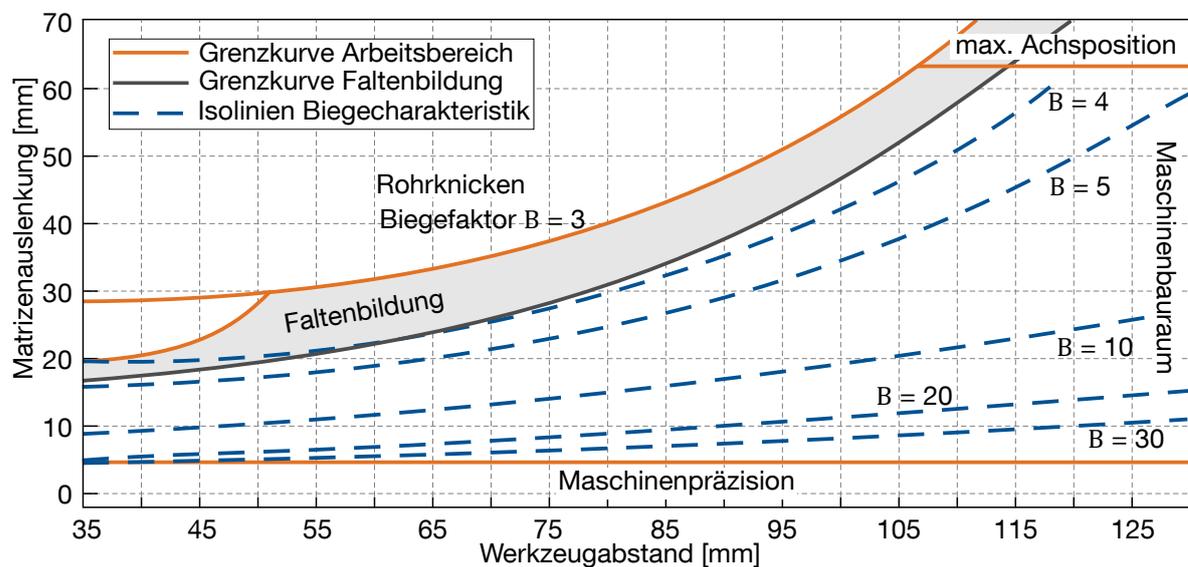


Abbildung 2.12: Arbeitsdiagramm einer Aluminiumlegierung für das Freiformbiegen mit bewegter Matrize (Beulich, 2022)

Die Ergebnisse von Beulich (2022) liefern neben eines Arbeitsbereichs für zweidimensionale Bögen und einer Beschreibung der Matrizenkinematik für dreidimensionale Bauteile auch einen

zusätzlichen Erkenntnisgewinn über die Einflüsse unterschiedlicher Prozessparameter beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize. Dabei wurde durch eine numerische Sensitivitätsanalyse insbesondere die Biegekinematik sowie die geometrischen und mechanischen Eigenschaften des Halbzeugs als Parameter identifiziert, die den größten Einfluss auf auftretende Prozessdefekte beim Freiformbiegen haben. Die durchgeführten Untersuchungen verdeutlichen die Notwendigkeit präziser Simulationsmodelle und zeigen gleichzeitig die Herausforderungen auf, die beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize auftreten. (Beulich, 2022)

2.2.2 Numerische Prozessmodellierung mittels FEM

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln erläutert liegt die Problematik von kinematischen Biegeprozessen in der iterativen Parameterfindung zur Fertigung von Bauteilen innerhalb der gewünschten Toleranz. Um diesem zeit- und ressourcenaufwändigen Trial-and-Error-Prozess etwas entgegenzusetzen, wurde sich verstärkt mit der numerischen Modellierung des Freiformbiegens und anderer Biegeverfahren auseinandergesetzt und dabei unterschiedliche Ergebnisse erzielt. Beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize wurde die Grundlage für numerische Simulationen durch die analytische Betrachtung des Biegemoments und der Reaktionskräfte von Murata und Aoki (1996) geschaffen. Durch die Verwendung eines Gleichungssystems, das eine iterative Verschiebung der neutralen Faser berechnet, wurde die Prozesskinematik prognostiziert und mit tatsächlich gebogenen Bauteilen verglichen. In einigen Bereichen des Prozessfensters konnte eine gute Übereinstimmung erzielt werden, in den meisten Bereichen traten jedoch größere Abweichungen auf, wodurch mit dem vorgestellten Modell keine Vereinfachung des iterativen Trial-and-Error-Prozesses erreicht werden konnte. Dies verdeutlicht zudem, dass die numerische Simulation das Ziel verfolgen sollte, das gesamte Prozessfenster mit konsistenten Ergebnissen abdecken zu können.

Ein erstes Simulationsmodell wurde von Gantner et al. (2004) vorgestellt, die ein Modell einer Biegemaschine mit 5 Freiheitsgraden in LS-Dyna umsetzten, welches jedoch noch größere Abweichungen zwischen real gebogenen und simulierten Bauteil aufwies. In einer weiteren Arbeit von Gantner et al. (2005) wurde das Simulationsmodell erweitert und durch eine Anpassung von Prozessparametern auch die Genauigkeit der Ergebnisse erhöht. Dabei setzten die Autoren auf eine Kombination aus vollintegrierten Schalenelementen mit fünf Integrationspunkten über die Dicke für das zu biegende Rundrohr und Starrkörpern für die virtuelle Abbildung der Aktivflächen der Werkzeuge. Darüber hinaus wird als wichtiger Parameter die Reibung zwischen Rundrohr und Werkzeugen genannt, wobei die Reibzahl auf 0,04 gesetzt wurde. Das Materialmodell der Simulationen wurde sehr vereinfacht und basierte nicht auf speziellen Prüfversuchen,

sondern wurde aus bestehenden Datenbanken entnommen. Obwohl weder in der Simulation, noch in den Biegeversuchen ein Biegedorn zum Einsatz kam, wurde eine gute Übereinstimmung zwischen realen Versuchen und Simulationsmodell gefunden. (Gantner et al., 2005)

Von Guo und Xiong (2018) wurde ebenfalls ein Simulationsmodell für das Freiformbiegen von Rundrohren aus Messing aufgebaut, mit dem Ziel, auch bei kleinen Biege Faktoren ($B < 2,5$) einen möglichst detaillierten Einblick in die Prozesswirkmechanismen zu erhalten. Hierzu wurde das Rundrohr in der numerischen Simulation mit Kontinuums-elementen vom Typ C3D8R modelliert. In den Untersuchungen zeigte sich, dass bei engen Biegungen mit kleinen Radien eine Verschiebung der spannungsfreien Faser in Richtung der Außenseite des gebogenen Rundrohrs auftritt (Guo und Xiong, 2018). Bei weiteren Testreihen und Analysen von Guo et al. (2020) wurde zudem gezeigt, dass das Füllen von Messingrohren mit unterschiedlichen Füllstoffen die Umformbarkeit beim Biegen beeinflusst. Auch hier wurden Simulationen mit unterschiedlichen Arten von Füllstoffen (Stahlkugeln, PU-Kautschuk und fester Stab mit niedrigen Schmelztemperaturen) durchgeführt und die Ergebnisse mit realen Versuchen auf einer Biegemaschine mit 5 Freiheitsgraden verglichen. Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen den numerischen und experimentellen Ergebnissen und zusätzlich dazu die Erkenntnis, dass die höchste Umformung durch feste Füllungen erreicht wird, aufgrund der guten Stützwirkung von Innen. (Guo et al., 2020)

Von Beulich et al. (2017) wurde ein Simulationsmodell für das Freiformbiegen mit 6 Freiheitsgraden von Aluminiumrohren aufgebaut, welches als Vorstufe zur vollständigen virtuellen Abbildung des Innenhochdruckumformens dient. Neben der Funktionsweise der Maschine wird auch ein Biegedorn, bestehend aus mehreren Gliedern verbunden mit einem Stahlseil modelliert (Beulich et al., 2017). Aufbauend auf den Ergebnissen wurde das Modell erweitert und der Herstellungsprozess der Rundrohre in die gesamtheitliche virtuelle Abbildung eingebunden (Beulich, Mertens et al., 2019). Mit dem erweiterten Simulationsmodell wurde anschließend eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um die relevanten Einflussgrößen beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize zu identifizieren (Beulich, Spoerer et al., 2019). Um den Detaillierungsgrad weiter zu erhöhen wurde das Simulationsmodell auch um die Schweißnaht und deren Überhöhung in Wanddickenrichtung erweitert (Beulich, 2022). Um eine Durchgängigkeit von der Simulation des Rohreinformprozesses bis hin zur Freiformbiegesimulation gewährleisten zu können, wird die Elementkantenlänge des Rohres auf 4 mm festgelegt und darüber hinaus das Rohr mittels Schalenelemente vom Typ Belytschko-Tsay mit 7 Integrationspunkten über die Blechdicke modelliert (Beulich et al., 2017). Das grundlegende Simulationsmodell des 6-Achsen-Freiformbiegeprozesses mit bewegter Matrize von Beulich et al. (2017) wird adaptiert von Werner et al. (2021) verwendet, um einen Zusammenhang zwischen Stahlrohren und dem

kinematischen Bewegungsprofil der Biegematrize herzustellen, ohne dabei eine Vielzahl von experimentellen Trial-and-Error-Bauteilen zu fertigen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich das Simulationsmodell durchaus eignet, um Ergebnisse mit kleinen Abweichungen in einem vorgegebenen Prozessfenster zu erreichen (Werner et al., 2021).

Zusammengefasst zeigt sich, dass es unterschiedliche Ansätze zur Umsetzung von numerischen Simulationen von 3-, 5- und 6-Achs-Biegemaschinen gibt, die alle das Ziel haben den iterativen und zeitaufwändigen Trial-and-Error-Prozess zur Identifizierung der Prozessparameter, zu reduzieren. Für den Einzelfall betrachtet funktioniert diese Herangehensweise gut, denn die Untersuchungen von Beulich (2022), Gantner et al. (2007) und Guo und Xiong (2018) zeigen alle eine Verbesserung durch die numerische Abbildung, jedoch ist eine Übertragbarkeit der Ergebnisse aufgrund der Vielzahl an einzustellenden Parametern nur schwer möglich. Derzeit existiert noch kein analytisches Modell, das das Umformverhalten beschreibt und eine effiziente und zuverlässige Kompensation von Biegelinien ermöglichen würde, aber es gibt verschiedene Methoden und Modelle, um die auftretenden Abweichungen im Freiformbiegeprozess zu kompensieren (Staupendahl, 2021).

2.2.3 Auslegung und Absicherung freiformgebogener Biegebauteile

Im Allgemeinen werden Biegeprozesse nach Tekkaya und Chatti (2019) von diversen Prozessparametern und deren komplexen Wechselwirkungen beeinflusst, was die Analyse, Simulation und Umsetzung der Prozesse erschwert. Dies ist einer der Hauptgründe dafür, dass einige dieser Prozesse immer noch eine geringe Automatisierung aufweisen und die Prozessparameter zur Fertigung von Biegebauteilen auf empirische Weise ermittelt werden. (Tekkaya und Chatti, 2019) Insbesondere beim Freiformbiegen können selbst minimale Veränderungen in den Werkstoffeigenschaften beträchtliche Unterschiede in den Radien zwischen zwei gebogenen Bauteilen verursachen (Kersten, 2013). Beim Freiformbiegen wird die zu erzielende Geometrie maßgeblich durch die Bewegung der Biegematrize beeinflusst. Um Bauteile mit unterschiedlichen Radien innerhalb der geforderten Toleranzen zu fertigen, werden Kalibrierkurven erzeugt, deren Ziel es ist die resultierenden Biegeradien aus experimentellen Testdaten mit der Matrizenbewegung zu korrelieren. Jedoch führen bereits geringfügige Anpassungen in der Kalibrierkurve bereits zu signifikanten Änderungen in den gebogenen Bauteilen, welche anschließend in einem zeitintensiven iterativen Trial-and-Error-Prozess kompensiert werden müssen (Scandola et al., 2023). Um dieser Herausforderung entgegenzutreten wurden im Rahmen mehrerer wissenschaftlicher Veröffentlichungen unterschiedliche Ansätze zur Auslegung und Absicherung freiformgebogener Biegebauteile und zur Kompensation auftretender Maßabweichungen vorgestellt.

Scandola et al. (2023) verfolgen das Ziel eine Strategie für die Durchführung der Kalibrierung zu ermitteln, um die Robustheit des Prozesses gegenüber Chargenschwankungen zu erhöhen und dadurch Maßabweichungen zu reduzieren. In den Untersuchungen werden unterschiedliche Interpolationsmethoden, darunter Polynominterpolation und splinebasierte Ansätze untersucht. Es zeigte sich, dass der kubisch-hermitesche Ansatz (PCHIP) nach Fritsch und Butland (1984) den besten Kompromiss zwischen der Einhaltung der Daten und Schwankungen in den Rändern des interpolierten Bereichs lieferte. Weitere Experimente verdeutlichten, dass die ursprüngliche polynomiale Interpolation stark von der Auswahl der Eingangsdaten abhängig ist, während die PCHIP-Strategie robuster ist und unabhängig davon, ob lokale oder globale Datenpunkte verwendet werden. Die Ergebnisse ermöglichen eine Reduzierung des experimentellen Aufwands bei der Kalibrierung der Freiformbiegemaschine und eröffnen zudem die Möglichkeit zur Optimierung des Prozesses in Bezug auf Wiederholgenauigkeit und Kompensation von geometrischen Abweichungen. (Scandola et al., 2023)

Einen anderen Weg wählt Beulich (2022), der durch die Entwicklung eines detaillierten FEM-Simulationsmodells, eine präzise Abbildung des Freiformbiegeprozesses erreichen konnte und auf dieser Grundlage eine modellbasierte Prozessbeschreibungen erstellt hat. Mithilfe gezielter Metamodellierung kann die Bewegung der Biegematrize nun präzise prognostiziert werden. Dadurch ist es möglich, die Prozessführung für neuartige Bauteilgeometrien zuerst zu berechnen, dann zu korrigieren und schließlich mithilfe der FEM-Simulation zu bewerten, ohne ein reales Bauteil biegen zu müssen. Zusätzlich dazu entwickelte Beulich (2022) ein Modell zur Vorhersage der Prozessfähigkeit des Freiformbiegeverfahrens durch die gezielte in-line Erfassung der Prozessparameter, was die Gewährleistung eines stabilen Produktionsprozesses in der späteren Serienproduktion ermöglicht. (Beulich, 2022)

In der Arbeit von Groth (2020) wurde ein Produktplanungssystem entwickelt, um eine präzise und funktionsgerechte Darstellung von Biegebauteilen zu ermöglichen. Die Hauptaufgabe dieses Systems besteht darin die erwartete Geometrie der Biegeteile nach dem Biegevorgang so genau wie möglich vorherzusagen. Durch die Nutzung des Prozesswissens kann frühzeitig auf eventuelle Abweichungen von der tatsächlichen Biegegeometrie hingewiesen werden und diese über Kompensations- und Korrekturmethode entsprechend den späteren Verwendungszwecken angepasst werden. Hierdurch wird die Notwendigkeit weiterer Iterationsschritte zur Anpassung sowohl der Konstruktionsdaten als auch der Maschinenparameter durch den Maschinenbediener während des Biegeprozesses reduziert und gleichzeitig werden Schwierigkeiten in Bezug auf die Abstimmung und Kompensation von Maßabweichungen minimiert. (Groth, 2020)

Eine alternative Strategie zur Kompensation von geometrischen Abweichungen wird von Ismail et al. (2023) vorgestellt, welche einen Algorithmus zur Optimierung der Reststrategie im

Rahmen einer Regelstrategie beinhaltet. Dieser Ansatz beruht auf der Erkenntnis, dass beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize gewisse bereits entstandene geometrische Fehler durch eine Überkompensation in den noch zu biegenden Bereichen ausgeglichen werden können. Grundlage für die Herangehensweise ist die Diskretisierung des zu biegenden Rohrbogens in einzelne Segmente, was bereits einen Unterschied zu den bisher dargestellten Methoden darstellt, da diese stets darauf abzielen den gesamten Rohrbogen in einem Schritt zu kompensieren. Tritt nun eine geometrische Abweichung in einem Teilsegment des Rohrbogens auf, so kann die Reststrategie für die verbleibenden zu biegenden Segmente so angepasst werden, dass die globale geometrische Form über den gesamten Rohrbogen hinweg erhalten bleibt oder die Ausbreitung der Abweichungen minimiert wird. In der vorgestellten Optimierungsstrategie können zudem verschiedene Gewichtungen definiert werden, um Abweichungen in den relevanten geometrischen Eigenschaften des Biegebauteils zu minimieren. (Ismail et al., 2023)

2.3 Systematische Messtechnik für Geometrie und mechanische Eigenschaften

Nachdem im vorangegangenen Kapitel das Freiformbiegen mit bewegter Matrize behandelt wurde, folgt nun eine Analyse des Stands der Technik auf dem Gebiet der Messtechnik verschiedener Eigenschaften. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Anwendungen im Bereich des Rohrbiegens unterschiedlicher Querschnitte und Werkstoffe, wobei in den einzelnen Unterkapiteln auch ein Vergleich der verschiedenen Messverfahren und deren Einsatzgebiete erfolgt.

2.3.1 Messtechnik für geometrische Eigenschaften

Die VDI 3431 definiert biegespezifische Merkmale, anhand derer ein gebogenes Bauteil charakterisiert werden kann. Die wichtigsten Merkmale sind der Verlauf der Biegelinie und der Verlauf der Krümmung entlang der Biegelinie. Zur Bestimmung dieser Merkmale können entweder direkte oder indirekte Messverfahren angewendet werden. Bei den direkten Messverfahren wird die Messgröße durch das Messmittel direkt mit einem Einheitsmaß verglichen, während bei der indirekten Messung die Messgröße über eine oder mehrere Hilfsgrößen bestimmt wird (J. Hoffmann, 2014). Weiterhin kann zwischen Online- und Offline-Messungen unterschieden werden. Nach Groth (2020) erfolgt bei Online-Messungen die Messdatenerfassung am Messobjekt zeitgleich zum Biegeprozess, wohingegen Offline-Messungen erst nach der Entnahme des Bauteils aus der Biegemaschine durchgeführt werden.

Es existieren bereits verschiedene Konzepte zur Messung von geometrischen Eigenschaften bei Biegen von Rohren oder Profilen bei den unterschiedlichsten Biegeverfahren. Die verständlichsten Verfahren sind Offline-Messsysteme zur Bestimmung der Geometrie des gebogenen Bauteils. Dabei können beispielsweise optische oder taktile Messsysteme eingesetzt werden. Taktile Messsysteme haben den Vorteil, dass nur sehr wenige Messpunkte zur Berechnung eines Krümmungswertes bezogen auf die Innen- oder Außenseite des gebogenen Bauteils benötigt werden und diese mit einer sehr hohen Genauigkeit gemessen werden können (Merklein et al., 2009). Für komplexe dreidimensionale Biegegeometrien sind taktile Messgeräte jedoch ungeeignet, da hierbei ein großflächiges Abtasten der Oberfläche notwendig ist (Vatter, 2015). Im Gegensatz dazu liefern optische Messsysteme eine hohe Flexibilität bei der Vermessung komplexer 2D- oder 3D-Geometrien und lassen dazu auch eine globale Auswertung der Biegegeometrie zu (Merklein et al., 2009). Im Bereich der optischen Messsysteme gibt es unterschiedlichste Ausführungen. So verwendet Vatter (2015) beispielsweise eine Messzelle in die das gebogene Bauteil eingelegt wird und anschließend von 16 fest installierten Kameras vermessen wird. Groth (2020) verwendet in seiner Arbeit einen Messarm, der sowohl als taktiles als auch als optisches Messsystem verwendet werden kann. Dabei erfolgt die Auswahl des Messverfahrens in Abhängigkeit von der experimentell gefertigten Biegegeometrie und den zu erfassenden Charakteristika (Groth, 2020).

Im Gegensatz zu den Offline-Messsystemen werden die Online-Messsysteme meist dazu genutzt den Biegeprozess zu überwachen oder gezielt zu regeln. Zum Beispiel wurde durch Ghiotti et al. (2017) ein innovatives Dornkonzept mit eingebautem Gyroskop veröffentlicht, um die Geometrie zu messen. Hierzu wird in das vorderste Dornglied ein Gyroskop eingebaut, welches während des Biegens die Winkelgeschwindigkeiten und damit die Richtungsänderungen des Dorns aufnehmen kann. Mit den aufgenommenen Daten, der Bogenlänge und der Annahme eines konstant gebogenen Bereichs kann die Krümmung des gebogenen Bauteils berechnet werden. Die Ergebnisse zeigten dabei eine relative Abweichung zu taktilen Messungen auf einer Koordinatenmessmaschine zwischen 0,71 % und 3,79 % bei Radien zwischen 587 mm und 1074 mm. (Ghiotti et al., 2017) Das entwickelte System gehört zu den indirekten Messverfahren mit Online-Messung, da der Radius nicht direkt gemessen, sondern über anderer physikalischer Messdaten berechnet wird. Das System wird auch genutzt, um Falten dynamisch am Innenbogen zu detektieren (Simonetto et al., 2017). Zusätzlich wurde das bestehende System durch das Hinzufügen eines weiteren Sensors am Rohrende erweitert. Mit den beiden Sensoren besteht nun die Möglichkeit die Rückfederung direkt im Prozess zu bestimmen und darüber hinaus auch direkt Parameter zur Nachkalibrierung des Bauteils anzupassen. Dadurch kann die Zeit für Qualitätskontrollen, Korrekturmaßnahmen und den damit verbundenen Kosten erheblich reduziert werden. (Ghiotti et al., 2021) Ein anderes System zur Prozessüberwachung und Prozessregelung

wird von Borchmann et al. (2020) verwendet, die einen Laserliniensensor als Online-Messsystem zur Erfassung von Falten während des Biegens nutzen. Die dadurch gewonnenen Messdaten werden direkt zur Kontrolle und Anpassung der Werkzeugkräfte und Achsverschiebungen auf der Grundlage von entwickelten Anpassungsvorschriften genutzt (Borchmann et al., 2020).

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass es bereits eine Vielzahl an möglichen Lösungen gibt geometrische Eigenschaften direkt oder indirekt, online oder offline beim Biegen von Rohren oder Profilen aufzunehmen. In der vorliegenden Arbeit wird zur Messung der Geometrie ein direktes optisches Offline-Messsystem verwendet, welches in Kapitel 4.3.1 detailliert beschrieben wird und auf dessen Auswertemethodik anschließend in Kapitel 5.1.1 näher eingegangen wird.

2.3.2 Messtechnik für mechanische Eigenschaften

Bei der Bestimmung mechanischer Eigenschaften werden verschiedene Prüfverfahren in Betracht gezogen. Die Wahl des Verfahrens hängt dabei von der spezifischen mechanischen Eigenschaft oder dem zu bestimmenden Kennwert ab. Die bekanntesten Verfahren sind beispielsweise der Zugversuch, der 3-Punkt-Biegeversuch oder die Härteprüfung. Dabei haben die genannten Prüfverfahren gemeinsam, dass diese in der Regel an speziell gefertigten Probengeometrien und nicht direkt am Bauteil erfolgen, wodurch zum einen eine längere Zeit zwischen der Probenentnahme und der Verwertung der Prüfergebnisse liegt und zum anderen diese Prüfungen meist nur stichprobenartig durchgeführt werden können. Daneben gibt es auch Verfahren, die es ermöglichen in kurzer Zeit große Stückzahlen an produzierten Bauteilen zu prüfen, ohne diese zu zerstören. Zu den zerstörungsfreien Prüfverfahren zur Bestimmung mechanischer Eigenschaften gehören unter anderem die Wirbelstromprüfung, das mikromagnetische Barkhausenrauschen-Verfahren sowie die mikromagnetische Multiparameter-, Mikrostruktur- und Spannungsanalyse (3MA-Verfahren). (Seidel, 2020)

Wirbelstromsensoren sind hochentwickelte Geräte, die in der Materialprüfung eingesetzt werden, um mechanische Eigenschaften von allen leitfähigen Materialien zerstörungsfrei zu bestimmen (Zösch und Seidel, 2020). Diese Sensoren basieren auf dem Prinzip der Wirbelstrominduktion, bei dem elektromagnetische Wechselfelder erzeugt werden, die in das zu untersuchende Material eindringen. Die Wechselwirkung zwischen den induzierten Wirbelströmen und dem Material ermöglicht die Erfassung charakteristischer Signale, die wiederum Rückschlüsse auf verschiedene mechanische Eigenschaften zulassen. (Yashan, 2005) Die Anwendungsbereiche von Wirbelstromsensoren sind vielfältig und umfassen die Qualitätskontrolle in der Metallverarbeitung, die Fertigungsüberwachung, die Schadenserkenkung, die Fehleranalyse und die

Lebensdauerbewertung von Bauteilen. Breite Anwendung finden die Wirbelstromsensoren im Bereich der Risserkennung oder zur allgemeinen Prüfung von Inhomogenitäten. Zusätzlich dazu eignet sich das Wirbelstromverfahren auch zur Temperaturmessung, da die Leitfähigkeit und magnetische Permeabilität bei den meisten Materialien temperaturabhängige Funktionen sind. (Andreeva, 2008) Die Effektivität von Wirbelstromsensoren kann durch die Oberflächenqualität oder die Form und Geometrie der zu prüfenden Probe beeinflusst werden, wodurch die Ergebnisse an Qualität verlieren können. Da die Wirbelströme zudem nicht sehr tief in den Werkstoff eindringen, sind die Wirbelstromsensoren eher für die Untersuchung von Oberflächeneigenschaften geeignet und werden oftmals zur Detektion von Schleifbrand verwendet. (Zösch und Seidel, 2020)

Im Gegensatz zum Wirbelstromverfahren interagiert beim Prüfverfahren mittels Barkhausenrauschen (BHN) ein äußeres magnetisches Feld mit dem zu prüfenden Werkstoff, wodurch das Verfahren auf ferromagnetische Werkstoffe begrenzt ist (Barteldes et al., 2019). BHN-Messgeräte verwenden eine Sonde, die sowohl ein Magnetisierungsjoch als auch einen BHN-Aufnahmespulen-Sensor umfasst. Wird die Sonde nun an die Oberfläche der zu untersuchenden Probe herangeführt, erzeugt das Magnetisierungsjoch ein wechselndes Magnetfeld im Material, welches durch die Aufnehmerspule in ein ablesbares Spannungssignal umgewandelt wird. (Avila et al., 2019) In erster Linie wird das BHN als Hilfsmittel zur Prozessüberwachung und Qualitätskontrolle eingesetzt, da es sehr sensitiv in Bezug auf Änderungen in der Mikrostruktur oder dem vorliegenden Spannungszustand ist (Santa-aho et al., 2019). Von Shimosaka et al. (2021) wurde beispielsweise untersucht, wie mit dem BHN die Oberflächengüte bei der zerspanenden Bearbeitung von gehärteten Stahl (AISI 4041) analysiert werden kann und aus dem Messsignal Änderungen der Eigenspannungen abgeleitet werden können. Hierzu wurden die Eigenspannungen mit XRD-Messungen bestimmt und anschließend das BHN-Signal für unterschiedliche Proben mit den Messergebnissen verglichen. Es zeigte sich, dass der BHN-Energiewert aufgetragen über die Frequenz in guter Übereinstimmung mit den gemessenen Eigenspannungen aufgetragen über die Messtiefe ist. (Shimosaka et al., 2021) In weiteren Untersuchungen stellte Krause et al. (2021) das Messpotential des BHNs vor und befasste sich mit der Möglichkeit, eine Temperaturerhöhung eindeutig von der Mikrostrukturänderung bei der Wärmebehandlung von Wellen aus Cf53 durch das BHN-Signal zu unterscheiden. Zur Analyse wurde ein Fouriertransformiertes Signal des BHNs verwendet, welches als dreidimensionale Landschaft mit den Achsen Zeit, Frequenz und Amplitude dargestellt werden kann. Zudem wurden in der Arbeit von Krause et al. (2021) relative Änderungen des Signals analysiert und keine absoluten Messungen durchgeführt. In den Ergebnissen wird gezeigt, dass eine mikrostrukturelle Veränderung durch ein erneutes Anlassen mit dem BHN deutlich erkannt und gemessen werden kann. Über die Höhe der absoluten Temperatur an der Messstelle konnte mit den Messergebnissen kein eindeutiger

Zusammenhang hergestellt werden. Darüber hinaus wurden Härtemessungen an unterschiedlichen Stellen durchgeführt, die wiederum eine gute Korrelation mit dem BHN lieferten. (Krause et al., 2021) Dieser Zusammenhang wurde anschließend genutzt, um über maschinelle Lernverfahren die Oberflächenhärte basierend auf dem BHN-Signal zu bestimmen (Krause et al., 2022). Hierzu wurden randschichtgehärtete Bauteile mit unterschiedlichen Anlassgraden analysiert und anschließend KI-Modelle mit den Ergebnissen gefüttert, um Vorhersagewerte für die Oberflächenhärte zu generieren. Dabei ergibt sich, dass die BHN-Messungen kombiniert mit KI-Methoden geeignet sind um bei ferromagnetischen Werkstoffen die Oberflächenhärte zu bestimmen. Die Autoren stellen ebenfalls in Aussicht, dass der Zusammenhang zwischen dem BHN-Signal und anderen mechanischen Eigenschaften wie beispielsweise die Eigenspannungen durchaus möglich ist und dementsprechende charakteristische Merkmale aus dem Signalverlauf extrahiert werden können. (Krause et al., 2022) In den bereits vorgestellten Untersuchungen wurde stets eine energieäquivalente Hilfsgröße zur Analyse bestimmt, die der Summe der Amplituden in einem festgelegten Zeit-Frequenz-Intervall entspricht (Krause et al., 2021). Darüber hinaus gibt es aber noch andere Analysemethoden des BHN zur Bestimmung mechanischer Eigenschaften, wie beispielsweise die Analyse der mittleren quadratischen Abweichung (Schuster et al., 2018) oder des reziproken Werts der Maximalamplitude des BHN (Mierczak et al., 2011). Es zeigt sich aber auch, dass eine Vergleichbarkeit gemessener Werte von unterschiedlichen Forschungsgruppen aufgrund von diversen Parametereinflüssen auf das BHN-Signal und der verschiedensten Messparameter nur schwer möglich ist (Krause et al., 2021; Santa-aho et al., 2019). Demzufolge ist es auch herausfordernd aus dem BHN-Signal die notwendigen Informationen zu extrahieren, die zur exakten Bestimmung der mechanischen Eigenschaften notwendig sind, wenn der Sensor nicht durch ausreichende Untersuchungen auf das zu messende Material abgestimmt wurde. Insbesondere die Studie von Krause et al. (2022) zeigt, dass das BHN-Signal ein hohes Potenzial hat, um mit verschiedenen mechanischen Kennwerten in Zusammenhang gebracht zu werden. Die Analyse des Eigenspannungszustandes oder einer relativen Veränderung des BHN-Signals aufgrund eines veränderten Eigenspannungszustandes ist somit durchaus möglich (Krause et al., 2022).

Neben dem Wirbelstromverfahren und dem BHN-Verfahren ist als weiteres elektromagnetisches Prüfverfahren das 3MA-Verfahren zu nennen. Das 3MA-Verfahren kombiniert vier elektromagnetische Prüfverfahren, um aus den Messdaten Näherungswerte für mechanische Werkstoffeigenschaften und Eigenspannungen ferromagnetischer Werkstoffe abzuleiten. Dabei werden neben der Wirbelstromanalyse und dem BHN auch die Oberwellenanalyse im Zeitsignal der magnetischen Tangentialfeldstärke und die Analyse der Wirbelstrom-Überlagerungspermeabilität analysiert und so ca. 40 Kenngrößen ermittelt, die den geprüften Werkstoff mikromagnetisch charakterisieren. (Szielasko et al., 2014)

Mit dem 3MA-Verfahren wurden mittlerweile vielfältige Anwendungsgebiete für diverse Bauteile aus ferromagnetischen Werkstoffen erschlossen, wobei insbesondere Korrelationen zu Veränderungen der mechanischen Eigenschaften, insbesondere der Eigenspannungen oder des Gefüges, hergestellt werden konnten (Wolter et al., 2019). Eine frühe Anwendung des 3MA-Verfahrens war die zerstörungsfreie Bestimmung der Härte- und Eigenspannungsverteilung im oberflächennahen Bereich von geschweißten Bauteilen (Theiner und Deimel, 1987). In späteren Anwendungen wurde das 3MA-Verfahren zur Bestimmung von Härte und Eigenspannungen in wärmebehandelten Bauteilen wie z. B. Turbinenschaufeln eingesetzt (Dobmann et al., 1989). Aufgrund der verschiedenen integrierten Prüfverfahren ist das 3MA-Verfahren sehr aufwändig zu kalibrieren, um quantitative Messergebnisse zu erhalten (Zösch und Seidel, 2020). Aktuelle Forschungsaktivitäten im Bereich der Produktionstechnik beschäftigen sich mit der Implementierung des 3MA-Verfahrens in eigenschaftsbasierte Regelungssysteme, wie z. B. die Arbeiten von Riepold et al. (2021) und Rozo Vasquez et al. (2023) zeigen.

Zusammenfassend kann nach dem Stand der Technik festgestellt werden, dass die genannten zerstörungsfreien elektromagnetischen Prüfverfahren (Wirbelstrom, BHN und 3MA) sowohl als in-situ-Verfahren als auch als nachgeschaltete Messmethoden durchaus das Potenzial haben, Veränderungen der mechanischen Eigenschaften zu ermitteln. Allen vorgestellten elektromagnetischen Prüfverfahren ist gemeinsam, dass sie zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften kalibriert werden müssen. Dabei kommen Kalibrieransätze zum Einsatz, die auf Regressions- und Mustererkennungsverfahren basieren. Mit Hilfe dieser Methoden wird aus zerstörungsfrei aufgenommenen Prüfgrößenwerten der Wert der zu korrelierenden mechanischen Eigenschaften ermittelt. (Tschuncky, 2011) In dieser Arbeit wird speziell das BHN als Indikator für die Änderung der mechanischen Eigenschaften untersucht, wobei eine detaillierte Beschreibung des verwendeten BHN-Sensorsystems sowie die physikalischen Grundlagen des Messprinzips in Kapitel 4.3.3 ausführlich erläutert werden.

2.4 Fazit aus dem Stand der Technik

In den vorangegangenen Abschnitten wurden neben den Grundlagen auch der aktuelle Stand der Technik zum Freiformbiegen mit bewegter Matrize und ähnlichen Biegeverfahren dargestellt. Dabei wurden neben der Prozessbeschreibung und den bereits vorhandenen Simulationsmodellen auch aktuelle Messverfahren für geometrische und mechanische Eigenschaften erläutert und wissenschaftlich erfasst. Insgesamt lässt sich feststellen, dass das Freiformbiegen mit bewegter Matrize im Vergleich zu anderen Biegeverfahren deutlich weniger industrielle Anwendung findet, da die Potenziale noch nicht ausreichend erforscht und die Nachteile noch zu gravierend sind. Insbesondere der hohe Zeit- und Ressourcenaufwand zur Herstellung eines Bauteils innerhalb der geforderten Toleranzen und der große Einfluss von Störgrößen, wie z. B. Schwankungen der geometrischen und mechanischen Eigenschaften des Halbzeugs, führen zur Ablehnung des Verfahrens in der Industrie. Darüber hinaus zeigt der Stand der Technik beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize deutlich, dass der Fokus der aktuellen Forschung auf der Prozessüberwachung und der Kontrolle der geometrischen Eigenschaften liegt. Der Forschungsschwerpunkt dieser Dissertation zielt daher darauf ab, neben den geometrischen Eigenschaften auch die mechanischen Eigenschaften beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize zu messen, diese entkoppelt von den geometrischen Eigenschaften zu beeinflussen und darüber hinaus einen positiven Einfluss der Entkopplung nachzuweisen. Hierzu konnte im Stand der Technik bereits gezeigt werden, dass eine Korrelation zwischen Änderungen der mechanischen Eigenschaften und dem Signal des magnetischen BHN-Verfahrens möglich ist, wobei detaillierte Untersuchungen zum Einsatz des Verfahrens an freiformgebogenen Rundrohren noch ausstehen. Durch den Einsatz des BHN-Verfahrens beim Freiformbiegen und der damit verbundenen Bestimmung der mechanischen Eigenschaften kann zum einen das Verständnis über die vorliegenden Bauteileigenschaften nach dem Biegeprozess verbessert werden und zum anderen können nachgelagerte Prozesse an die Eigenschaften des gebogenen Bauteils angepasst werden. Darüber hinaus soll durch die Vertiefung der Ursache-Wirkungsketten das Prozessverständnis erweitert und das Potenzial des Freiformbiegens genutzt werden, um flexibel auf Schwankungen der Halbzeugeigenschaften reagieren zu können.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Nach einer umfassenden Analyse des Stands der Technik und der Erkenntnis, dass das Freiformbiegen mit bewegter Matrize trotz vielversprechender Ansätze im Vergleich zum Rotationszugbiegen bisher eine untergeordnete Rolle spielt, verfolgt die vorliegende Dissertation das Ziel, das enorme Potenzial des Freiformbiegens weiter zu erschließen. Dabei sollen durch die Erforschung und Entwicklung neuer Ansätze und Lösungen die Grundlagen geschaffen werden, um den zukunftssträchtigen Megatrends in der Industrie gerecht zu werden.

Das Freiformbiegen mit bewegter Matrize ist aufgrund der unzureichenden Kenntnis über die mechanischen Eigenschaften vor und nach dem Biegen sowie des inkrementellen Prozessablaufs sehr anfällig gegenüber Chargenschwankungen in den geometrischen und mechanischen Eigenschaften der Halbzeuge. Die bisherige Forschung und Entwicklung hat sich vorrangig darauf konzentriert, die geometrischen Abweichungen zu kompensieren und Biegeteile innerhalb der geforderten Toleranzen herzustellen. Die mechanischen Eigenschaften wurden dabei oft vernachlässigt oder erst in nachgelagerten Prozessen untersucht. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wird in der vorliegenden Dissertation die zentrale Forschungsfrage behandelt, ob das Freiformbiegen mit bewegter Matrize ein geeignetes Verfahren ist, um die mechanischen Eigenschaften von den geometrischen Eigenschaften zu entkoppeln und Bauteile mit anforderungsgerechten und gewünschten Eigenschaften biegen zu können.

Um diese Forschungsfrage zu beantworten, werden folgende wissenschaftliche Hypothesen aufgestellt, die im weiteren Verlauf der Dissertation bestätigt werden sollen:

- Die mikromagnetische BHN-Messung sowie die UCI-Härteprüfung sind geeignete Messverfahren, um Veränderungen der mechanischen Eigenschaften von freiformgebogenen Rundrohren aus Stahl, insbesondere hinsichtlich Eigenspannungen und Härte, zu bestimmen.
- Durch die Erweiterung der Freiheitsgrade der Freiformbiegeanlage können prozessrelevante Stellgrößen identifiziert werden, die eine Entkopplung der Eigenspannungen von der Geometrie ermöglichen, um den Eigenspannungszustand unter Beibehaltung der Zielgeometrie anforderungsgerecht einstellen zu können.
- Durch die Entkopplung von Geometrie und Eigenspannungen beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize können Bauteile mit angepassten Eigenschaften hergestellt werden,

wobei die Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften messbar und experimentell nachweisbar sind.

Ziel der Dissertation ist es, die Effizienz und Qualität des Freiformbiegens durch eine erweiterte Nutzung der Freiheitsgrade zu steigern und damit die industrielle Relevanz des Verfahrens zu erhöhen. Das eigenschaftsflexible Freiformbiegen soll die Möglichkeit schaffen, trotz schwankender Halbzeugeigenschaften eine gleichbleibende Bauteilqualität zu erzielen und den Ausschuss zu reduzieren.

Die detaillierte Beschreibung der Messsysteme, der physikalischen Messprinzipien und der verwendeten Halbzeuge bildet die Basis für die Untersuchung der Forschungshypothesen. Die mechanischen Kennwerte der verwendeten Halbzeuge werden anhand von Prüfversuchen ermittelt und zusammen mit den Ergebnissen der Prozesscharakterisierung zur Erstellung eines FEM-Simulationsmodells des Freiformbiegeprozesses mit bewegter Matrize verwendet. Im Zuge der Erstellung des numerischen Modells werden reale Biegeversuche durchgeführt, um die Simulationsergebnisse zu validieren. Dadurch kann das numerische Modell im weiteren Verlauf als virtuelles Labor genutzt werden. Neben der klassischen Materialcharakterisierung zur Ermittlung der mechanischen Kennwerte ist ein zentraler Baustein die Bestimmung der geometrischen und mechanischen Eigenschaften mit den zur Verfügung stehenden Messsystemen. Dabei werden als geometrische Eigenschaften die charakteristischen Merkmale eines zweidimensionalen Biegebauteils untersucht. Bei den mechanischen Eigenschaften stehen vor allem die Eigenspannungen und deren Veränderung durch den Freiformbiegeprozess im Fokus, da diese das Potenzial bieten, Eigenschaftsverbesserungen zu erzielen (Volk et al., 2021). Neben den Eigenspannungen wird die lokale Festigkeit durch Härtemessungen an den freiformgebogenen Bauteilen analysiert. Im Rahmen der Eigenschaftsbestimmung wird die Forschungshypothese beantwortet, ob sich die mikromagnetische BHN-Messung und die UCI-Härteprüfung als Messverfahren zur Bestimmung der gewünschten Eigenschaften an freiformgebogenen Bauteilen eignen.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird auf Basis des validierten Simulationsmodells eine Sensitivitätsanalyse der prozessrelevanten Stell- und Störgrößen durchgeführt. Dabei werden unterschiedliche Prozessfreiheitsgrade und Halbzeugschwankungen auf die definierten geometrischen und mechanischen Eigenschaften untersucht. Parallel zu den numerischen Simulationen werden experimentelle Biegeversuche durchgeführt, um den Einfluss der identifizierten Stell- und Störgrößen auch an real gebogenen Bauteilen zu analysieren und zu quantifizieren. Um die aus der Sensitivitätsanalyse gewonnenen Erkenntnisse positiv zu nutzen und deren Auswirkungen auf freiformgebogene Bauteile nachzuweisen, werden verschiedene Prüfversuche an den gefertigten Bauteilen durchgeführt. In den Versuchen wird zum einen die Rückfederung und zum anderen

die Belastbarkeit der Bauteile untersucht. Die Ergebnisse sollen zeigen, dass sich das eigenschaftsflexible Freiformbiegen positiv auswirkt und somit Bauteile mit anforderungsgerechten Eigenschaften hergestellt werden können. Diese Untersuchungen bilden den letzten Baustein, um die Forschungshypothesen zu bestätigen und die zentrale Forschungsfrage vollständig zu beantworten. Den Abschluss der Dissertation bildet eine gesamtheitliche Zusammenfassung der erarbeiteten Forschungsergebnisse und liefert darüber hinaus potentielle Einsatzgebiete des eigenschaftsflexiblen Freiformbiegens sowie einen Ausblick in die Zukunft des Freiformbiegens mit bewegter Matrize. Zum besseren Verständnis ist die gesamte Vorgehensweise der vorliegenden Dissertation in Abbildung 3.1 grafisch dargestellt.

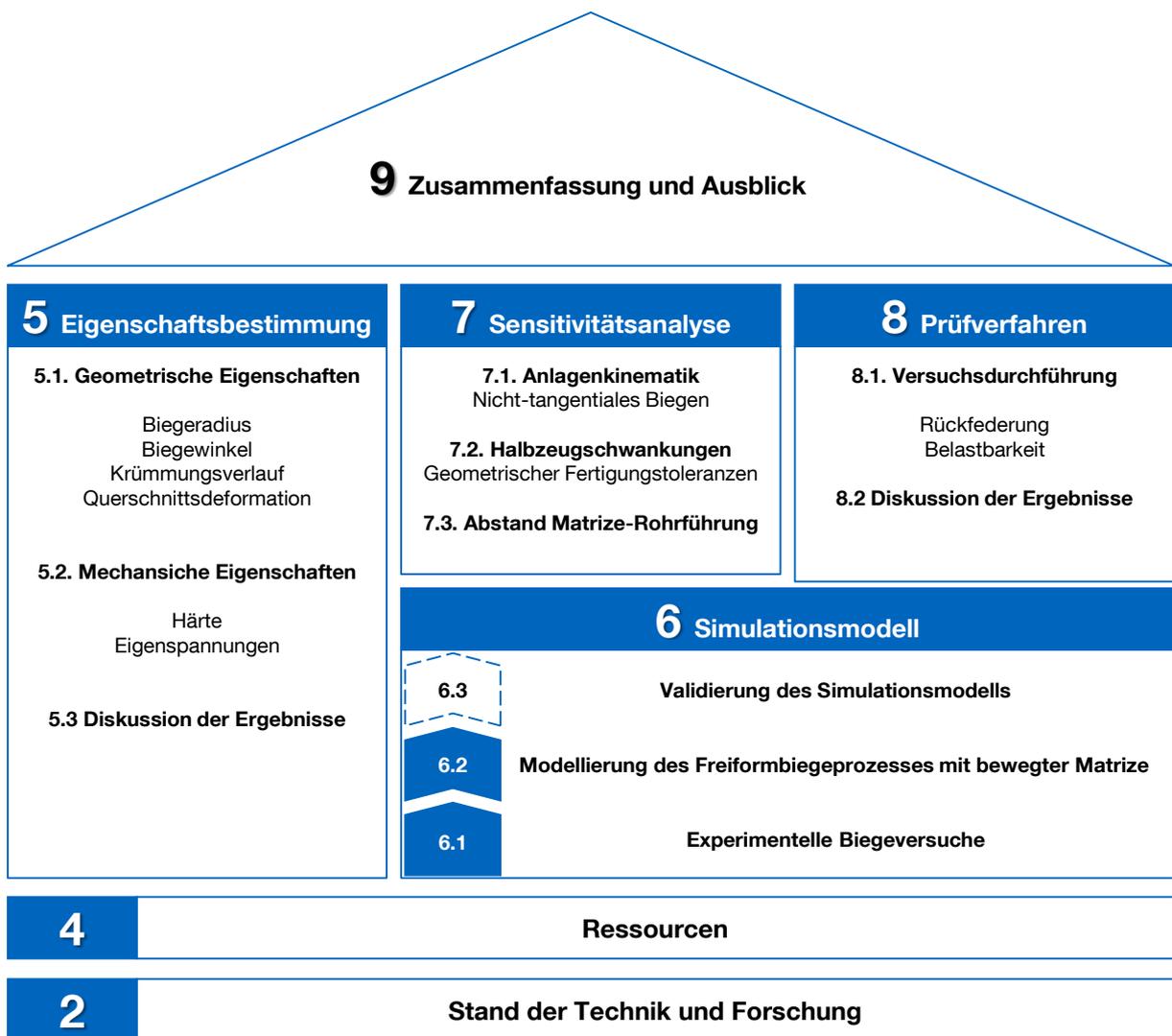


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Vorgehensweise in dieser Arbeit

4 Ressourcen

Im folgenden Kapitel werden die notwendigen Ressourcen, die in dieser Arbeit verwendet wurden vorgestellt. Zunächst wird die Freiformbiegemaschine mit den zugehörigen Werkzeugen und den möglichen Stellgrößen beschrieben. Anschließend werden die verwendeten Halbzeuge mit ihren charakteristischen Materialkennwerten näher erläutert. Den Abschluss des Kapitels bilden die verwendeten Messsysteme und Sensoren zur Bestimmung der ausgewählten geometrischen und mechanischen Eigenschaften.

4.1 Freiformbiegeanlage mit bewegter Matrize

Für die Untersuchungen in dieser Arbeit wird eine Freiformbiegeanlage mit beweglicher Matrize der Firma Jörg Neu GmbH verwendet. Die verwendete Anlage hat die Typenbezeichnung NSB090-S und zeichnet sich durch eine vollsynchronen Steuerung 6 kinematischer Achsen aus. Die Anlage befindet sich am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der TUM. Bei diesem Biegeverfahren wird die Maschine mit dem zu biegende Halbzeug von vorne beladen und anschließend kontinuierlich mittels einer Vorschubeinheit durch eine fixierte Rohrführung und eine bewegliche Biegematrize gedrückt. Das Halbzeug wird dann entsprechend der Positionierung der Biegematrize zu einem zweidimensionalen oder dreidimensionalen Werkstück gebogen. Damit das Halbzeug nicht ausknicken kann, wird es im hinteren Bereich durch zwei L-förmige POM-Elemente in Position gehalten. Um eine vorgegebene Kinematik abfahren zu können, werden sowohl die bewegliche Biegematrize als auch die Vorschubeinheit über eine CNC-Steuerung angesteuert. Neben Rundrohren können auch unterschiedliche symmetrische oder asymmetrische Querschnitte auf der Anlage gebogen werden. Die Maschine ist laut Datenblatt für Durchmesser von 6 – 90 mm ausgelegt, verfügt über eine Nutzlänge von 4000 mm und kann Biegebauteile mit einer Geschwindigkeit von bis zu 200 mm/s produzieren (Jörg Neu GmbH, 2020). In Abbildung 4.1 ist die Freiformbiegeanlage mit den notwendigen Werkzeugen und den 6 Maschinenachsen abgebildet.

Die Maschinenachsen werden in 3 translatorische und 3 rotatorische Freiheitsgrade aufgeteilt, wodurch die Maschine entlang aller zur Verfügung stehenden Achsen sowohl verfahren als auch rotieren kann. Wie der Abbildung 4.1 zu entnehmen ist, erfolgt der Vorschub des Rohres entlang der z-Achse. Die Vorschubeinheit sitzt auf einer Spindel, die von 2 Synchronmotoren

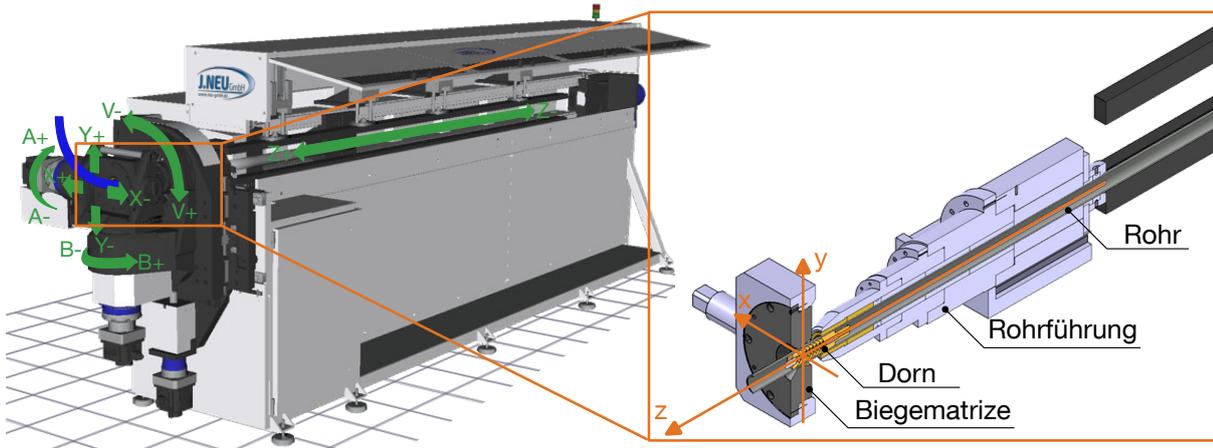


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der Freiformbiegeanlage mit beweglicher Matrize

angetrieben wird. Für die Bewegung der Biegematrize im Raum sorgen die restlichen 5 Maschinenachsen, wobei für jede Achse ein Stellmotor zur Verfügung steht. Eine Besonderheit der 6-achsigen Freiformbiegemaschine ist die Möglichkeit, den gesamten Biegekopf, bestehend aus der Biegematrize und den vorderen Servomotoren, auch während des Biegeprozesses um die z-Achse zu drehen. Bei Rundrohren ermöglicht diese Drehung eine bessere Ausnutzung des vorhandenen Freiraums um die Maschine, wodurch die Kollisionsmöglichkeiten zwischen Biegeteil und Maschine verringert und die Machbarkeit komplexer dreidimensionaler Bauteile erhöht werden kann. Bei nicht kreisförmigen Querschnitten kann die Torsion um die z-Achse außerdem ein wichtiges Hilfsmittel zur Kompensation von Maßabweichungen sein. Die restlichen 4 Freiheitsgrade der Maschine (Translation in x- und y-Richtung sowie Rotation um die x- und y-Achse) sorgen für die genau Positionierung der Biegematrize im Raum. Jede beliebige Position der Biegematrize kann dabei aus einer Kombination der Translation und Rotation um die beiden Achsen dargestellt werden. Wird z. B. in der yz-Ebene gebogen, so wird die Matrizenposition durch eine positive oder negative Translation entlang der y-Achse und eine Rotation um die x-Achse beschrieben. Wird um eine Ebene gebogen, die zur yz-Ebene um 45° geneigt ist, wird die Matrizenposition durch eine Kombination aus Translation entlang der x-Achse und der y-Achse und Rotation um beide Achsen ausgedrückt. Die Bewegungsfreiheit der Matrize ist zum einen durch Eigenkollisionen und zum anderen durch konstruktive Maßnahmen begrenzt, z. B. ist die maximale Auslenkung der Matrize sowohl für die x-Achse als auch für die y-Achse auf 50 mm begrenzt. Zusätzlich zu den bereits genannten Freiheitsgraden verfügt die Freiformbiegeanlage über einen Servomotor zur Positionierung des Dorns entlang der z-Achse. Im Auslieferungszustand der Maschine kann die Position nur zu Beginn des Biegevorganges eingestellt werden und bleibt während des gesamten Biegevorganges konstant. Um ein Ausknicken des Halbzeugs während des Vorschubs zu verhindern, wird das Rohr im Bereich vor der

festen Rohrführung durch mehrere L-förmige Niederhalterelemente in Position gehalten. Der gesamte Niederhalter besteht aus einem beweglichen Oberteil und einem feststehenden Unterteil und wird jeweils zu Beginn des Biegevorgangs automatisch geschlossen. Um die Reibung zwischen Werkzeug und Halbzeug zu reduzieren, kann über die Bedienoberfläche eine automatische Schmierung eingestellt werden. Dabei wird zwischen Werkzeugschmierung und Dornschmierung unterschieden. Die Höhe der Schmierung wird über die Leistung der Schmierpumpen im Bereich von 0 – 9 V eingestellt. In der Bedienoberfläche können neben der Schmierung weitere Parameter wie z. B. die Vorschubgeschwindigkeit, die Startposition oder die Anfahr- bzw. Rückfahrgeschwindigkeit der Biegematrize eingestellt werden. Auch die Biegelinie wird über die Bedienoberfläche eingegeben. Jedes Bauteil hat seine eigene charakteristische Biegelinie, die in der Regel dem Verlauf des Schwerpunktes des gewählten Profilquerschnittes entlang der Länge des Biegeteils entspricht. Im Gegensatz zur Biegetabelle nach VDI 3430, die eine radienunabhängige Biegetabelle empfiehlt, wird bei der Freiformbiegeanlage eine radienabhängige Beschreibung der Biegetabelle verwendet. Dabei besteht jede Biegelinie aus einer beliebigen, zulässigen Kombination von Biegeradius, Biegewinkel und Biegerichtung (bzw. Biegeebene). In der Standardkonfiguration der Anlage müssen die einzelnen Zeilen vom Maschinenbediener manuell eingegeben werden. Um diesen Aufwand zu reduzieren, hat Scandola et al., 2022 ein System entwickelt, mit dem aus parametrisierten CAD-Daten automatisch Biegeprogramme erzeugt werden können und umgekehrt. Dadurch entfällt die manuelle Eingabe der einzelnen Biegeschritte der Biegelinie durch den Maschinenbediener, was den Eingabeaufwand erheblich reduziert und somit den Prozess effizienter macht.

Betrachtet man die notwendigen Werkzeuge für das Freiformbiegen mit bewegter Matrize sind drei wichtige Komponenten zu nennen: die Biegematrize, die statische Rohrführung und der Biegedorn. Die Biegematrize ist auf dem beweglichen Biegekopf der Maschine befestigt und besitzt eine der Außenkontur des jeweiligen Rohr- oder Profilquerschnitts angepasste Kontur. Die Rohrführung besteht aus einer Konstruktion mehrerer Flansche, die formschlüssig miteinander verbunden sind. Im Inneren befinden sich speziell gefertigte Führungsschienen, die ebenfalls für den jeweiligen Rohr- oder Profilquerschnitt angepasst sind. Bei dem Biegedorn können unterschiedliche Ausführungen und Konstruktionen gewählt werden. Dabei kann beispielsweise zwischen einem Gliederdorn mit einzelnen Kugelsegmenten oder einem Löffeldorn unterschieden werden (Engel et al., 2008). Beim Gliederdorn kann weiter nach dem Abstand und der konstruktiven Ausführung der einzelnen Segmente unterschieden werden. Grundsätzlich dient der Dorn zur Innenabstützung des Rohres beim Biegen, um Falten und Wellenbildung zu reduzieren bzw. zu vermeiden. Die genannten Aktivelemente sind in Abbildung 4.2 im Schnitt dargestellt und ihre wichtigsten Parameter werden im Folgenden näher beschrieben.

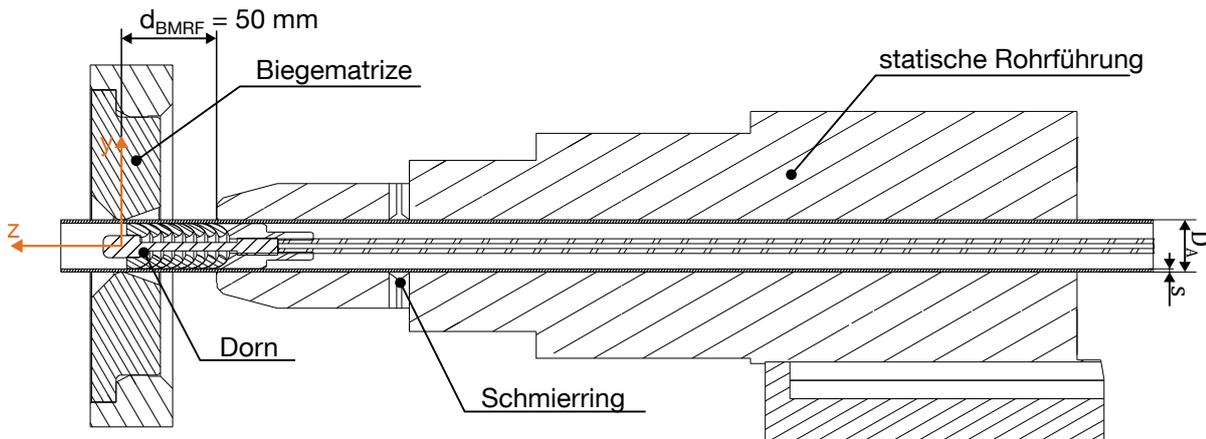


Abbildung 4.2: Biegewerkzeuge im verbauten Zustand

Der Innendurchmesser der Rohrleitung entspricht dem Außendurchmesser des verwendeten Rohres zuzüglich einer Toleranz, welche auf die entsprechende Fertigungstoleranz der verwendeten Rohre angepasst wird. Der Auslauf der statischen Rohrleitung ist nicht scharfkantig, sondern abgerundet, wodurch der Beginn der Biegung etwas in die Rohrleitung verlagert wird, aber eine bessere Formgebung bzw. Qualität der Biegung ermöglicht wird. Wie bei der Rohrleitung entspricht auch der Innendurchmesser der Biegematrize dem Außendurchmesser des verwendeten Rohres zuzüglich einer Toleranz. Die Toleranz ist dabei abhängig von den verwendeten Halbzeugen und der geforderten Toleranz des zu biegenden Bauteils. Da die Biegewerkzeuge direkt vom Maschinenhersteller gefertigt und geliefert werden, entsprechen sowohl der Ein- und Auslaufwinkel als auch die Toleranzen der Rohrleitung und der Matrize einem vorgegebenen Standardwert. In der vorliegenden Arbeit wurde ein Gliederdorn mit kugelförmigen Halbschalenelementen verwendet. Der Biegedorn besteht aus einem festen Dornsegment, das am hinteren Ende der Maschine über die sogenannte Dornstange befestigt ist. An diesem Ende befindet sich ein Stellmotor, der es ermöglicht, den Dorn in z-Richtung zu bewegen und auf einen definierten Wert zu fixieren. Die einzelnen flexiblen Dornsegmente sind über ein Stahlseil mit dem festen Dornsegment verbunden und können sich so entsprechend ihrer Kugelschalenform und der Verformung des Rohres bewegen. Die Anzahl und der Abstand der flexiblen Dornsegmente ist frei wählbar. Für die Versuche in dieser Arbeit wurde ein Dorn mit 8 beweglichen Segmenten gewählt. Die Kugelschalen haben einen Außendurchmesser von 37 mm und sind in einem Abstand von 10 mm zueinander montiert. Zusätzlich wird sowohl das Rohr über den eingebauten Schmierring als auch der Dorn über einen Schmieranschluss am Ende der Dornstange mit Schmiermittel versorgt. Zur Reduzierung der Reibung zwischen den Führungselementen der statischen Rohrleitung und der Rohraußenseite sowie zwischen der Rohrinneenseite und dem Biegedorn wird ein Schmierstoff auf Ölbasis eingesetzt. Der Einfluss

weiterer Werkzeugparameter auf das Biegeergebnis wurde in der Arbeit von Beulich (2022) durch Simulationen und Experimente detailliert untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem die Kinematik der Biegematrize und der Abstand zwischen Biegematrize und statischer Rohrführung einen entscheidenden Einfluss auf das Biegeergebnis haben, weshalb sowohl die Biegekinematik als auch die Variation des Abstandes d_{BMRF} einen zentralen Punkt in dieser Dissertation einnehmen.

Gegenüber der standardisierten Freiformbiegeanlage vom Typ NSB090 weist die Maschine des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der TUM einige Modernisierungen und Besonderheiten auf. So wurde die standardmäßige NC-Steuerung durch eine modernere Steuerung von Mitsubishi Electric Europe B.V. ersetzt, alle Servomotoren modernisiert und eine Data Acquisition Unit (DAU) installiert. Die DAU dient dazu, die Positionen der Stellantriebe in Echtzeit zu erfassen und auszuwerten. Der Umbau der Anlagenkomponenten ermöglicht unter anderem den direkten Eingriff in die Anlagensteuerung und schafft die Möglichkeit, weitere Prozessparameter und Sensoren direkt in die bestehende Anlagenstruktur zu integrieren. Durch die Modernisierung wurden zusätzliche Freiheitsgrade an der Anlage gewonnen, wie z. B. die Anpassung der Dornposition während des Biegens oder die direkte Einstellung der Auslenkung und Rotation der Biegematrize. Diese Anpassungen an der Freiformbiegeanlage dienen als Grundlage für die Ergebnisse dieser Arbeit, wobei die Details in Kapitel 7 näher erläutert werden.

4.2 Halbzeuge

In diesem Kapitel werden die wichtigsten metallografischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften des untersuchten Halbzeugs zusammengefasst. Es handelt sich dabei um ein längsnahtgeschweißtes Rundrohr aus dem Stahlwerkstoff P235TR1. Dieser Werkstoff gehört zur Gruppe der unlegierten Baustähle und wird vorwiegend für konstruktive Anwendungen im Stahl-, Maschinen- und Anlagenbau eingesetzt (Langenberg und Dahl, 2001). Die technischen Lieferbedingungen für elektrisch geschweißte und unterpulvergeschweißte Rohre mit kreisförmigem Querschnitt aus unlegiertem Stahl mit festgelegten Eigenschaften bei Raumtemperatur in den Güten TR1 und TR2 sind in der DIN EN 10217-1:2019 festgelegt. In der Norm ist auch festgelegt, dass Rohre mit dem Großbuchstaben P für Druckbeanspruchung ausgelegt sind und die Güte TR1 ohne definierten Aluminiumgehalt und ohne feste Werte für die Kerbschlagarbeit steht. Aufgrund der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten, der guten Umformbarkeit und der zulässigen Fertigungstoleranzen wurde dieser Werkstoff für die Untersuchungen in dieser Arbeit ausgewählt.

Für die metallurgische Untersuchung der Rohre wurden Proben sowohl aus der Schweißnaht als auch aus dem Grundwerkstoff entnommen und in Kunstharz eingebettet. Anschließend wurde die Oberfläche in einem iterativen Schleifprozess poliert und die Schliffbilder mit einem Auflichtmikroskop aufgenommen. Die Abbildung 4.3 zeigt die Gefügebilder des Grundwerkstoffs und der Schweißnaht. Es ist zu erkennen, dass es sich bei dem Grundwerkstoff um einen ferritischen Stahl mit einem geringen Anteil an Perlit handelt. Die Schweißnaht hingegen besteht überwiegend aus Bainit. Die Ergebnisse der Schliffbilder bestätigen zudem, dass der Werkstoff P235TR1 magnetisch ist.

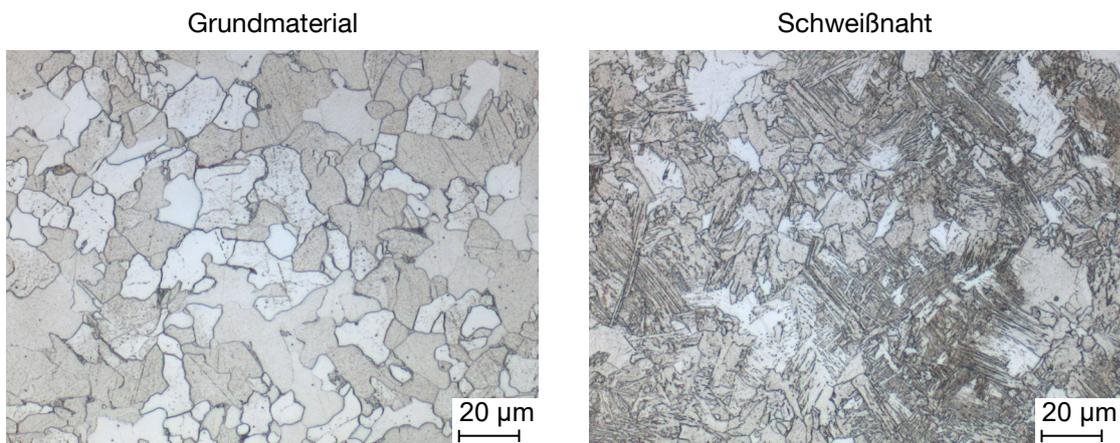


Abbildung 4.3: Mikrostruktur von P235TR1 unter 500-facher Vergrößerung

Die chemische Zusammensetzung des in Tabelle 4.1 dargestellten Werkstoffs wurde mit Hilfe eines optischen Emissionsspektrometers (OES) bestimmt. Dazu wurde eine präparierte Probe des Werkstoffs an fünf verschiedenen Stellen untersucht und anhand von Kalibrierkurven auf Eisenbasis ausgewertet. Neben den genannten metallurgischen und chemischen Eigenschaften zeichnen sich die verwendeten Rohre durch eine innen und außen planparallele Schweißnaht aus. Die geometrischen Sollabmessungen mit den vorgegebenen Fertigungstoleranzen nach DIN EN 10217-1:2019 betragen für den Außendurchmesser $D_A = 42,4 \pm 0,5$ mm und für die Wanddicke $s = 2,6 \pm 0,3$ mm. In Kapitel 5.1.2 wird auf den tatsächlichen Verlauf der Abmessungen der verwendeten Rohre eingegangen. Dabei werden sowohl der Außendurchmesser als auch die Wandstärke anhand gezielter Stichprobenmessungen an einzelnen Rohrabschnittsproben analysiert.

Tabelle 4.1: Chemische Zusammensetzung von P235TR1, Massenanteile in [%]

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V
P235TR1	0.037	0.027	0.11	0.0048	0.0016	0.041	0.24	0.011	0.081	<0.001

Die mechanischen Eigenschaften wurden in der Universalprüfmaschine Zwick 1484 der Firma ZwickRoell GmbH & Co. KG nach DIN EN ISO 6892-1:2019 ermittelt. Um eine Aussage über das elastisch-plastische Verhalten des Rundrohres zu erhalten, wurden die Zugversuche am gesamten Rohr durchgeführt. Hierzu wurden Rohrstücke mit einer Länge von 300 mm verwendet. Um einer Verformung im Einspannbereich entgegenzuwirken und die Proben optimal einspannen zu können, wurden an beiden Rohrenden im Einspannbereich Metallstopfen eingesetzt. Zur Dehnungsmessung während des Zugversuchs wurden berührende Feindehnungsaufnehmer verwendet. Dabei berühren die an Tastarmen befestigten Messschneiden die Probe direkt und die Dehnungsmessung erfolgt durch Auswertung der Winkel- bzw. Wegänderung der Tastarme (vgl. Abbildung 4.4). Für die Kraftmessung steht eine Kraftmessdose für eine maximale Belastung von 200 kN zur Verfügung. Die wichtigsten mechanischen Kennwerte sind in der Tabelle 4.2 aufgeführt und das in Abbildung 4.4 dargestellte Spannungs-Dehnungs-Diagramm zeigt die aus 3 Versuchen gemittelte Kurve für die technische Spannung und Dehnung. Die ermittelten Werkstoffkennwerte werden im weiteren Verlauf der Arbeit für die Erstellung eines numerischen Modells und den Aufbau eines virtuellen Labors herangezogen.

Tabelle 4.2: Ausgangsquerschnitt, Ausgangslänge und ermittelte Werkstoffkennwerte jeweils gemittelt aus 3 Rohrzugversuchen

A_0 mm^2	L mm	E GPa	$R_{p0,2}$ MPa	R_m MPa
307 ± 5	300 ± 1	224 ± 5	467 ± 1	490 ± 2

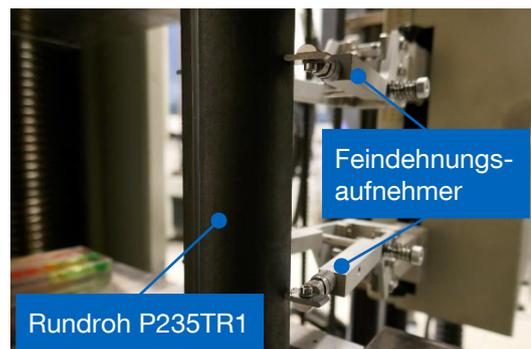
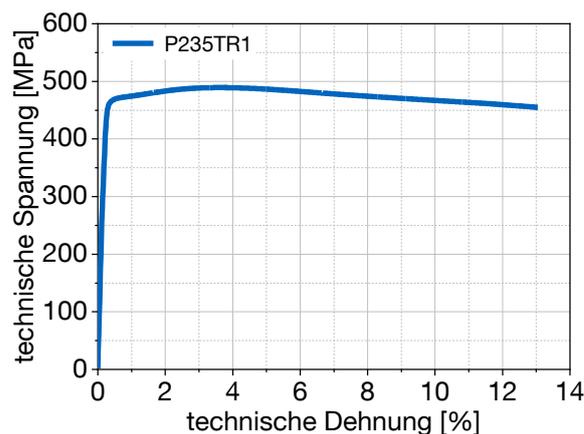


Abbildung 4.4: Aus 3 Versuchen gemittelttes technisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm der verwendeten Rundrohre aus P235TR1 und Aufnahme aus dem Versuchsaufbau

4.3 Messsysteme und Sensoren

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit den eingesetzten Messsystemen, Messmethoden und Sensoren sowie deren Auswerteroutinen. Dabei werden zunächst die Systeme beschrieben und deren physikalisches Messprinzip erläutert. Zu Beginn des Kapitels wird das laserbasierte Geometriemesssystem vorgestellt und dessen allgemeine Messgenauigkeit und Messunsicherheit analysiert und bewertet. Im Anschluss daran werden sowohl das UCI-Härtemessgerät als auch der mikromagnetische Barkhauserauschsensor detailliert beschrieben. Beide Sensoren werden zur Bestimmung der für diese Arbeit relevanten mechanischen Eigenschaften eingesetzt und hinsichtlich ihres physikalischen Messprinzips analysiert.

4.3.1 Optisches Geometriemesssystem

Um die geometrischen Eigenschaften sowohl der ungebogenen als auch der gebogenen Bauteile bewerten und analysieren zu können wird in dieser Arbeit ein optisches Messsystem verwendet. Das Messsystem besteht aus einem handgeführten Laserscanner namens *T-Scan 10* und einem optischen Trackingsystem *T-Track 10*, beides hergestellt und vertrieben von der Carl Zeiss GOM Metrology GmbH. Zusammen mit der Auswertesoftware *GOM Inspect Pro* können Messungen mit einer hohen Genauigkeit und Geschwindigkeit aufgenommen werden sowie parametrisierte Inspektionen und Soll-Ist-Vergleiche durchgeführt werden. Abbildung 4.5 zeigt eine schematische Darstellung des verwendeten Messsystems, wobei die wichtigsten Elemente zusätzlich markiert sind.

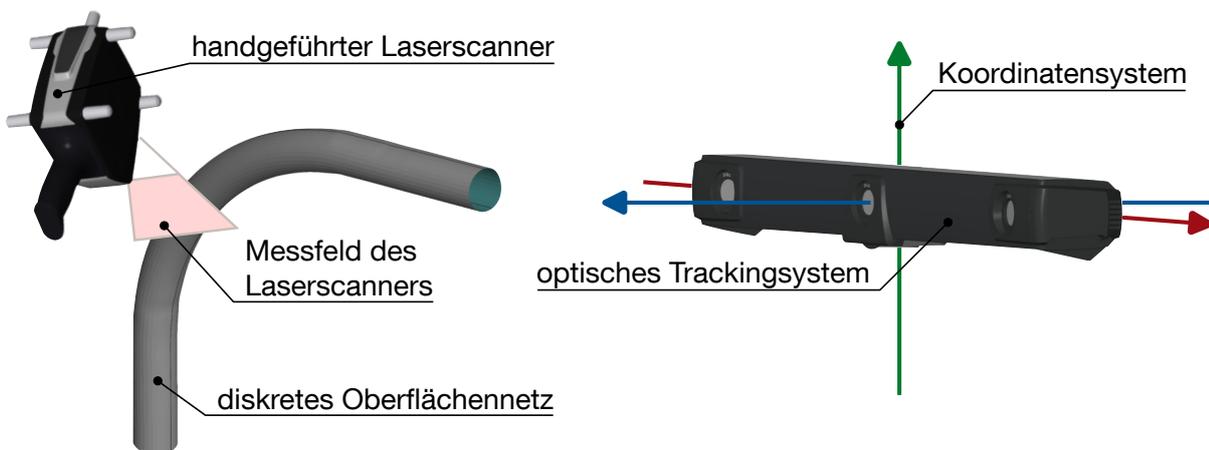


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung des optischen Messsystems mit handgeführtem Laserscanner und statischen Trackingsystem

Das Messsystem arbeitet nach dem Prinzip der optischen Triangulation. Dabei wird die Oberfläche des zu messenden Bauteils durch den handgeführten Laserscanner (*T-Scan*) abgetastet. Die Bewegung des handgeführten Laserscanners wird wiederum von einem statischen und ebenfalls optischen Trackingsystem (*T-Track*) aufgenommen und im Raum verfolgt. Durch das direkte Zusammenspiel der beiden Komponenten können unterschiedlichste Oberflächen ohne Vorbehandlung und innerhalb des Messvolumens gescannt werden. Als Messvolumen wird der Raum bezeichnet, in dem sich der handgeführte Laserscanner bewegen kann, um vom optischen Trackingsystem erfasst zu werden. Das System kann Bauteile mit einer Gesamtlänge von bis zu 2,5 m innerhalb eines Messvolumens von 10 m³ erfassen und vermessen. Die gescannte Oberfläche wird direkt im Messcomputer als diskrete Punktwolke dargestellt, wodurch der Bediener eine sofortige Rückmeldung über das Ergebnis der optischen Messung erhält. Die diskrete Punktwolke wird anschließend durch Polygonisierung in ein diskretes Oberflächennetz überführt. Dazu werden zwischen benachbarten Oberflächenpunkten Dreiecke aufgespannt, die in ihrer Summe eine vollständige Beschreibung des gemessenen Bauteils ermöglichen. Mit der Auswertesoftware *GOM Inspect Pro* können dann die gewünschten Auswertungen, Inspektionen und Soll-Ist-Vergleiche am Oberflächennetz durchgeführt werden. Die Genauigkeit des Messsystems wird vom Hersteller mit $0,033 \text{ mm} \pm 0,033 \text{ mm/m}$ bei einem mittleren Punktabstand von 0,075 mm angegeben. (Carl Zeiss GOM Metrology GmbH, 2021)

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Messsystem zunächst zur Vermessung und Digitalisierung der Biegewerkzeuge eingesetzt, um diese für das numerische Simulationsmodell mit hoher Präzision abbilden zu können. Darüber hinaus wird das System hauptsächlich zur Bestimmung der geometrischen Eigenschaften am ungebogenen und am gebogenen Rohr verwendet. Die Vielzahl der in der Software implementierten Geometriewerkzeuge wird für die nachfolgende Auswertung genutzt. In Kapitel 5.1 wird die Funktionsweise der verwendeten Auswertemethoden ausführlich erläutert.

4.3.2 UCI-Härtemessgerät

Das UCI-Härteverfahren basiert auf einem Patent von Kleesattel, der ein Gerät entwickelte, um entweder die physikalischen Eigenschaften bzw. Merkmale eines Prüfkörpers zu bestimmen oder die Größe einer ausgeübten Kraft zu messen. (Kleesattel, 1967). Die Grundlagen der Härtemessung mit dem UCI-Verfahren wurden erstmalig von Kleesattel und Gladwell veröffentlicht (Gladwell und Kleesattel, 1968; Kleesattel und Gladwell, 1968). Mit dem UCI-Verfahren wurde es möglich, tragbare Härteprüfgeräte zu entwickeln, welche es erlauben, an großen, schweren und schlecht zugänglichen Bereichen die Härte des Bauteils zerstörungsfrei zu prüfen. Das

Verfahren für die UCI-Härteprüfung an metallischen Werkstoffen und Hartmetall ist dabei in der DIN 50159-1 festgelegt. Die DIN 50159-2 normiert darüber hinaus das Verfahren zur Kalibrierung der verwendeten UCI-Härteprüfgeräte. Zur Bestimmung der Härte am ungebogenen und gebogenen Rohr wird in dieser Arbeit ein UCI-Härtemessgerät des Typs *MET-UIA* der Firma Innovatest Europe BV eingesetzt. Das Gerät zeichnet sich durch eine gute Handhabung und einen einfachen Einsatzbereich aus und kann ohne aufwendige Probenpräparation adäquate Messergebnisse produzieren. In der Arbeit werden die durch das UCI-Verfahren bestimmten Härtewerte mit HV_{UCI} bezeichnet, um eine Unterscheidung zu den HV-Werten aus der klassischen Vickers-Härteprüfung darzustellen.

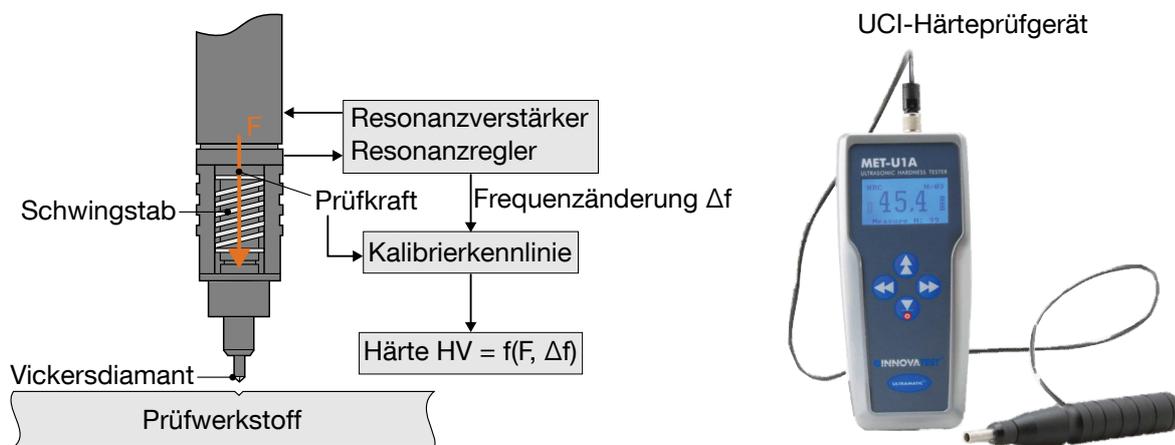


Abbildung 4.6: Schematischer Aufbau einer UCI-Sonde und das verwendete UCI-Härteprüfgerät mit handgeführter Sonde

Im Gegensatz zu klassischen Härteprüfverfahren, bei denen die Diagonale (Vickers) oder der Durchmesser (Brinell) des eingedrungenen Prüfkörpers unter einem Mikroskop vermessen wird, wird beim UCI-Verfahren die Härte durch Frequenzverschiebung und Interpolation in eine zuvor ermittelten Kalibrierkrurve nach Vickers berechnet. Nach Gerth, 2002 basiert das UCI-Verfahren auf der dynamischen Bestimmung der Kontaktnachgiebigkeit der Materialoberfläche unter Prüfkraft, wobei die Erfassung der Änderung der Resonanzfrequenz durch eine UCI-Sonde erfolgt. Die UCI-Sonde ist in Abbildung 4.6 dargestellt und zeichnet sich durch einen mechanischen Schwingstab aus, an dessen Spitze ein Vickers-Eindringkörper angebracht ist (Gogolinskii et al., 2019). Bei der UCI-Härteprüfung wird die UCI-Sonde mit einer definierten Prüfkraft auf den zu prüfenden Körper gedrückt. Sobald Kontakt zwischen der UCI-Sonde und dem Prüfkörper besteht, erhöht sich die Resonanzfrequenz f_0 des Schwingstabes. Die Verschiebung der Resonanzfrequenz Δf wird anschließend unter Prüfkraft bestimmt und unter Zuhilfenahme von bereits bekannter Härten (z. B. Härtevergleichsplatten) der entsprechenden Vickershärte zugeordnet. Nach Tietze, 2015 ergibt sich daraus ein Zusammenhang zwischen der Frequenzverschiebung

Δf und der Kontaktfläche A_{UCI} des Vickers-Eindringkörpers, des effektiven Elastizitätsmodul E_{eff} sowie der Prüfkraft F_{UCI} :

$$\Delta f = f(A_{\text{UCI}}, E_{\text{eff}}, F_{\text{UCI}}) \quad (\text{Gleichung 4.1})$$

Aus dieser Abhängigkeit und basierend auf kalibrierten Härtevergleichsplatten ergibt sich die Härte des Probenmaterials zu:

$$HV_{\text{UCI}} = f\left(\frac{1}{\Delta f}\right) \quad (\text{Gleichung 4.2})$$

Um ein verlässliches Messergebnis zu erhalten, muss die Oberfläche des Prüfkörpers frei von Fremdkörper wie z. B. Zunder, Beschichtungen oder andere Oberflächenunregelmäßigkeiten sein. Um dies bei den Messungen in der vorliegenden Arbeit sicherzustellen, wurden die Messstellen mit Poliervlies behandelt. Die Ergebnisse der Messungen auf dem Ausgangshalbzeug und der Vergleich der Ergebnisse mit der klassischen Härteprüfung werden in Kapitel 5.2.1 vorgestellt und diskutiert.

4.3.3 Mikromagnetischer Barkhausensensor

Um neben der Härte auch andere mechanische Eigenschaften, wie z. B. die vorliegenden Eigenspannungen analysieren zu können, wird das BHN gemessen und analysiert. Zur Anwendung kommt dabei ein System namens *μmagnetic* der Firma QASS GmbH, dargestellt in Abbildung 4.8. Diese Sensoren werden hauptsächlich zur zerstörungsfreien Messung der Härte in Bauteilen verwendet, können aber auch zur Analyse weiterer mechanischer Eigenschaften verwendet werden (Unterberg et al., 2021). Dabei geht das physikalische Prinzip des Barkhausenrauschens auf die Entdeckung des deutschen Physikers Heinrich Georg Barkhausen zurück, der den Effekt 1919 erstmals wissenschaftlich aufarbeitete (Barkhausen, 1919). In seiner Veröffentlichung postulierte Barkhausen, dass ferromagnetische Materialien ein rauschartiges Signal erzeugen, wenn man sie magnetisiert bzw. ihre magnetische Orientierung ändert (Barkhausen, 1919).

Um den Effekt genau zu verstehen, greift man auf die Modellvorstellung von Elementarmagneten in ferromagnetischen Werkstoffen und die magnetische Hysteresekurve zurück. Die Elementarmagnete oder auch Weiss-Domänen oder Weiss'sche Bezirke genannt, stellen die kleinsten magnetischen Bereiche in einem Material dar (Weiss, 1907). In einem ferromagnetischen Material sind eine Vielzahl von Weiss'schen Bezirken vorhanden, die voneinander durch sogenannte Domänenwände oder Blochwände getrennt sind. Eine Charakteristik ferromagnetischer Werkstoffe ist das Auftreten einer Hysterese beim Wechsel der magnetischen Orientierung durch

Anlegen eines äußeren Magnetfeldes (Barteldes et al., 2019). Abbildung 4.7 zeigt die magnetische Hysterese aufgetragen über die Feldstärke H des äußeren Magnetfeldes und die magnetische Flussdichte B sowie das resultierende Signal des Barkhausenrauschens beim Durchlaufen eines Astes der Hysterese.

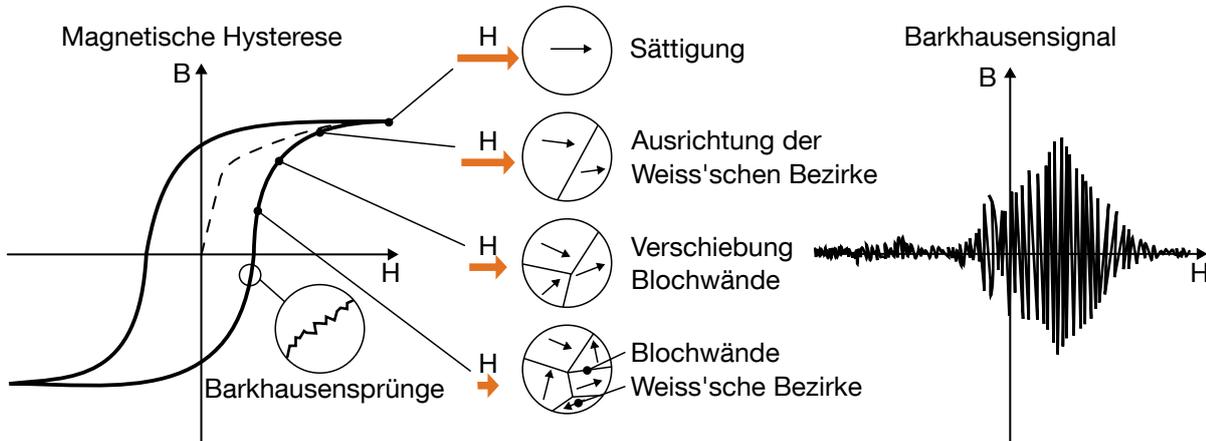


Abbildung 4.7: Magnetische Hysteresekurve modifiziert von Jedamski et al. (2020) und exemplarisches Rohsignal des Barkhausenrauschens

Wirkt kein magnetisches Feld auf einen ferromagnetischen Werkstoff, dann liegen die Weiss'schen Bezirke in chaotischer Unordnung vor und heben sich gegenseitig auf. Wird nun ein äußeres magnetisches Feld erzeugt, so wird die Hysteresekurve durchlaufen und die weiss'schen Bezirke versuchen sich entlang der Feldlinien des äußeren magnetischen Feldes auszurichten. Bei der Umkehrung der Richtung des äußeren Magnetfeldes, ändert sich auch die magnetische Orientierung des Werkstoffs. Die Umorientierung geschieht zunächst langsam, da sich das effektiv wirkende Magnetfeld aus einer Überlagerung des äußeren und inneren Magnetfeldes zusammensetzt, die zueinander entgegengesetzt sind. Je mehr Weiss'sche Bezirke sich nun in Richtung des äußeren Magnetfeldes ausrichten, desto stärker wird das effektiv wirkende Magnetfeld und desto schneller schreitet die Ummagnetisierung voran. Haben sich schließlich alle magnetischen Domänen neu ausgerichtet und man wechselt erneut die Richtung des äußeren Magnetfeldes, startet der gesamte Prozess erneut. In der Detailbetrachtung der Abbildung 4.7 ist zu erkennen, dass der Verlauf der magnetischen Hysterese nicht stetig ist, sondern aus kleinen diskreten Sprüngen besteht, die als Barkhausensprünge oder BHN bezeichnet werden. Änderungen im Eigenspannungszustand oder in der Härte haben Auswirkungen auf das BHN-Signal, wodurch dieses genutzt werden kann, um Erkenntnisse über Veränderungen in den mechanischen Eigenschaften zu erhalten. (Barteldes et al., 2019; Jedamski et al., 2020)

Abbildung 4.8 zeigt den verwendeten BHN-Sensor und die wichtigsten Verbindungselemente. Die gesamte Messkette besteht dabei aus BHN-Sensor, Vorverstärker, Leistungsverstärker,

Auswertecomputer (Opimizer4D) und diversen Verbindungs- und Stromkabeln. Im Detail besteht der BHN-Sensor aus einer Magnetfeldspule, die das Erregerfeld erzeugt, sowie aus einer Sensorspule, die das hochfrequente BHN aufnimmt und in elektrische Signale umwandelt. Ein wichtiger Faktor bei der Verwendung des BHN-Sensors ist vor allem der Abstand zwischen Werkstück und Sensor. Der Sensor muss nah genug an dem Werkstoff oder Bauteil sein, um ein auswertbares Signal erzeugen zu können ohne es jedoch zu berühren. Um einen minimalen Abstand bei den Messungen in dieser Arbeit zu gewährleisten, wurde der Messkopf des Sensors speziell an das zu untersuchende Rundrohr angepasst und zusätzlich mit einem Klebeband abgedeckt. Die Anpassung des Messkopfes sorgt dafür, dass der Sensor möglichst nahe und gerade auf die Oberfläche des Rohrs aufgesetzt werden kann. Das Klebeband verhindert einen Kontakt zwischen Sensor und Werkstück und dient gleichzeitig dazu den Abstand zwischen Messkopf und Werkstück minimal zu halten.

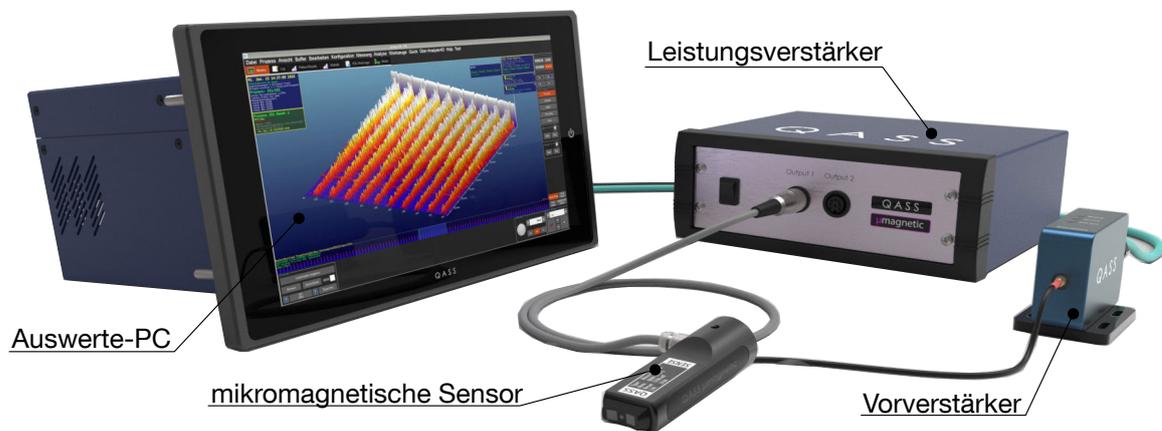


Abbildung 4.8: Gesamte Messkette des mikromagnetischen BHN-Sensors

Mikromagnetische Barkhausenrauschsensoren finden Anwendung in verschiedenen Bereichen wie der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, der Überwachung von elektrischen Motoren und Generatoren sowie der Erfassung von Rissen und Fehlern in Materialien. Durch die Verwendung von mikromagnetischen Barkhausenrauschsensoren können genaue und schnelle Messungen durchgeführt werden, ohne dass die zu messende Probe beschädigt wird. Insgesamt sind mikromagnetische Barkhausenrauschsensoren ein leistungsfähiges Instrument zur Messung von magnetischen Feldern in verschiedenen Anwendungen. Die Kombination aus der empfindlichen Erfassung des Barkhausenrauschens und der digitalen Signalverarbeitung ermöglicht es, genaue Messungen durchzuführen und Fehler in Materialien zu erkennen, ohne dass die Probe beschädigt wird. (Seidel, 2020)

5 Bestimmung geometrischer und mechanischer Eigenschaften

Die geometrischen und mechanischen Eigenschaften müssen gemessen und bestimmt werden können, um eine Entkopplung dieser Eigenschaften beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize zu ermöglichen. Dabei kommen verschiedene Messverfahren zum Einsatz, die nach J. Hoffmann (2014) in direkte und indirekte Messverfahren unterteilt werden können. Zu den direkten Verfahren zählen beispielsweise Härtemessungen, die eine direkte Aussage über die Härte an der Messstelle liefern. Bei den indirekten Messverfahren wird die zu messende Größe über Hilfsgrößen bestimmt, die in direktem Zusammenhang mit der zu messenden Größe stehen. Ein Beispiel hierfür sind mikromagnetische Messungen, bei denen das Barkhausenrauschen gemessen wird und die Ergebnisse mit physikalischen Messergebnissen korreliert werden. Nach Volk et al. (2019) entspricht dies einem empirisch-statistischen Modell, da die Korrelationen auf der Basis von gesammelten statistischen Daten erstellt werden. Im folgenden Kapitel werden zum einen die Mess- und Auswerteverfahren für die geometrischen und mechanischen Eigenschaften erläutert und zum anderen Referenzmessungen der Halbzeugeigenschaften durchgeführt und ausgewertet. Das gesamte Kapitel soll Aufschluss über die Anwendbarkeit der Methoden geben und die Zusammenhänge zwischen den Messsignalen und den gewünschten Eigenschaften vermitteln.

5.1 Geometrische Eigenschaften

Der folgende Unterabschnitt beschäftigt sich mit der allgemeinen Methodik zur Bestimmung geometrischer Bauteileigenschaften, wobei in den einzelnen Unterkapiteln detailliert auf die Mess- und Auswertemethoden der geometrischen Eigenschaften eingegangen wird. Neben dem ungebogenen Ausgangszustand der Halbzeuge werden auch die Methoden zur Bestimmung der geometrischen Eigenschaften gebogener Bauteile dargestellt. Das Kapitel legt somit die Basis für das Verständnis zur Analyse der geometrischen Eigenschaften in dieser Arbeit. Eine detaillierte Analyse zur allgemeinen Auswertung der Geometrie von freiformgebogener Bauteile mit dem Biegeverfahren des DRSB wurde bereits von Groth (2020) in ausführlicher Weise beschrieben.

5.1.1 Biegegeometrie

Zunächst wird auf die Methodik zur Analyse der Biegegeometrie bzw. der Biegelinie des gebogenen Bauteils eingegangen, wobei die Auswertung der charakteristischen Biegelinie eines Bauteils durch verschiedene Methoden erfolgen kann. Betrachtet man die VDI-Richtlinie 3430, so werden als allgemeingültige Kenngrößen für einen Biegebogen der Biegeradius R , der Biege-
winkel α und die Profilhöhe H , die bei Rundrohren dem Außendurchmesser entspricht, genannt. Betrachtet man die Arbeit von Groth (2020) oder Beulich (2022), so kann für eine detailliertere Analyse der Biegegeometrie neben den charakteristischen Merkmalen auch der gesamte Krümmungsverlauf des freiformgebogenen Bauteils ausgewertet werden. In der vorliegenden Arbeit werden hauptsächlich einfache zweidimensionale Biegebögen untersucht, daher liegt der Fokus zur Bestimmung der Biegegeometrie auf dem Biegeradius R im konstant gekrümmten Bereich und dem Biege-
winkel α . Abbildung 5.1 zeigt die grafische Darstellung der charakteristischen Merkmale für Biegebögen unterschiedlicher Komplexität. Neben dem einfachen zweidimensionalen Bogen sind auch dreidimensional gekrümmte Bauteile und komplexe Freiformgeometrien dargestellt, die jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit sind.

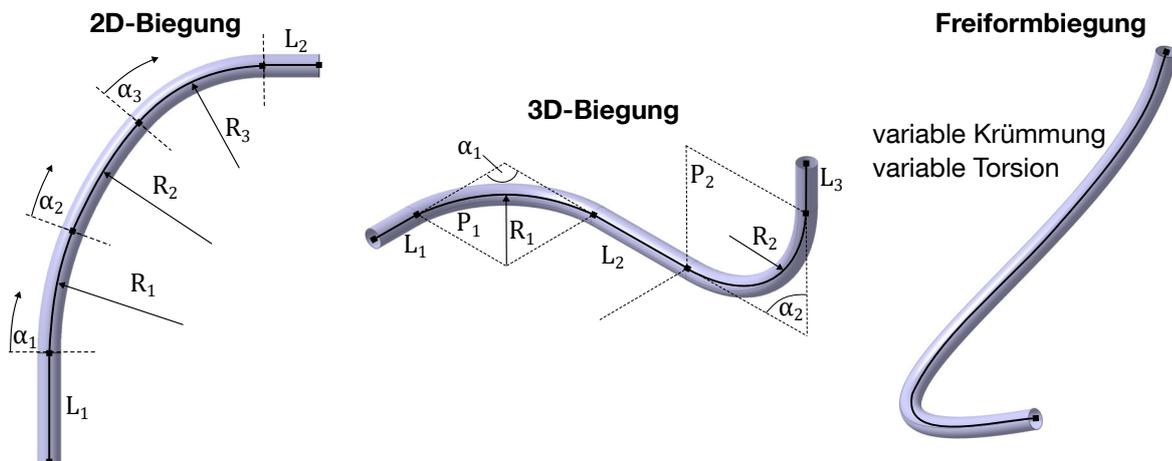


Abbildung 5.1: Charakteristische Merkmale für Biegegeometrien mit ansteigender Komplexität

Bevor die charakteristischen Merkmale von experimentell gebogenen Bauteilen analysiert werden können, ist es erforderlich, deren Oberfläche zu digitalisieren. Hierzu wird das optische Messsystem aus Kapitel 4.3.1 benutzt und die Schritte des Digitalisierungsprozesses (Aufnahme des Bauteils, Korrektur kleiner Netzfehler und Polygonisierung der Punktwolke) durchlaufen. Dadurch entsteht eine diskrete Abbildung der Bauteiloberfläche, die anschließend mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Software (*GOM Inspect Pro*) hinsichtlich der gewünschten Kenngrößen oder des gesamten Krümmungs- bzw. Torsionsverlaufs ausgewertet werden kann. Da in der vorliegenden Arbeit zweidimensionale Bauteile hergestellt und untersucht werden, werden

der Biegeradius und der Biegewinkel als Kenngrößen der einzelnen Biegungen definiert. Die Berechnung des Biegeradius bezieht sich dabei auf die Biegelinie (Schwerpunktlinie) des gebogenen Bauteils, die Berechnung des Biegewinkels auf den Außenwinkel der beiden Schenkel.

Im folgenden Abschnitt wird der Ablauf der Auswertung der Biegegeometrien nach der Digitalisierung der Oberfläche beschrieben. Zum besseren Verständnis wird der gesamte Ablauf in Abbildung 5.2 dargestellt. Zu Beginn muss für die Berechnung der Biegelinie ein Ausgangskordinatensystem definiert werden. Dabei werden die fertigungstechnischen Randbedingungen des Freiformbiegens ausgenutzt. Beim Freiformbiegen wird sowohl am Anfang als auch am Ende ein ungebogenes, gerades Teilstück benötigt und um einen einwandfreien Vorschub zu gewährleisten, wird am Ende des Rohres eine senkrechte Schnittfläche benötigt. Durch die beiden geraden Teilstücke am Anfang und am Ende des gebogenen Bauteils werden nun Zylinder gefittet. Dabei wird auf softwareinterne Funktionen von *GOM Inspect Pro* zurückgegriffen, die es erlaubt einen Teilbereich des Oberflächennetzes zu markieren und einen Zylinder zu fitten. Zur Anpassung des Fits stehen verschiedene Einstellungsmöglichkeiten zur Verfügung, im weiteren Verlauf der Arbeit werden jedoch immer die von der Software vorgegebenen Initialparameter verwendet. Zusätzlich wird auf der senkrechten Schnittfläche am Ende des geraden Teilstücks eine Ebene basierend auf 3 ausgewählten Punkten konstruiert. Im Anschluss daran wird durch die softwareinterne Lösung ein Schnittpunkt aus der konstruierten Ebene und dem gefitteten Zylinder erzeugt. Somit ergeben sich nun 2 Zylinder an den jeweiligen Rohrenden, 1 Ebene an der Vorschubseite des Rohrs und ein Schnittpunkt aus Zylinder und Ebene. Durch eine weitere Funktion der Software kann mithilfe der Funktion „Ebenen-Linien-Punkt“ aus den bereits erzeugten Geometrien ein Koordinatensystem aufgespannt werden. Hierzu werden die Funkti-

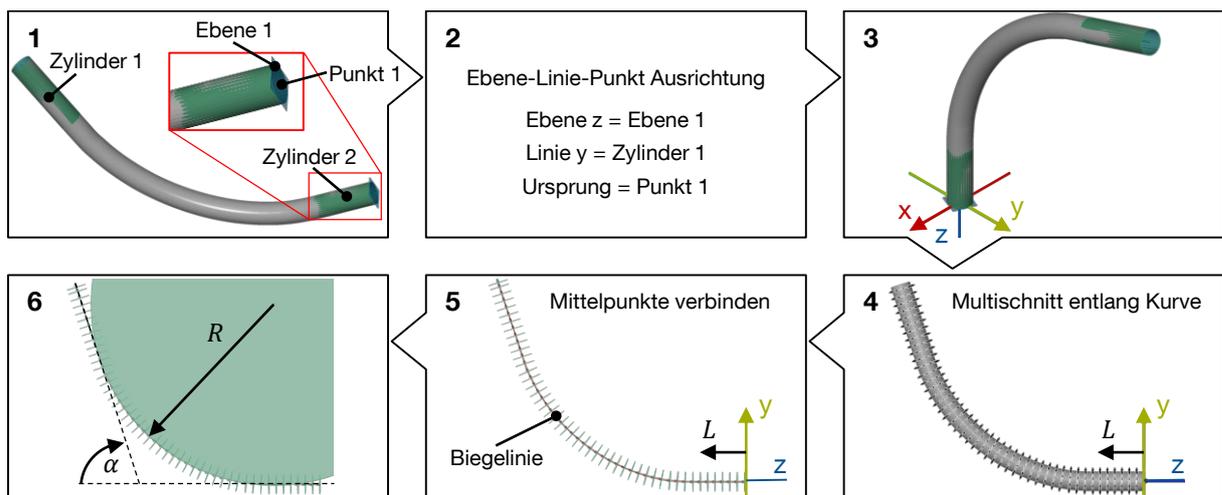


Abbildung 5.2: Ablaufdiagramm für die Ausrichtung freiformgebogener Bauteile und die anschließende Bestimmung der charakteristischen Biegemerkmale

onsparameter so gesetzt, dass die positive z -Achse entlang der Rohrachse zeigt und der Ursprung dem Schnittpunkt zwischen gefitteten Zylinder 2 und der erzeugten Ebene auf der Schnittfläche entspricht. Die y -Achse steht so, dass die Mittellinie des Zylinder 1 auf der yz -Ebene liegt.

Nachdem das Koordinatensystem bestimmt wurde und die fehlende x -Achse senkrecht zur yz -Ebene im Ursprung erzeugt wurde, wird das gebogene Bauteil entlang der xy -Ebene geschnitten. Anschließend wird auf der Oberseite des Rohrs eine Führungskurve entlang des Schnittes definiert. Mit Hilfe der erzeugten Kurve und der softwareinternen Funktion „Multischnitt entlang Kurve“ wird das Rohr nun segmentiert. Die Funktion sorgt dafür, dass ein ausgewählter Bereich des Oberflächennetzes entlang einer Kurve mit einer definierten Anzahl an Kreisen geschnitten werden kann. Im vorliegenden Fall werden die Schnitte im Abstand von 1,0 mm erzeugt, wobei die Schnitte jeweils senkrecht zum tangentialen Vektor am entsprechenden Punkt der Führungskurve stehen. Das Ergebnis der Funktion ist in Schritt 4 der Abbildung 5.2 zu sehen und besteht aus einer Vielzahl an kreisförmigen Schnittelementen. Danach werden durch die einzelnen Schnittelemente Kreise gefittet und die Mittelpunkte der Kreise zu einer Linie verbunden. Diese Linie entspricht der Biegelinie bzw. Schwerpunktlinie des Bauteils und ist in Schritt 5 dargestellt. Anhand von softwareseitig implementierten Funktionen kann diese Biegelinie anschließend auf die unterschiedlichsten Charakteristika wie beispielsweise den Biegeradius, den Biegewinkel oder den gesamten Krümmungsverlauf hin untersucht werden. Ein typischer Krümmungsverlauf für eine zweidimensionale Biegung ist in Abbildung 5.3 dargestellt.

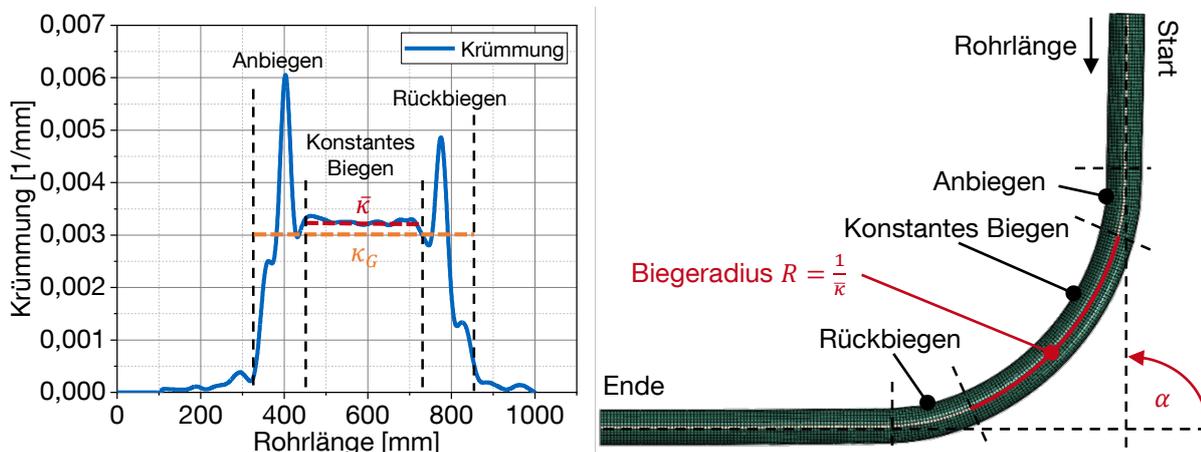


Abbildung 5.3: Zusammenhang zwischen der Prozesskinematik und dem am Biegebauteil resultierenden Krümmungsverlauf

Aufbauend auf dem Krümmungsverlauf erfolgt die anschließende Auswertung des Biegeradius über den Kehrwert der Krümmung. Dabei wird zwischen der lokalen Krümmung $\bar{\kappa}$ mit dem lokalen Biegeradius R (Biegeradius im konstant gebogenen Bereich) und der globalen

Krümmung κ_G mit dem globalen Radius R_G (Radius zwischen den beiden Schenkeln) unterschieden (vgl. Abbildung 5.3). Um den Biegeradius zu bestimmen, wird ausschließlich der lokal konstant gebogene Bereich ($R(\bar{\kappa})$) herangezogen, da somit eingebrachte Defekte durch ein unterschiedlich schnelles Auslenken der Biegematrixe negligiert werden und eine eindeutige Vergleichbarkeit der Ergebnisse zueinander möglich ist. Um den Biegeradius R zu bestimmen wird der Krümmungsverlauf im konstant gebogenen Bereich gemittelt, wodurch sich ein Krümmungsmittelwert $\bar{\kappa}$ ergibt. Der Biegeradius wird anschließend durch die Umkehrfunktion des Krümmungsmittelwerts berechnet. Demnach entspricht der Biegeradius dem Radius eines Kreises, der im konstanten Bereich auf der Biegelinie liegt (vgl. Schritt 6 in der Abbildung 5.2). Zur Bestimmung des Biegewinkels α , der dem Außenwinkel der beiden Schenkel entspricht, wird der Winkel zwischen den beiden Zylindern an den Schenkeln gemessen. Da in dieser Arbeit zweidimensionale Biegebauteile, die in einer Ebene liegen, betrachtet werden, kann die Torsion vernachlässigt werden und der Winkel auf der xy -Ebene gemessen werden. Diese Vorgehensweise zur Bestimmung des Biegeradius und -winkels wird für den gesamten weiteren Verlauf der Dissertation beibehalten.

5.1.2 Querschnittsgeometrie

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt die Methodik zur Analyse und Bestimmung der Biegegeometrie aufgezeigt wurde, wird im folgenden Abschnitt auf die Auswertung der Querschnittsgeometrie eingegangen. Zu Beginn wird die Querschnittsgeometrie der Halbzeuge im Anlieferungszustand analysiert und deren Übereinstimmung mit den Fertigungstoleranzen aus DIN EN 10217-1:2019 überprüft (vgl. Tabelle 4.2). Als entscheidende Parameter zur Bewertung der Querschnittsgeometrie von Rundrohren werden dabei der Verlauf des Außendurchmessers D_A und der Wanddicke s über die Rohrlänge L festgelegt. Die verwendeten geschweißten Rundrohre werden vom Hersteller in handelsüblichen Längen von je 6 m pro Stück angeliefert. Diese Länge eignet sich jedoch nicht zum Biegen, da die Freiformbiegemaschine auf Halbzeuge mit einer maximalen Länge von 4 m begrenzt ist. Dementsprechend werden die Halbzeuge mit einer metallischen Kappsäge auf Rohrabchnitte mit unterschiedlichen Längen, kleiner als 4 m, gekürzt. Zur Auswertung der vorhandenen Querschnittsgeometrie und zum Vergleich mit den Fertigungstoleranzen werden Proben aus unterschiedlichen Bereichen des Ausgangsrohrs mit unterschiedlichen Längen entnommen und anschließend untersucht.

Für die Bewertung des Verlaufs des Außendurchmessers werden 3 Rohrstücke zu je 1 m aus dem vorderen, dem mittleren und dem hinteren Teil unterschiedlicher Ausgangsrohre entnommen. Somit soll bei der Wareneingangsprüfung sichergestellt werden, dass die zu prüfenden Proben

einen aussagekräftigen Durchschnittswert über das zur Verfügung stehende Material liefern. Zur Überprüfung der Wanddicke werden nach der optischen Digitalisierung der Außenseite der Rohrstücken mit 1 m Länge wiederum 4 Rohrstücke mit jeweils 25 mm entnommen. Die Länge von 25 mm wird verwendet, um bei der optischen Geometriemessung den gesamten Innenbereich des Rohres zu erfassen. Alle gefertigten Prüfkörper werden mit dem bereits vorgestellten optischen Lasermesssystem vermessen und deren Oberfläche digitalisiert. Aufgrund des lasergestützten optischen Messverfahrens müssen die Rohrabschnittsproben nicht für die Messung aufbereitet oder präpariert werden, sondern können direkt nach dem Beschneiden eingescannt werden. Darüber hinaus kommen auch keine Referenzpunkte zum Einsatz, da durch das Zusammenspiel aus handgeführten Laserscanner und optischen Trackingssystem diese Notwendigkeit entfällt. Lediglich eine Vorrichtung zur Verhinderung einer Bewegung des zu messenden Bauteils während der Messung wird verwendet, wobei diese Vorrichtung aus einem Schraubstock und einem speziell gefertigten Einsatz für die Rundrohre besteht. Bei den Rohrabschnittsproben zur Prüfung des Außendurchmessers wird lediglich die Außenseite der Rohrabschnitte vermessen, während bei den kürzeren Rohrabschnitten sowohl die Innenseite als auch die Außenseite digitalisiert wird, um die Wanddicke gesamtheitlich auswerten zu können. Nach dem erfolgreichen Scannen werden die entstandenen Punktwolken in der Software *GOM Inspect* polygonisiert und ein diskretes Netz errechnet. Alle weiteren Inspektionen werden anschließend in der genannten Software und auf der Netzoberfläche ausgeführt.

Zur Analyse des Außendurchmesserverlaufs wird das digitalisierte Rohr zunächst so transformiert, dass die z-Achse der Rohrlängsachse und die xy-Ebene der Schnittfläche des Rohres entsprechen. Hierzu wird zunächst anhand von 3 gewählten Punkten auf der Schnittfläche des Rohres eine Ebene definiert. Danach wird ein Zylinder über den gesamten Bereich des gemessenen Rohres gefittet, dessen Mittelachse dann der Rohrmittelachse entspricht. Es folgt die Konstruktion eines Schnittpunktes aus Rohrmittelachse und Schnittflächenebene zur Definition des Ursprungs des Koordinatensystems. Zum Abschluss kann ein neues Koordinatensystem definiert werden, wobei die x- und y-Achse anhand von jeweils einem weiteren Punkt auf der Schnittflächenebene bestimmt werden. Nach der erfolgreichen Bauteilausrichtung wird das Rohr mit mehreren Schnitten parallel zur xy-Ebene und entlang der z-Achse analysiert. Die einzelnen Schnittebenen haben dabei einen Abstand von 10 mm, wodurch sich insgesamt 100 Schnitte entlang des Rohres ergeben. Durch jedes einzelne digitale Schnittelement wird anschließend ein Kreis gefittet, dessen Durchmesser dem Rohraußendurchmesser an der jeweiligen Position entspricht. Die Auswertung der Durchmesser über die Rohrlänge ist in Abbildung 5.4 dargestellt, wobei in der Abbildung auch der einzuhaltende Toleranzbereich farblich markiert wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass der Außendurchmesser für alle drei gemessenen Proben innerhalb der Fertigungstoleranz von $42,4 \pm 0,5$ mm liegt. Zu erkennen ist auch, dass der Außendurchmesser

bei den gesamten Messungen einen schwankenden Verlauf hat, wobei ein maximaler Außendurchmesser von 42,57 mm und ein minimaler Außendurchmesser von 42,08 mm gemessen wurde. Darüber hinaus ist ebenfalls zu erkennen, dass die 3 gemessenen Proben zwar alle innerhalb der Toleranz liegen, jedoch alle einen eigenen charakteristischen Verlauf des Außendurchmessers in Bezug auf die Rohrlänge aufweisen. Insgesamt lässt sich festhalten, dass der Außendurchmesser der Rohre innerhalb der geforderten Fertigungstoleranz liegt und eine Schwankung von $\pm 0,49$ mm aufweist. Somit sind die Rohre von deutlich besserer Qualität, bezogen auf den Außendurchmesser, als diese laut DIN EN 10217-1:2019 sein müssten.

Zur Analyse der Wanddicke werden die hergestellten Rohrabschnittsproben mit 25 mm Rohrlänge zum einen mit einem Messschieber an den Außenseiten in 90 °-Schritten, beginnend mit der Schweißnaht (entspricht 0°), vermessen und zum anderen mit der optischen Messtechnik vollständig digitalisiert. Bei den händischen Messschieber-Messungen werden pro Umfangsrichtung (SN, 90°, 180°, 270°) jeweils 2 Messungen an den jeweiligen Enden der Rohrabschnitte durchgeführt und aus den gesamten Ergebnissen die jeweiligen Mittelwerte und Standardabweichungen berechnet. Aus den Ergebnissen, die in Tabelle 5.1 dargestellt sind, ergeben sich Rückschlüsse auf den Wanddickenverlauf in Umfangsrichtung sowie Unterschiede zwischen Grundmaterial und Schweißnaht.

Tabelle 5.1: Gemessene Wanddicke an 12 Proben mit je 2 Messpunkten pro Umfangsrichtung (n = 24)

Berechnungsmethode	s_{SN}	s₉₀	s₁₈₀	s₂₇₀
-	mm	mm	mm	mm
Mittelwert	2,28	2,46	2,47	2,46
Standardabweichung	0,05	0,06	0,07	0,06

Das Vorgehen der Digitalisierung und der Bauteilausrichtung ist analog zu der bereits beschriebenen Prüfung des Außendurchmessers. Da im Gegensatz zu den längeren Rohrabschnittsproben (1 m) bei den kürzeren Abschnitten (25 mm) auch die Innenfläche des Rohres vollständig digitalisiert wird, ist im Anschluss eine Auswertung der mittleren Wanddicke (s_m) möglich. Die mittlere Wanddicke berechnet sich dabei aus der halbierten Differenz zwischen Außendurchmesser und Innendurchmesser an der gewünschten Messstelle. Um Fehler an den Außenseiten der Rohrabschnittsproben zu vermeiden, liegen die Messstellen zwischen 4–22 mm mit einem Abstand von je 2 mm, wobei sich die Position auf die Länge der Rohrabschnittsprobe bezieht. Insgesamt werden 12 Rohrabschnittsproben mit jeweils 10 Messstellen untersucht und pro Messstelle wird anschließend der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Mit den Ergebnissen kann im Anschluss die Fertigungsqualität der Ausgangsrohre in Bezug auf deren geometrische Tole-

ranzeinhaltung bewertet werden. Abbildung 5.4 zeigt die grafische aufbereiteten Ergebnisse der Auswertung der mittleren Wanddicke.

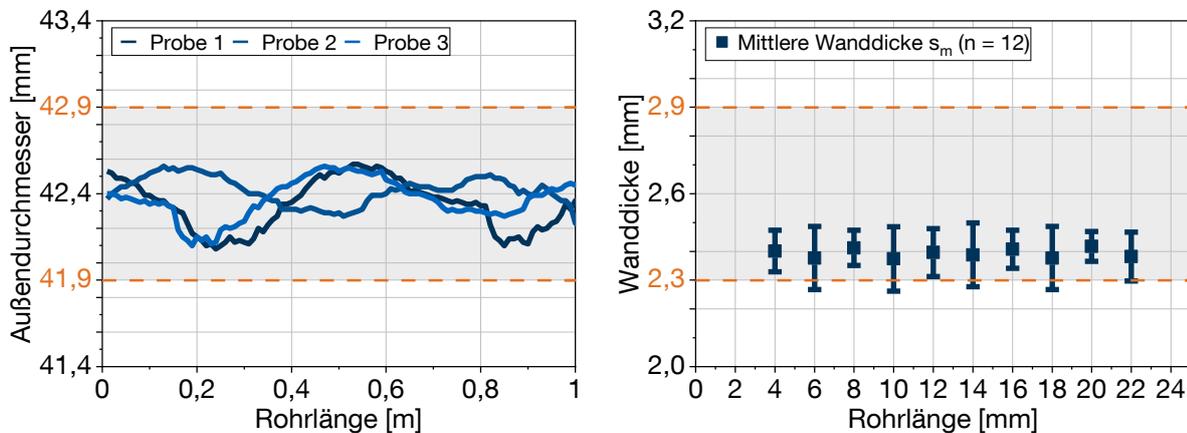


Abbildung 5.4: Stichprobenartige Analyse des Außendurchmessers und der mittleren Wanddicke an Rohrabschnittsproben unterschiedlicher Längen

In Bezug auf die Wanddicke lassen sich anhand der Ergebnisse in Tabelle 5.1 und Abbildung 5.4 mehrere Erkenntnisse gewinnen. An den Messergebnissen aus Tabelle 5.1 ist zudem zu erkennen, dass die Schweißnaht außerhalb des Toleranzbereiches von $2,6 \pm 0,3$ mm liegt, während die Messergebnisse für das Grundmaterial alle innerhalb des Toleranzbereiches sind. Die Wanddicke der Schweißnaht ist durchschnittlich um fast 0,2 mm dünner, als im Vergleich zum Grundmaterial. Diese Abweichung ist auf den nachgelagerten Abschabprozess der Schweißnaht zurückzuführen, da die Schweißnaht bei der Rohrherstellung mittels Schabwerkzeugen nahezu eben abgetragen wird. Das Grundmaterial hingegen weist in Umfangsrichtung nur minimale Abweichungen an den einzelnen Messstellen auf und kann deswegen als konstant angesehen werden. Die reduzierte Dicke der Schweißnaht spiegelt sich auch in den Ergebnissen der mittleren Wanddicke in Abbildung 5.4 wider. Es zeigt sich, dass die mittlere Wanddicke für alle Messpositionen am unteren Ende der einzuhaltenden Fertigungstoleranz liegt. Obwohl an einzelnen Messpositionen die Toleranzgrenze durch die Standardabweichung unterschritten wird, liegen alle Mittelwerte innerhalb des geforderten Toleranzbandes. Daraus ist abzuleiten, dass die verwendeten Halbzeuge der DIN EN 10217-1:2019 entsprechen und von besserer Qualität sind, als es die Norm fordert. Zudem ist festzuhalten, dass der Außendurchmesser der Rohre nahe am Soll-Wert und die Wanddicke etwas unterhalb des geforderten Soll-Bereichs ist.

Zusammenfassend wurde gezeigt, dass sich die Querschnittsgeometrie anhand von optischen Messungen und händischen Messschieber-Messungen analysieren lässt. Zur Bestimmung des Außendurchmessers und der Wanddicke der Halbzeuge im Ausgangszustand wurden Rohrab-

schnittsproben mit unterschiedlichen Längen aus dem ungebogenen Grundmaterial entnommen, vermessen und analysiert. Die Ergebnisse zeigten, dass die Rohre innerhalb der gewünschten Fertigungstoleranz liegen und eine geringere Toleranzbreite als in der Norm gefordert aufweisen. Damit wird bestätigt, dass die verwendeten Halbzeuge in der Biegemaschine verwendet werden können und sich zum Freiformbiegen eignen. Darüber hinaus wurde eine Methodik zur Analyse des Verlaufs des Außendurchmessers und der Wanddicke vorgestellt. Der Außendurchmesser kann zerstörungsfrei durch das virtuelle Oberflächennetz bestimmt werden, während die Wanddicke nur mittels zerstörender Prüfung an kleinen Rohrabschnittsproben ermittelt werden kann.

5.2 Mechanische Eigenschaften

Neben den geometrischen Eigenschaften spielen auch die mechanischen Eigenschaften für die Qualität des gebogenen Bauteils beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize eine entscheidende Rolle. In der Literatur wurde bereits durch unterschiedliche Arbeiten gezeigt, welchen Einfluss die mechanischen Eigenschaften auf die Geometrie des gebogenen Bauteils haben (Beulich, Spoerer et al., 2019; Cheng et al., 2022; Li et al., 2014). Dabei wurde jedoch meist auf numerische Simulationen zurückgegriffen und darüber hinaus nicht untersucht, ob sich die mechanischen Eigenschaften gezielt beeinflussen lassen. Darüber hinaus fehlt es in der aktuellen Literatur an Aufzeichnungen über den Einsatz von zerstörungsfreien Prüfverfahren und Sensoren, die beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize angewendet werden, um sowohl vor dem Biegen als auch nach dem Biegen Aussagen über die mechanischen Eigenschaften und deren Veränderung zu liefern. Die vorliegende Arbeit begegnet dieser Herausforderung durch den Einsatz verschiedener Messsysteme und Methoden zur Bestimmung mechanischer Eigenschaften, wobei ein besonderer Schwerpunkt auf der Härte und den Eigenspannungen liegt.

Um die Härte der verwendeten Stahlrohre analysieren zu können, werden Härteprüfungen an unterschiedlichen Stellen durchgeführt. Aufgrund der geringen Größe und der hohen Flexibilität sowie der Möglichkeit einer zerstörungsfreien Härteprüfung gesamter gebogener Bauteile wird in dieser Arbeit vorwiegend das bereits vorgestellte UCI-Härtemessgerät (Kapitel 4.3.2) verwendet. Um dessen Messmittelbefähigung zu bestätigen werden zunächst UCI-Messungen am ungebogenen Rohr durchgeführt und die Ergebnisse mit Werten aus der Vickers-Härtemessprüfung verglichen. Im Anschluss daran wird das Vorgehen auch für gebogene Bauteile durchgeführt, um den Einsatz des UCI-Geräts für die Untersuchung der Veränderung der Härte durch das Freiformbiegen mit bewegter Matrize zu bestätigen.

Zur Bestimmung der Eigenspannungen von geraden und gebogenen Halbzeugen wird das mikromagnetische BHN aufgenommen und anschließend analysiert. Der verwendete Sensor wurde bereits in Kapitel 4.3.3 beschrieben ebenso wie das physikalische Prinzip des BHN. Um das BHN-Signal zu mechanischen Eigenschaften korrelieren zu können, wird zunächst die allgemeine Auswerte- und Analysemethodik beschrieben. Im Anschluss daran werden die relativen Zusammenhänge zwischen BHN-Signal und vorherrschenden Spannungszustand im Rundrohr durch einfache Rohrzug- und Rohrdruckversuche untersucht. Hierzu werden neben kontinuierlichen Versuchen auch zyklische Versuche durchgeführt und zeitgleich mit dem mikromagnetischen BHN-Sensor aufgenommen. Abschließend werden die Veränderungen des Belastungszustandes mit den Veränderungen im BHN-Signal korreliert und damit die Basis für die Auswertung der experimentellen Sensitivitätsanalyse in Kapitel 7 gelegt.

5.2.1 Härte

Um die Härte der Halbzeuge zu bestimmen und im weiteren Verlauf auch die Messungen mit dem UCI-Härteprüfgerät zu validieren, werden zu Beginn Härteprüfungen nach dem Vickers-Verfahren durchgeführt. Um die Härte des Grundwerkstoffs und der Schweißnaht metallurgisch zu bewerten, werden Proben entnommen, in ein Kunstharz eingebettet und aufbereitet. Dabei werden Ringproben entnommen und die Härte des Grundmaterials entlang der Wanddicke an 3 unterscheidlichen Proben geprüft. Die Härte der Schweißnaht wird auf der Oberfläche entlang des Rohrumfanges geprüft, um die Effekte der Wärmeeinflusszone (WEZ) ebenfalls zu charakterisieren. Die Aufbereitung der Prüfkörper besteht aus mehreren Schleifiterationen mit zunehmender Körnung und anschließendem Wechsel zwischen Polieren und Ätzen. Abbildung 5.5 zeigt die Ergebnisse der Vickers-Härteprüfung für den Grundwerkstoff und die Schweißnaht.

Betrachtet man die beiden Messergebnisse zueinander, so ist klar zu erkennen, dass die Schweißnaht eine höhere Härte als der Grundwerkstoff aufweist. Aufgrund des Schweißprozesses und der damit verbundenen Veränderung des Gefüges mit überwiegenden Bainitanteilen (vgl. Abbildung 4.3) war dieser deutliche Unterschied in der Härte zu erwarten. Innerhalb der Messungen am Grundmaterial zeigt sich, dass die Werte über die Dicke kaum variieren, jedoch innerhalb einer Messung die Werte zwischen 160–175 HV₁ streuen. Anhand der gesamten Messungen lässt sich feststellen, dass die mittlere Härte des Grundmaterials bei 166 ± 3 HV₁ liegt und über die Wanddicke homogen ist. Im Gegensatz dazu lassen sich bei den Härtemessungen der Schweißnaht deutlichere Unterschiede innerhalb eines Messpunktes feststellen. Darüber hinaus ist die Härte der Schweißnaht über deren Länge in Umfangsrichtung inhomogen verteilt. Dabei ist zu beachten, dass sich die reine Schweißnaht lediglich in den Messpunkten zwischen 1,0 mm

bis 1,5 mm widerspiegelt und die anderen Messpunkte bereits in der WEZ liegen. Die Härte in der Wärmeeinflusszone ist deutlich geringer als in der reinen Schweißnaht, wobei sich für die reine Schweißnaht eine mittlere Härte von 246 ± 10 HV1 ergibt.

Zur Validierung des UCI-Härtemessgeräts werden sowohl entlang der Schweißnaht als auch am Grundmaterial mehrere Messungen durchgeführt und diese anschließend mit den Ergebnissen der Vickers-Härteprüfung verglichen. Es werden Rohrabschnittsproben mit einer Länge von 40 mm untersucht, wobei über eine Länge von 35 mm im Abstand von 5 mm gemessen wird. Um eine möglichst fehlerfreie Messung zu gewährleisten, werden die Messstellen mit Schleifpapieren unterschiedlicher Körnung vorbereitet und im Anschluss mit Poliervlies nachgearbeitet. Alle Schleifiterationen erfolgen von Hand und sollen dafür sorgen, dass die Oberfläche möglichst frei von Störeinflüssen ist, um die Abweichungen zwischen den einzelnen UCI-Härtemessungen möglichst gering zu halten. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.6 dargestellt.

Betrachtet man die Abbildung 5.6 ist zu erkennen, dass die UCI-Härtemessungen des Grundmaterials deutlich niedriger liegen, als der Referenzwert der Vickers-Härtemessung. Bei der Schweißnaht hingegen liegen fast alle Werte der UCI-Härtemessung innerhalb des Referenzbereichs der Härteprüfung nach Vickers. Berechnet man aus den dargestellten Ergebnissen der UCI-Härtemessungen den jeweiligen Mittelwert und die Standardabweichung ergibt sich für das Grundmaterial eine mittlere Härte von 149 ± 5 HV(UCI) (Referenz 166 ± 3 HV1) und für die Schweißnaht eine mittlere Härte von 249 ± 13 HV(UCI) (Referenz 246 ± 10 HV1). Im Vergleich zu den Referenzwerten ergibt sich beim Grundmaterial durch die UCI-Härtemessungen eine deutlich geringere Härte, wohingegen auf der Schweißnaht eine etwas höhere mittlere Härte gemessen werden kann. Die Begründung für die Unterschiede in Bezug auf das Grundmaterial und die Schweißnaht und die Referenzwerte liegt in der Krümmung der Rohroberfläche

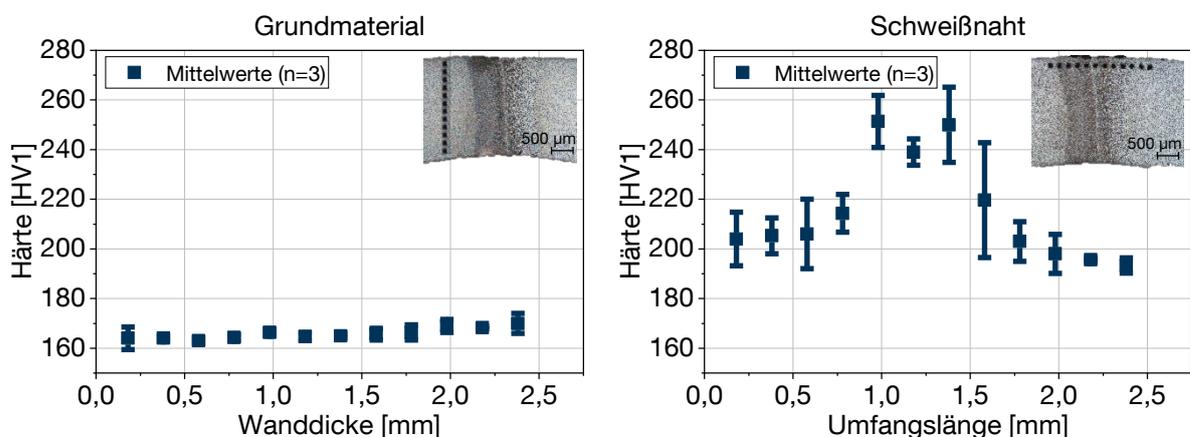


Abbildung 5.5: Vickers-Härteprüfung für das Grundmaterial entlang der Wanddicke und für die Schweißnaht entlang der Umfangsrichtung

und den damit eingebrachten Störungen. Bei der UCI-Härtemessung wird die Sonde per Hand auf der Oberfläche angesetzt. Um ein möglichst senkrechtes Aufsetzen der Sonde auf der gekrümmten Oberfläche zu ermöglichen, wurde ein Aufsatz gefertigt, der die Krümmung am Bauteil ausgleicht und die Sonde führt. Obwohl die Sonde geführt wird kann ein wiederholgenaues händisches Aussetzen ohne leichte Verkippung der Sonde nicht garantiert werden. Die Abweichungen in den Ergebnissen der UCI-Härtemessungen am Grundmaterial könnten durch die manuelle Sondenbedienung und die nicht immer konstante Oberflächenkrümmung verursacht werden. Bei der Schweißnaht wird ebenfalls die Sondenführung verwendet, jedoch wird durch das nachträgliche Abtragen der Schweißnaht nach der Rohrherstellung auch ein Teil der Oberflächenkrümmung entfernt. Dadurch ergibt sich im Bereich der Schweißnaht nur eine geringe Oberflächenkrümmung, und dieser Bereich kann als nahezu gerade angesehen werden. Dies ermöglicht eine deutlich gleichmäßigere Platzierung der Sonde und führt zu präziseren Messergebnissen. Die Ergebnisse werden auch von S. C. Stebner et al. (2021) bestätigt, die zur Entwicklung eines Softsensors beim Freiformbiegen ebenfalls die Härte per UCI-Messungen an Rundrohren aus P235TR1 bestimmt haben und dabei ebenfalls eine Unterschätzung des Grundmaterials und eine leichte Überschätzung des Schweißnahtbereichs feststellen konnten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die UCI-Härtemessung durchaus geeignet ist, um die Härte an freiformgebogenen Bauteilen zu bestimmen. Aufgrund der geringen Größe und des flexiblen Handlings der UCI-Sonde kann die Härte auch an schwer zugänglichen Stellen zerstörungsfrei gemessen werden. Insgesamt liefert die UCI-Messung einen geeigneten Wert, um damit die Härte bestimmen zu können und qualitative Vergleiche anstellen zu können trotz eines Fehlers im Grundmaterial von ca. 10 %.

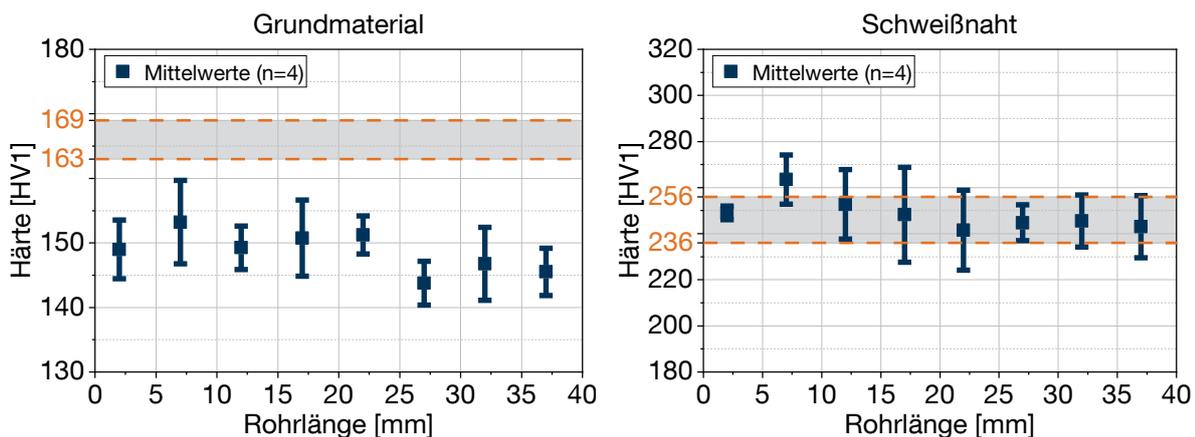


Abbildung 5.6: UCI-Härtemessung für das Grundmaterial und die Schweißnaht auf der Oberfläche (Referenzbereich Vickers-Härtemessung = graue Schattierung)

5.2.2 Eigenspannungen

Bereits die Literatur zeigt, dass Schwankungen in den geometrischen und mechanischen Eigenschaften zu Abweichungen in der Geometrie und der geforderten Bauteilqualität führen kann, wobei dies sowohl für Blechbauteile als auch für gebogene Bauteile gilt (Hartmann et al., 2018; Da-xin et al., 2009). Insbesondere Eigenspannungen können auf der einen Seite zu einem schnelleren Bauteilversagen oder zu Abweichungen in nachgelagerten Prozessen führen, bieten auf der anderen Seite aber das Potential umformtechnisch hergestellte Bauteile positiv zu beeinflussen (Volk et al., 2021). In den Arbeiten von Krause et al. (2021, 2022) wurde bereits erfolgreich gezeigt, dass die relative Veränderung des BHN-Signals und der Intensität genutzt werden kann, um Rückschlüsse auf die Veränderung der Härte oder der verwendeten Temperatur der Wärmebehandlung zu ziehen. Darüber hinaus wird in den Untersuchungen von Shimosaka et al. (2021) dargestellt, dass die Korrelation zwischen BHN-Signal und Eigenspannungszustand bei der Zerspanung möglich ist, obwohl das BHN-Signal sensitiv auf relative Änderungen in den Eigenspannungen und der Mikrostruktur reagiert. Diese Sensitivität wurde ebenfalls in der Arbeit von Lindgren und Lepistö (2002) für geschweißte Stahlrohre vom Typ S235JRG2 festgestellt. Wobei Lindgren und Lepistö (2002) den Eigenspannungszustand zwischen geglühten und nicht geglühten Proben mit Hilfe von BHN-Messungen untersuchte und eine gute Korrelation in axialer Richtung mit Referenzmessungen (Bohrlochmethode und Röntgenbeugung) identifizieren konnte. Um Aussagen über den Eigenspannungszustand oder dessen Veränderung beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize zu treffen, muss eine geeignete Methode zur Bestimmung der Eigenspannung oder zur Bewertung der relativen Änderung des Spannungszustandes identifiziert werden. Zur Lösung dieser Herausforderung wird in der vorliegenden Arbeit auf einen mikromagnetischen Sensor gesetzt, der in der Lage ist das BHN zu messen und mit dessen Signalanalyse Rückschlüsse auf die relative Veränderung des Eigenspannungszustandes möglich sind. Das physikalische Prinzip der Messung des BHN und der Aufbau des BHN-Sensors wurden bereits in Kapitel 4.3.3 beschrieben und nun folgt die Anwendung des Sensors, die Erläuterung der Methode zur Auswertung des BHN-Signals und die Validierung über einfache sowie zyklische Rohrzug- und Rohrdruckversuche an Rohrabschnittsproben. Da es sich beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize um einen drucküberlagerten Prozess entlang der Rohrlängsachse handelt, liegt der Fokus der folgenden Untersuchungen auf der Messung der Veränderung des axialen Spannungszustandes.

Zur Auswertung der Messergebnisse des BHN-Sensors wird auf ein nachgelagertes Post-Processing gesetzt. Die Darstellung der einzelnen Schritte ist in Abbildung 5.7 dargestellt und wird im Folgenden erläutert. Das grundsätzliche BHN-Signal ist ein zweidimensionales Signal mit den Achsen Amplitude und Zeit, das vom Messsystem mittels einer Spektralanalyse abge-

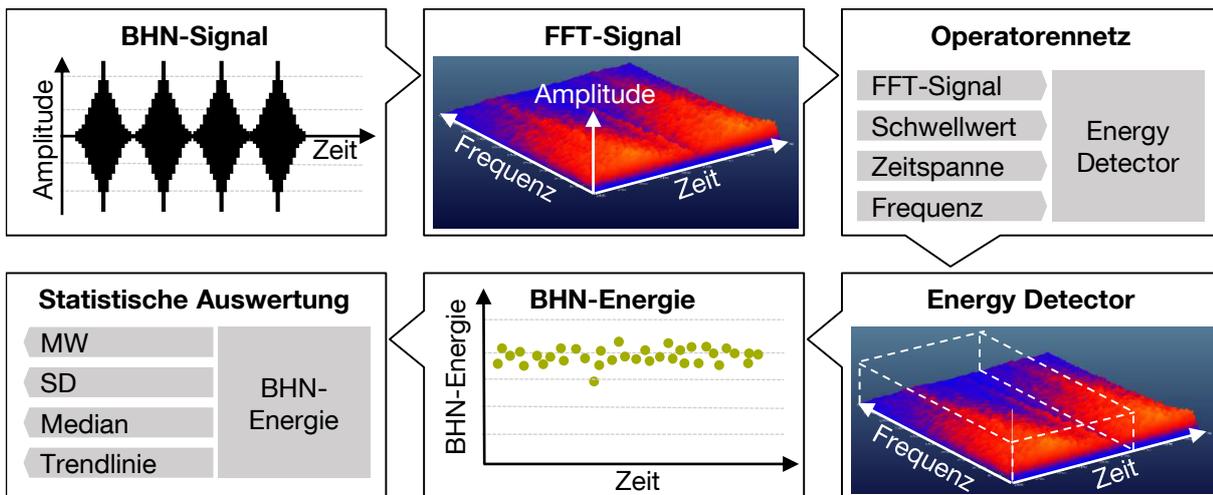


Abbildung 5.7: Darstellung der Auswertemethodik des zweidimensionalen BHN-Signals über ein Operatorennetz mithilfe des Energy-Detectors (ED) und anschließende statistische Auswertung des Energie-Zeit-Diagramms

tastet wird. Nach Krause et al. (2021) handelt es sich um eine Hoch-Frequenz-Impuls-Messung, weswegen die Sensorsignale einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) unterzogen werden. Das FFT-Signal wird in Echtzeit auf dem Messrechner als dreidimensionalen Landschaft mit den Achsen Amplitude, Zeit und Frequenz visualisiert. Dabei wird die Amplitude mit keiner Einheit versehen, sondern die Ausgabe erfolgt mittels einer energieäquivalenten Hilfsgröße (im Folgenden BHN-Energie genannt), wobei es sich um die Amplitudensummen handelt, die in einem festlegbaren Zeit-Frequenz-Intervall berechnet und mit der Vorverstärkung faktorisiert werden (Krause et al., 2021). Nach Krause et al. (2021) handelt es sich „... physikalisch betrachtet – um die verrichtete magnetische Arbeit oder den Flächeninhalt der magnetischen Hysterese“. Durch die FFT des zweidimensionalen BHN-Signals können mehr Informationen aus dem Signal entnommen und diese für Korrelationen herangezogen oder auf Änderungen hin untersucht werden. Um die Analyse des FFT zu vereinfachen, wird die softwareinterne Funktion eines Operatorennetzes verwendet. Ein Operatorennetz stellt dabei ein Zusammenspiel einzelner Bausteine (Operatoren) da, die entweder auf das zweidimensionale BHN-Signal oder das dreidimensionale FFT-Signal angewendet werden können. Zusammengesetzt ergeben einzelne Bausteine ein Netz an Auswertungen. In der vorliegenden Arbeit wird hauptsächlich der Operator namens „Energy Detector“ (dt. Energiedetektor, ED) eingesetzt. Dieser Operator erstellt auf Basis des FFT-Signals und diverser Eingangsparameter, wie beispielsweise eines auszuwertenden Frequenzbereichs oder eines notwendig zu überschreitenden Amplitudenschwellwerts, einen Auswertebereich in einer gewissen Zeitspanne. Die Zeitspanne wird dabei so gewählt, dass immer genau ein BHN-Hügelsignal (entspricht dem Durchlaufen der magnetischen Hysterese, bis zur Ummagnetisierung) innerhalb des Auswertebereichs liegt. Anschließend werden alle

Amplitudenwerte, die sich innerhalb des gewählten Frequenzspektrums und Zeitbereichs befinden und über dem Amplitudenschwellwert liegen, zu einem einzigen skalaren Wert aufsummiert. Das Auswerterechteck wird über den gesamten Zeitbereich der Messung verschoben, wodurch das gesamte dreidimensionale FFT-Signal in einem zweidimensionalen Energie-Zeit-Diagramm dargestellt werden kann. Änderungen in der Intensität des BHN-Signals spiegeln sich dementsprechend auch in Änderungen in dem zweidimensionalen Energie-Zeit-Diagramm wieder, können aber deutlich einfach analysiert werden. Das Energie-Zeit-Diagramm wird abschließend mittels statistischer Methoden, wie z. B. Mittelwert und Standardabweichung ausgewertet und analysiert sowie die erzielten Ergebnisse interpretiert.

Um die prinzipielle Funktionsweise des BHN-Sensors zu zeigen und die Veränderung des BHN-Signals bei Veränderung des überlagerten Spannungszustandes zu analysieren, werden kontinuierliche und zyklische Rohrzug- und Rohrdruckversuche an Rohrabschnittsproben durchgeführt. Abbildung 5.8 zeigt den schematische Versuchsaufbau mit den Verbindungen zwischen Universalprüfmaschine, Werkstück und Datenauswertung sowie eine beispielhafte zyklische Belastungskurve.

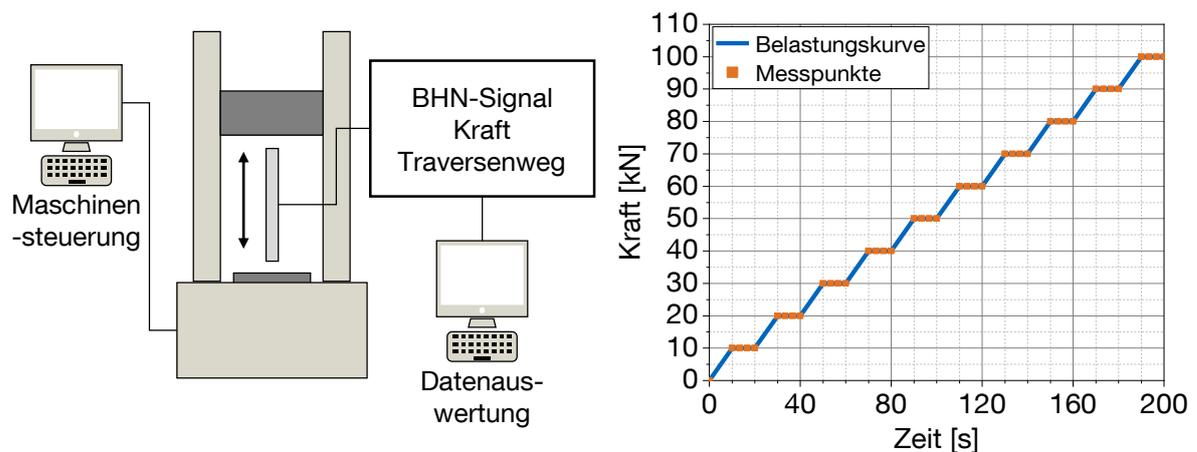


Abbildung 5.8: Versuchsaufbau und Belastungskurve des zyklischen Zug- und Druckversuchs an ganzen Rohrabschnitten zur Validierung der Auswertemethodik des mikromagnetischen BHN-Sensors

Zur Versuchsdurchführung werden Rohrabschnitte mit einer Länge von 300 mm gefertigt, in der Universalprüfmaschine (ZwickRoell Z150) mit kontinuierlichen und zyklischen Zug- und Druckbelastung beaufschlagt und gleichzeitig mit dem BHN-Sensor gemessen. Bei der kontinuierlichen Belastung steigt die Kraft linear mit 1 kN/s an, bis die Endbelastung von 100 kN erreicht ist. Durch die kontinuierliche Belastung soll der Zusammenhang zwischen Veränderung der Spannungen im Werkstück und Veränderungen im BHN-Signal hergestellt werden. Zusätzlich zur kontinuierlichen wird die zyklische Belastungskurve sowohl beim Rohrdruckversuch als

auch beim Rohrzugversuch verwendet. Dabei wird die Belastung um 1 kN/s gesteigert und alle 10 s ein konstanter Bereich mit gleichbleibender Kraft bei einer Haltezeit von ebenfalls 10 s eingeführt. Die zyklische Belastungskurve dient dazu die gewählte Messzeit des BHN-Sensors von 0,25 s für die Einzelmessungen zu validieren, indem die Ergebnisse der kurzen Einzelmessungen mit den Ergebnissen der kontinuierlichen Messungen verglichen werden. Hierzu werden in jedem Teilstück mit gleichbleibender Kraft jeweils 3 Einzelmessungen mit dem mikromagnetischen Sensor und einer Messzeit von 0,25 s aufgenommen (vgl. Abbildung 5.8). Die Ergebnisse der Versuche sind in Abbildung 5.9 dargestellt und zeigen im oberen Bereich den Verlauf der ausgewerteten BHN-Energie über die Zeit in Zusammenhang mit der aufgenommenen Kraft-Weg-Kurve der Traverse für die kontinuierlichen Versuche. Um die Ergebnisse besser interpretieren zu können, ist in dem jeweiligen Diagramm auch der gleitende Mittelwert dargestellt. Im unteren Teil der Abbildung 5.9 sind die Ergebnisse der Einzelmessungen aus den zyklischen Versuchen dargestellt. Die dargestellten Mittelwerte und Standardabweichungen ergeben sich nach Durchlaufen der bereits bekannten Auswertemethodik aus Abbildung 5.7.

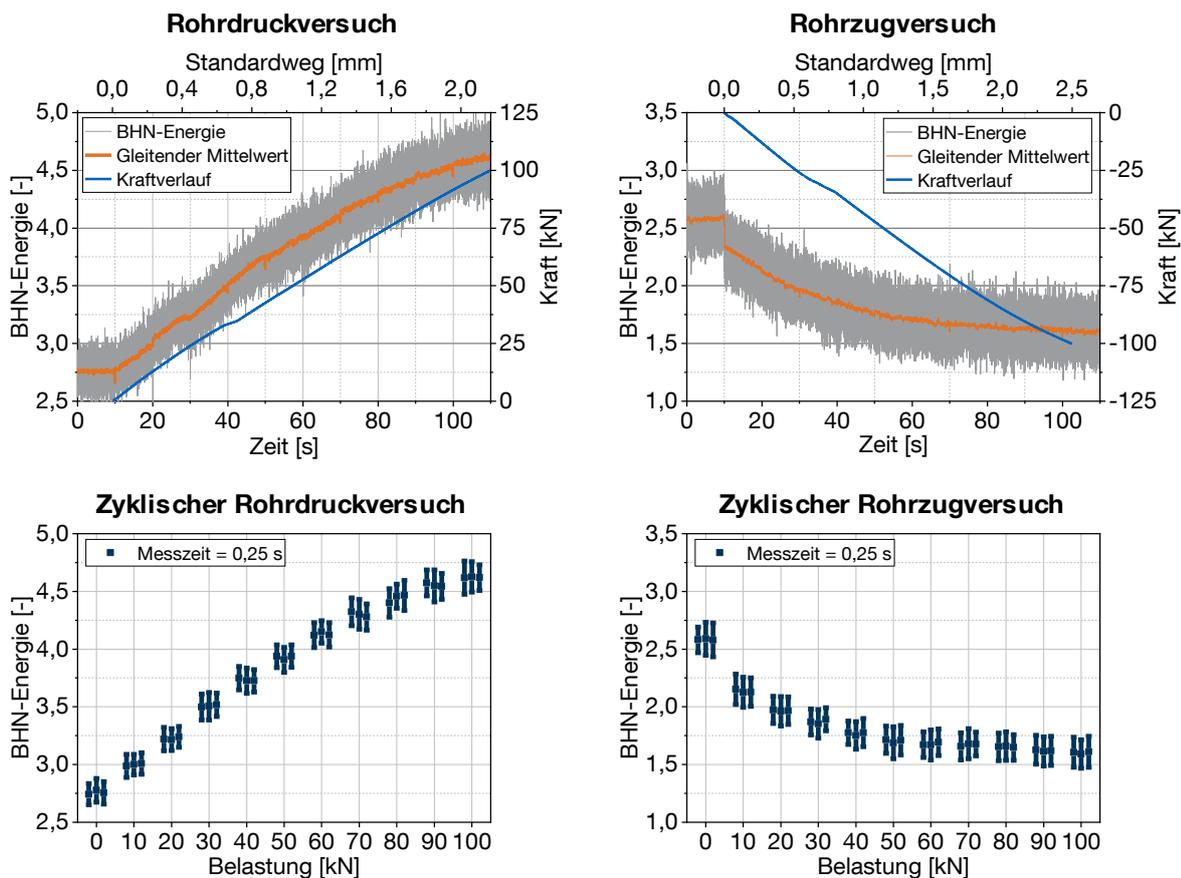


Abbildung 5.9: BHN-Energie und Kraft-Weg-Diagramm der Traverse für die kontinuierlichen und zyklischen Rohrzug- und Rohrdruckversuche

Betrachtet man die dargestellten Ergebnisse, dann ist ein eindeutiger Unterschied zwischen der ausgewerteten BHN-Energie des Rohrdruckversuchs und des Rohrzugversuchs zu erkennen. Es fällt direkt ins Auge, dass bei ansteigender Druckbelastung das BHN-Energielevel ansteigt, während bei ansteigender Zugbelastung die BHN-Energie abfällt. Dieser Trend ist sowohl bei den kontinuierlichen als auch bei den zyklischen Versuchen zu erkennen. Sieht man sich nun die Ergebnisse der kontinuierlichen Versuche detaillierter an, dann scheint es so, dass sich sowohl beim Rohrdruckversuch als auch beim Rohrzugversuch nach einer gewissen Belastung eine Sättigung einstellt. Dabei steht die Sättigung in Zusammenhang mit der Verformung des Werkstückes. Im Vergleich zum Rohrdruckversuch wird die Rohrabschnittsprobe beim Zugversuch stärker umgeformt, da sich bei der Endbelastung ein höherer Standardweg der Traverse ergibt. Aus diesem Grund ist die Sättigung beim Rohrzugversuch stärker ausgeprägt als im Vergleich zum Rohrdruckversuch. Der gleitende Mittelwert beider Versuche zeigt diesen Unterschied am deutlichsten. Dies bedeutet weiterhin, dass eine darüber hinaus ansteigende Belastung keinen weiteren Anstieg oder kein weiteres Abfallen der BHN-Energie zur Folge hat. Aufgrund der Belastungsgrenze bei 100 kN kann über den genauen Zeitpunkt der Sättigung jedoch keine Aussage anhand der vorliegenden Daten getroffen werden. Im unteren Bereich der Abbildung 5.9 sind die Ergebnisse der Einzelmessungen während der zyklischen Versuche abgebildet. Auch hier ist der selbe Trend im Signal der BHN-Energie zu erkennen, wie bei den kontinuierlichen Versuchen (Sinkende Intensität bei Zugbelastung, steigende Intensität bei Druckbelastung). Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass die Messungen mit der kurzen Messzeit von 0,25 s eine gute Reproduzierbarkeit liefern und die Messergebnisse in einer akzeptablen Streubreite liegen.

Durch den Zusammenhang zwischen einachsiger Belastung und dem vorliegenden Spannungszustand lässt sich schlussfolgern, dass die BHN-Energie als geeigneter Indikator für Spannungsveränderungen dient. Mit den Ergebnissen lässt sich zeigen, dass überlagerte Druckspannungen zu einem Anstieg der BHN-Energie führen, wohingegen Zugspannungen zu einem Abfall der BHN-Energie führen. Auf Basis der Ergebnisse kann jedoch keine quantitative Korrelation erstellt werden, da hierzu die Spannungswerte explizit bestimmt werden müssten. Für eine qualitative Aussage der Veränderung des Spannungszustandes ist die vorgestellte Methodik geeignet. Darüber hinaus ist festzuhalten, dass Einzelmessungen mit einer Messzeit von 0,25 s ebenfalls geeignet sind, um Aussagen über Änderungen im vorliegenden Eigenspannungszustand zu treffen.

5.3 Bewertung der Ergebnisse

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Methoden und Auswertungen zur Bestimmung geometrischer als auch mechanischer Eigenschaften für Halbzeuge und freiformgebogene Bauteile erläutert. Bei den geometrischen Eigenschaften wurde insbesondere auf die Biegegeometrie und die Querschnittsgeometrie und dessen optische Vermessung und Auswertung eingegangen. Bei den mechanischen Eigenschaften steht die Härte durch UCI-Härtemessungen und insbesondere die Messung der Veränderungen im Eigenspannungszustand mittels mikromagnetischer Sensorik und die entsprechende Analyse des BHN-Signals im Fokus. Dabei konnten die gewählten Sensoren und deren Mess- und Auswertemethodik anhand von ungebogenen Halbzeugen und ausgewählten Prüfbauteilen auf deren Eignung untersucht und erfolgreich validiert werden.

Für die geometrischen Eigenschaften konnte gezeigt werden, dass sich sowohl Biegewinkel als auch Biegeradius über die optisch gemessenen Oberflächennetze bestimmen lassen. Durch die geraden und ungebogenen Enden beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize ist eine Bestimmung des Biegewinkels für einfache zweidimensionale Bögen sehr leicht und präzise möglich. Für mehrdimensionale, komplexe und übergangslose Biegungen lässt sich das Verfahren nicht mehr anwenden und es muss auf die von Groth (2020) erarbeitete Methodik der Integration der Kurvenkrümmung zur Bestimmung des Biegewinkels zurückgegriffen werden. Hierbei wird der Verlauf des Biegewinkels über den Flächeninhalt unter dem Graphen der Krümmungsfunktion in Abhängigkeit von der Bogenlänge numerisch mit Hilfe der Trapezregel nach Stoer et al. (2005-) angenähert. Da in dieser Arbeit nur zweidimensionale Biegungen untersucht werden, findet die Methode hier keine Anwendung. Für die Bestimmung der Querschnittsgeometrie wird ebenfalls auf die optischen Messdaten zurückgegriffen, da der Verlauf des Außendurchmessers bei gebogenen Bauteilen bei der Bestimmung der Biegelinie oder Schwerpunktlinie einfach berechnet werden kann. Durch die mehrfachen Schnitte entlang der Rohroberfläche entstehen Segmente durch die Kreise gefittet werden können und woraus sich anschließend beispielsweise die Rundheit aller Elemente ermitteln lässt. Daraus kann wiederum geschlossen werden wie stark das Bauteil nach der Biegung von der optimalen Querschnittsgeometrie abweicht. Darüber hinaus kann der Wanddickenverlauf durch zerstörende Verfahren, wie beispielsweise auftrennen des gebogenen Bauteils im konstanten Bereich gemessen werden. Da sich dieses Verfahren jedoch nur zerstörend durchführen lässt, wird in der Arbeit darauf verzichtet und die Querschnittsgeometrie über den Verlauf des Außendurchmessers bewertet. Für die angelieferten Halbzeuge lies sich bereits erkennen, dass die Fertigungstoleranzen in Bezug auf den Außendurchmesser eingehalten werden konnten. Für die gemessenen Wanddicken liegen die Werte an der unteren

Grenze des Toleranzbereichs und teilweise bereits außerhalb. Dies sollte jedoch keinen negativen Einfluss auf den Freiformbiegeprozess haben, sondern vor allem das Beladen der Maschine vereinfachen.

Bei der Bestimmung der mechanischen Eigenschaften stehen die Härte und die qualitative Bestimmung der Veränderung der Eigenspannungen im Vordergrund. Für beide Eigenschaften werden zerstörungsfreie Messmethoden verwendet, um die Auswirkungen durch den Freiformbiegeprozess zu identifizieren. Die Härte wird durch das UCI-Verfahren bestimmt, welches mittels Frequenzverschiebung die Vickershärte auf der Oberfläche des Bauteils messen kann. Da das verwendete Messgerät handgeführt ist, können Abweichungen in den Messungen auftreten. Dies zeigt sich auch in den Ergebnissen und im Vergleich mit der Härtemessung nach Vickers, denn das UCI-Gerät neigt zur Unterschätzung der Härte im Grundmaterial. Insgesamt lassen sich bei aufbereiteten Messstellen mit dem UCI-Gerät akzeptable Messergebnisse erzielen, die nicht den hundertprozentig richtigen quantitativen Wert ergeben, aber eine Bewertung der qualitativen Veränderung zulassen. Ebenfalls eine qualitative Aussage lässt sich über die Veränderung der Eigenspannungen beim Freiformbiegen durch die Analyse des BHN-Signals erzielen. Die Ergebnisse aus Kapitel 5.2.2 zeigen, dass bei steigender Druckbelastung die Intensität der ausgewerteten BHN-Energie ansteigt, während bei steigender Zugbelastung die Intensität abnimmt. Aufgrund der uniaxialen Belastung und dem Zusammenhang zwischen Spannungen und Verformung kann der gleiche Zusammenhang auch für Zug- und Druckspannungen angenommen werden. Steigen die Druckspannungen im Werkstück an, so hat dies eine gesteigerte BHN-Energie zur Folge, während Zugspannungen eine Reduzierung der BHN-Energie bewirken. Diese Ergebnisse stehen in Einklang mit Ergebnissen aus unterschiedlichen Studien, beispielsweise Lindgren und Lepistö (2001), Lindgren und Lepistö (2003) oder Neslušán et al. (2020), die alle eine Zunahme des BHN-Signals unter Druckbelastung beobachtet haben. Die Erklärung für diesen Effekt liefern ebenfalls die Arbeiten von Lindgren und Lepistö (2001) und Neslušán et al. (2020), da beide Messungen in Belastungsrichtung und senkrecht zur Belastungsrichtung durchgeführt haben und eine Richtungsabhängigkeit feststellen konnten. Wird senkrecht zur Belastung gemessen, wie es auch in der vorliegenden Arbeit der Fall ist, erhöht sich das BHN-Energielevel mit steigender Druckbeanspruchung, während steigende Zugbelastung einen Abfall des BHN-Energielevels bewirkt. Aufgrund der speziellen Bauweise des mikromagnetischen Sensors, mit einer speziell an Rundrohren angepassten Spitze, konnten keine Messungen parallel zur Belastungsrichtung der Rohre durchgeführt werden, da hier der Abstand zwischen Messkopf und Bauteiloberfläche zu groß war. Die Ergebnisse des Kapitel 5.2.2 zeigen ebenfalls, dass eine qualitative Aussagen über die Veränderung des Eigenspannungszustands über die Analyse des BHN-Energielevels zulässig und aussagekräftig ist. Um jedoch eine quantitative Aussage über die Höhe der Eigenspannungen an der Messstelle zu erhalten,

müssen weitere Charakteristika des BHN-Signals untersucht werden. So liefern beispielsweise S. Stebner et al. (2023)¹ einen Ansatz, der die Form der BHN-Hügel mit in Betracht zieht und über einen Symmetriefaktor und XRD-Messungen Korrelationen zwischen der Höhe der Eigenspannungen und dem BHN-Signal liefert. Da sich die Ergebnisse zum Zeitpunkt dieser Arbeit noch im Forschungsstadium befinden, wird nicht auf die quantitative Bestimmung der Eigenspannungen durch das BHN-Signal eingegangen, sondern der Fokus auf die qualitativen Aussagen über die Veränderung der Eigenspannungen beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize gelegt. Um die Wirkzusammenhänge und Einflussfaktoren besser verstehen zu können wird eine virtuelle Abbildung des Freiformbiegens mit bewegter Matrize benötigt. Damit kann das Prozessverständnis deutlich erhöht werden und darüber hinaus prozessrelevante Stör- und Einflussgrößen identifiziert und die Auswirkungen deren Veränderung isoliert betrachtet werden. Aus diesem Grund wird im folgenden Kapitel 6 der Aufbau eines numerischen Simulationsmodells des Freiformbiegeprozesses mit bewegter Matrize vorgestellt und im Zuge dessen auch auf die Validierung des Modells über reale Biegeversuche eingegangen.

¹Dieses Manuskript wurde am 15. Mai 2023 im Special Issue „Electromagnetic Measurements for Non-Destructive Metal Monitoring at Micro and Macro Scale“ eingereicht und befindet sich noch im Veröffentlichungsprozess (Stand 20.09.2023)

6 Simulationsmodell

Im folgenden Kapitel wird ein numerisches Simulationsmodell des Freiformbiegeprozesses mit bewegter Matrize aufgebaut und anhand von experimentellen Biegegeometrien validiert. Das Simulationsmodell soll im weiteren Verlauf der Dissertation als virtuelles Labor genutzt werden, um zum einen neue Kombinationen der zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade auszuprobieren und zum anderen die Grenzen des Prozesses festzulegen. Dies soll dazu dienen, dass ohne Versuchsaufwände und der Gefahr einer Kollision des Biegebauteils mit der Anlage neue Ansätze und Freiheitsgrade gefunden und erforscht werden können, mit dem Ziel die mechanischen Eigenschaften entkoppelt von den geometrischen Eigenschaften zu beeinflussen. Darüber hinaus erlaubt das Simulationsmodell auch einen deutlich detaillierten Einblick in die Veränderung der mechanischen Eigenschaften während des Biegeprozesses und kann dadurch das Prozessverständnis deutlich erweitern.

6.1 Experimentelle Biegeversuche

Zu Beginn des Kapitels werden zweidimensionale Biegeversuche durchgeführt, um die Bewegungskinetik der Freiformbiegemaschine abzuleiten und um die numerische Simulation im weiteren Verlauf zu validieren. Die Versuche sollen neben dem Zusammenhang zwischen Maschinenkinematik und Biegegeometrie auch Erkenntnisse über die zu erreichende Präzision und die Wiederholgenauigkeit liefern. Die gebogenen Bauteile werden anhand der in Kapitel 5 vorgestellten Methoden ausgewertet, wobei der Fokus auf den geometrischen Eigenschaften liegt. Wie bereits die Arbeiten von Beulich (2022) oder Werner et al. (2021) zeigten, ergibt sich für jeden Werkstoff und jeden Querschnitt beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize ein eigener charakteristischer Verlauf des Biegeradius in Abhängigkeit von der Matrizenauslenkung. Um diesen charakteristischen Verlauf für die geschweißten Rundrohre aus P235TR1 generieren zu können, müssen eine Vielzahl an einzelnen Biegungen durchgeführt werden.

In einer ersten Versuchsreihe werden zweidimensionale Biegegeometrien gefertigt, die sich sowohl im Biegeradius als auch im Biegewinkel unterscheiden. Die Biegebauteile werden anschließend in Bezug auf den Biegeradius R im konstant gebogenen Bereich (vgl. Abbildung 5.3) und den Biegewinkel α zwischen den Schenkeln analysiert. Für die Versuche wird die Biegemaschine mit dem bereits bekannten Werkzeugkomponenten bestückt und als Halbzeuge werden

geschweißten Rundrohre aus P235TR1 verwendet, deren geometrische und mechanische Kennwerte Kapitel 4.2 entnommen werden können. Die Biegemaschine wird per Hand von vorne mit den Rundrohren beladen, wobei die Rohre ohne weitere Vorbehandlung direkt im Anlieferungszustand eingesetzt werden. Beim Beladen wird darauf geachtet, dass die Schweißnaht der Rohre um 90° versetzt zur Biegerichtung beladen werden. Da in den Versuchen die Biegerichtung vorher auf die yz-Ebene festgelegt wurde, wird die Schweißnaht in positive x-Richtung platziert. Die Positionierung wird so gewählt, dass die Schweißnaht möglichst im Bereich der neutralen Faser liegt und nicht im stärker belasteten Innen- oder Außenbogen. Dadurch soll verhindert werden, dass die Schweißnaht einen hohen Einfluss auf das Biegeergebnis hat und somit die Ergebnisse verfälschen könnte. Bei der Versuchsdurchführung wird zunächst mit einem großen Biegeradius (entspricht kleiner Matrizenauslenkung und geringer Rotation) gestartet und der Biegeradius schrittweise erhöht. Insgesamt werden 13 unterschiedliche Biegeradien untersucht und ausgewertet. Abbildung 6.1 zeigt die Ergebnisse der Auswertung des Biegeradius aufgetragen über die Matrizenauslenkung in y-Richtung. In der Abbildung 6.1 sind die Versuche V1-V7 markiert, welche zur Beurteilung der Wiederholgenauigkeit verwendet werden und insgesamt jeweils 3 mal wiederholt wurden. Die ausgewählten Versuchsbauteile sind auf der rechten Seite der Abbildung 6.1 abgebildet und in Tabelle 6.1 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Versuche aufgetragen.

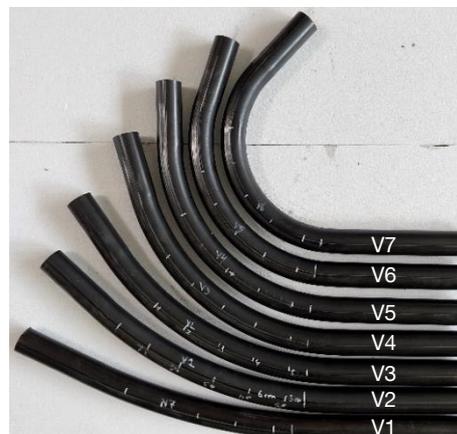
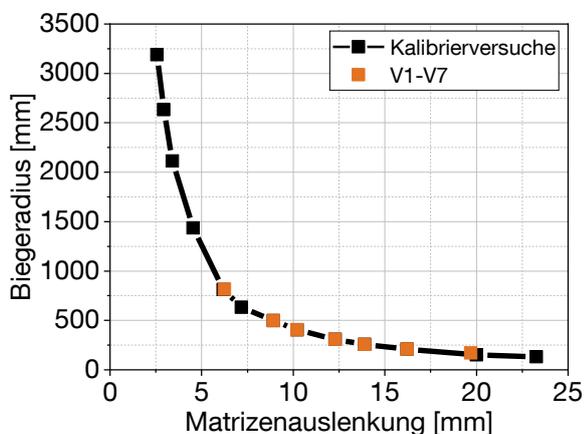


Abbildung 6.1: Zusammenhang zwischen Matrizenauslenkung und Biegeradius einzelner zweidimensionaler Bögen für geschweißte Rundrohre vom Typ P235TR1

Die Ergebnisse zeigen einen charakteristischen Verlauf des Biegeradius, welcher einer Hyperbel ähnelt. Mit steigender Matrizenauslenkung flacht die Kurve des Biegeradius immer weiter ab und bei kleinen Auslenkungen muss zuerst eine gewisse Grenze überschritten werden, um einen Radius erzeugen zu können. In Bezug auf kleine Auslenkungen lässt sich das untere Limit über die elastischen Rückfederung erklären. Um einen Radius biegen zu können, muss die Matrize

mindestens so weit ausgelenkt werden, um den elastischen Bereich zu überwinden und eine bleibende plastische Formänderung zu erwirken. Im Bereich großer Auslenkungen sind die Grenzen vor allem durch die Maschine gesetzt, da ab einer gewissen translatorischen Verschiebung die Motoren ihre Limits erreichen und darüber hinaus die Gefahr einer Kollision deutlich ansteigt. Des Weiteren kommt es bei zu hohen Matrizenauslenkungen auch zu Defekten, wie Risse oder Falten am Biegebauteil.

Tabelle 6.1: Aus jeweils 3 Biegeversuchen gemittelter Biegeradius und Biegewinkel für zweidimensionale Bögen

Name	R_{Soll} mm	α_{Soll} °	R_{Ist} mm	α_{Ist} °	ϵ_R %	ϵ_W %
V1	750,00	30,00	816,45 ± 3,55	27,73 ± 1,34	8,86	-7,75
V2	500,00	45,00	498,83 ± 0,13	49,61 ± 0,07	-0,23	10,24
V3	400,00	56,25	404,06 ± 0,90	61,67 ± 0,31	1,02	9,64
V4	300,00	75,00	308,43 ± 0,51	80,70 ± 0,24	2,81	7,60
V5	250,00	90,00	257,17 ± 0,56	95,74 ± 0,27	2,87	6,38
V6	200,00	112,50	209,29 ± 0,97	113,46 ± 0,34	4,64	0,85
V7	150,00	150,00	169,08 ± 0,02	133,22 ± 1,57	12,72	-11,19

Die Versuche V1 – V7 wurden jeweils 3 mal durchgeführt, um die Wiederholgenauigkeit der Freiformbiegemaschine zu überprüfen. Die Ergebnisse für den Biegeradius und den Biegewinkel aus den jeweiligen Versuchen sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst. Dabei sind auch die zu erreichenden Sollradien und -winkel aufgeführt, die gleichzeitig als Eingabewerte in die grafische Benutzeroberfläche der Biegeanlage dienen. Zudem sind der Mittelwert und die Standardabweichung der Messwerte in der Tabelle angegeben. Dabei ist zu erkennen, dass sich sowohl für den Radius als auch für den Winkel eine sehr gute Wiederholgenauigkeit über alle Bauteile hinweg zeigt. Die Standardabweichung liegt maximal bei 3,55 mm für einen Radius über 800 mm und wird bei sehr engen Biegungen sogar auf 0,02 mm reduziert. Daran zeigt sich, dass zum einen engere Biegungen besser reproduzierbar sind als größere Biegungen, was am höheren Umformgrad liegt und zum anderen der Biegeradius bei engeren Biegungen besser und konstanter bestimmt werden kann. Bei den Winkelabweichungen zeigt sich ein ähnliches Bild, wobei die Abweichungen der Winkel in den Versuchen V2-V6 deutlich geringer sind als im Vergleich zu den Biegeversuchen V1 und V7.

Zusammenfassend zeigen die Versuche, dass sich ein charakteristischer Zusammenhang zwischen Halbzeug, Matrizenauslenkung und resultierenden Biegeradius erarbeiten lässt und die Freiformbiegemaschine darüber hinaus für die verwendeten Halbzeuge eine hohe Wiederholgenauigkeit liefert. Da es sich bei den Versuchen, um Kalibrierversuche zum einen für die Anlage,

aber zum anderen auch für das Simulationsmodell handelt, sind weitere Iterationsschleifen zur Erhöhung der Genauigkeit des Biegeprozesses nicht notwendig. Auch festzuhalten ist, dass die Biegecharakteristik für jede Veränderung des Werkstoffs oder des Querschnitts erneut durchgeführt werden muss, um einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Materialverhalten und der Maschinenkinematik herstellen zu können.

6.2 Numerische Modellierung des Freiformbiegeprozesses

Für die detaillierte Analyse der Auswirkungen auf die geometrischen und mechanischen Eigenschaften im Rahmen der Sensitivitätsanalyse der prozessrelevanten Stell- und Einflussgrößen in Kapitel 7 wird im folgenden Abschnitt auf den Aufbau des virtuellen Modells des Freiformbiegeprozesses mit bewegter Matrize eingegangen. Diverse Arbeiten (u.a. Beulich, 2022, Werner et al., 2021, Guo et al., 2020) haben sich bereits mit der numerischen Modellierung des Freiformbiegeprozesses beschäftigt. Dabei wurde erkannt, dass neben der genauen Abbildung der Werkzeuggeometrien und der Maschinenkinematik auch das elastisch-plastische Verhalten des Halbzeuges detailliert ermittelt und in die Simulation übertragen werden muss. Im Folgenden wird zunächst auf die Bestimmung der Materialkennwerte für das Simulationsmodell eingegangen, welches im Anschluss detailliert vorgestellt wird.

Es gibt verschiedene Ansätze, um die Materialkennwerte von Rundrohren zu ermitteln. Beulich (2022) wählte beispielsweise den Weg, Zugproben aus dem Blechwerkstoff herzustellen und daraufhin den Rohrformprozess zu simulieren. Anschließend wurden die Simulationsergebnisse als Grundlage für das Simulationsmodell des Freiformbiegeprozesses verwendet. Einen anderen Ansatz verwendete Borchmann (2021), die Zugproben am gesamten Rohr durchführte und daraus die Materialkennwerte für die Simulation bestimmte. In der vorliegenden Arbeit werden die Materialkennwerte ebenfalls anhand von Zugversuchen bestimmt. Hierzu werden sowohl für den Grundwerkstoff als auch für die Schweißnaht Proben entnommen und diese anschließend in quasistatischen Zugversuchen nach DIN EN ISO 6892-1:2019 untersucht. Bei den Proben handelt es sich um Miniatur-Zugproben, um die Effekte der Oberflächenkrümmung zu minimieren und eine einachsige Zugprüfung zu ermöglichen. Die entnommenen Proben für die Untersuchung der Schweißnaht wurden so gewählt, dass der reduzierte Abschnitt genau innerhalb der Schweißnaht liegt, um die Eigenschaften der WEZ vernachlässigen zu können. Dadurch ist sichergestellt, dass sich die ermittelten mechanischen Eigenschaften auf die reine Schweißnaht beziehen. Die Zugversuche wurden bei Raumtemperatur mit einer Dehnungsrate von 0,00025 1/s durchgeführt. Um den Grundwerkstoff und die Schweißnaht für eine Anwendung im Abaqus-Simulationsmodell verwenden zu können, wurde der folgende mathematische

Ansatz nach Ludwik-Voce verwendet:

$$\bar{\sigma}(\bar{\varphi}_P) = \alpha_L(b_L + A_L \times \bar{\varphi}_P^{n_L}) + (1 - \alpha_L)(k_{0,V} + Q_V \times [1 - e^{-\beta_V \times \bar{\varphi}_P}]). \quad (\text{Gleichung 6.1})$$

Mit der vorgestellten Gleichung werden die Zugversuchsdaten angepasst, um die Materialdaten im Abaqus-Simulationsmodell verwenden zu können. Die Fittingparameter können der Abbildung 6.2 entnommen werden, welche auch die für das Simulationsmodell verwendeten Fließkurven der Grundmaterials und der Schweißnaht zeigt.

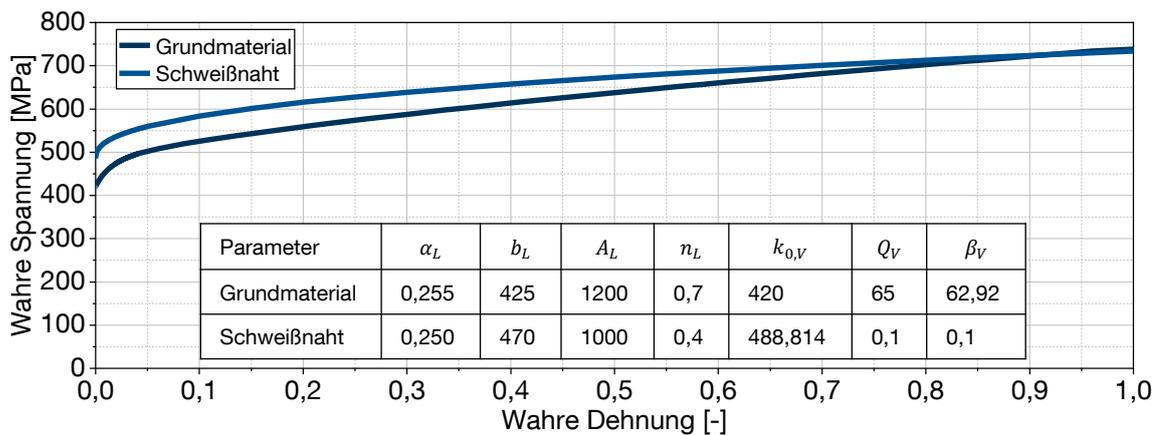


Abbildung 6.2: In das Simulationsmodell implementierte Fließkurven für das Grundmaterial und die Schweißnaht und Parameter des Ludwik-Voce Fitting

Nachdem die Materialkennwerte bestimmt und für die Verwendung in Abaqus aufbereitet wurden, geht es nun an die Modellierung des Halbzeugs, der Aktivelemente und der Prozesskinematik des Freiformbiegens mit bewegter Matrize. Hierzu wird in der Software Abaqus CAE (Version 2022) ein explizit dynamisches Modell verwendet. Die Abbildung 6.3 c) zeigt das erstellte Simulationmodell im Schnitt entlang der yz-Ebene, wobei die wichtigsten Komponenten und Prozessrandbedingungen ebenfalls markiert sind. Darüber hinaus zeigt die Abbildung 6.3 a) einen charakteristischen Verlauf einer exemplarischen Biegekinematik, wobei sich die Kurven für Rotation und Auslenkung jeweils auf die Biegematrize beziehen. Hierbei ist zu beachten, dass sich die Biegematrize entlang der x- und y-Achse translatorisch bewegen kann und dazu auch um alle drei Achsen rotiert werden kann. Die Teilabbildung b) stellt die entsprechenden Positionen der Biegematrize und des Halbzeugs zu den unterschiedlichen Zeitpunkten einer charakteristischen Freiformbiegung entlang der yz-Ebene anschaulich dar. Dabei sind die bekannten 3 Bereiche des Freiformbiegens (Anbiegen, konstanter Bereich und Nachbiegen) visualisiert. Auf die einzelnen Teilabbildungen der Abbildung 6.3 wird im Folgenden noch genauer eingegangen.

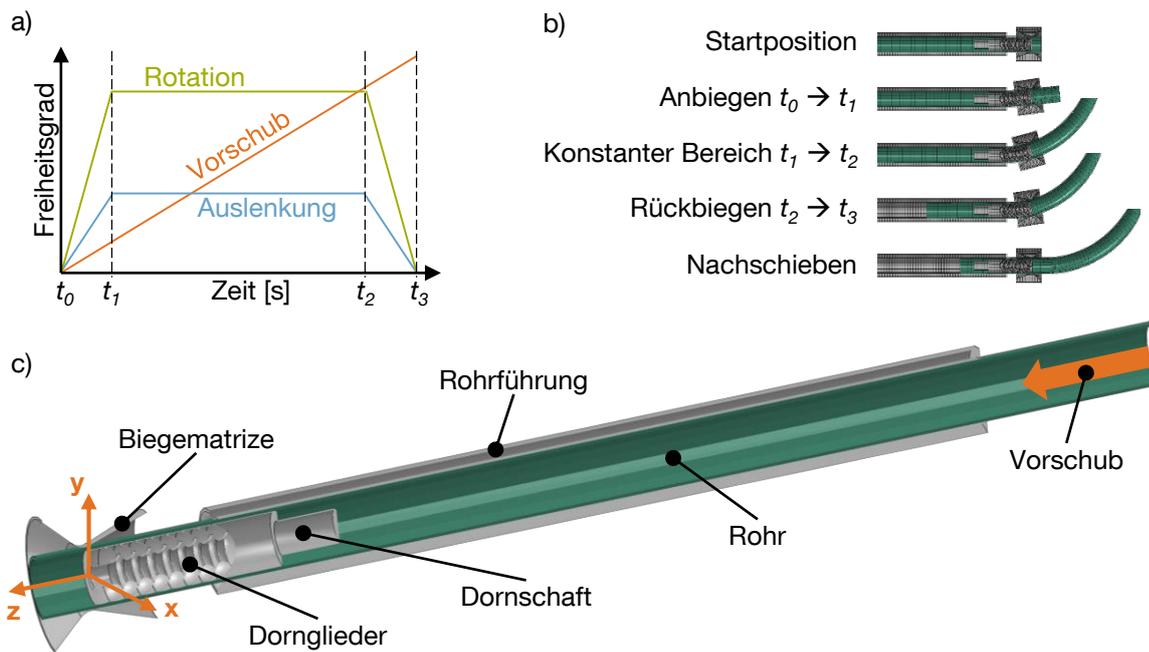


Abbildung 6.3: a) Darstellung der allgemeinen Zeit-Weg-Diagramme für die Matrizenauslenkung und -rotation sowie den konstanten Vorschub; b) unterschiedliche Bereiche während des Freiformbiegens eines zweidimensionalen Bogens; c) numerisches Freiformbiegemodell und Markierung der wichtigsten Komponenten

Um eine möglichst realitätsnahe Abbildung des Freiformbiegeprozesses zu generieren, muss das verwendete Halbzeug auch möglichst detailliert abgebildet werden. Hierzu wird zuerst ein verformbares Rundrohr mit Außendurchmesser $D_A = 42,4$ mm und Wanddicke $s = 2,6$ mm erzeugt. Bei der expliziten Simulation mit Schalenelementen vom Typ S4R wird die Wanddicke über die Materialzuweisung für Grundmaterial und Schweißnaht festgelegt, wobei insgesamt 9 Integrationspunkte über die Wanddicke verteilt werden. Das modellierte Rohr wird anschließend partitioniert, und entlang der Längsrichtung wird eine Elementreihe als Schweißnaht definiert. Diese Schweißnaht erhält das bereits erzeugte Materialmodell der Schweißnaht, während dem restlichen Rohr das Materialmodell des Grundmaterials zugewiesen wird (vgl. Abbildung 6.2). Dadurch entsteht ein Rundrohr mit Schweißnaht, welches unterschiedliche mechanische Eigenschaften bei gleicher Wanddicke vorweist. Die Schweißnahtlage kann somit, wie im Realprozess, in der Simulation angepasst und in den entsprechenden Bereich gedreht werden.

Im Anschluss daran werden die Werkzeugaktivelemente konstruiert. Hierzu werden die realen Werkzeuge mit dem optischen Geometriemessgerät digitalisiert und die Werkzeugwirkflächen anschließend detailgetreu nachkonstruiert (siehe Abbildung 4.2). Basierend auf den Ergebnissen von Beulich (2022), der mit seiner numerischen Abbildung eine gute Näherung an den realen Freiformbiegeprozess zeigt, werden die Werkzeulemente auch in der vorliegenden Arbeit als

Starrkörper modelliert. Als Werkzeugelemente werden entsprechend der Abbildung 6.3 c) die Biegematrize, die Rohrführung und der Biegedorn bezeichnet. Da der Biegedorn aus einem statischen Teil und beweglichen kugelförmigen Gliedern besteht, die in der Realität durch ein Stahlseil verbunden sind, müssen hier weitere Kontaktbedingungen eingefügt werden, um die Bewegung der Dornglieder abzubilden. Hierfür wird auf die Konstruktion der einzelnen Dornglieder zurückgegriffen, denn die Außenseite eines Dorngliedes entspricht der Innenseite des anliegenden Dorngliedes. Dementsprechend können Nebenbedingungen („Constraints“) eingefügt werden, die eine kinematische Kopplung („Kinematic coupling“) der einzelnen Dornglieder erlauben. Zusätzlich dazu wird eine weitere Nebenbedingung eingeführt, die eine Verbindung zwischen den beiden Mittelpunkten der Halbschalen herstellt. Somit ist jedes Dornglied mit seinem jeweiligen Nachbarn über eine Koppelung von Innen- und Außenfläche und über eine Kopplung der Mittelpunkte verbunden. Werden die Nebenbedingungen wie beschrieben gewählt, dann ersetzt dies das Stahlseil und die Bewegung des Dorns entspricht der realen Bewegung. Zusätzlich zu den bereits genannten Nebenbedingungen wird der Dornschaft mit einer Randbedingung beaufschlagt und in seiner Position im Raum fixiert. Die entsprechende Bedingung wird als feste Einspannung („Encastre“) bezeichnet und erlaubt weder eine Translation noch eine Rotation des Dornschafts. Die Dornglieder können sich hingegen entsprechend der Umformung des Rohrs bewegen und dabei eine Unterstützung von Innen liefern.

Die Rohrführung wird ebenfalls mit der Randbedingung der festen Einspannung beaufschlagt und entsprechend ihrer Position mit einem gewissen Abstand vom Ursprung des Koordinatensystems in negativer z-Richtung verschoben (siehe Abbildung 6.3 c)). Die Biegematrize wird entsprechend der realen Form der Wirkflächen konstruiert und der Drehpunkt der Matrize als Ursprung des gesamten numerischen Modells verwendet. Auf den Drehpunkt der Biegematrize wird über Randbedingungen die Bewegungskinematik übertragen. Dies funktioniert über ein Zusammenspiel von Randbedingungen und Amplituden. Abbildung 6.3 a) zeigt einen typischen Verlauf der Freiheitsgrade bei einer einfachen Biegung auf der yz-Ebene in positiver y-Richtung. Hierzu muss die Biegematrize translatorisch entlang der y-Achse verschoben und mit einer zusätzlichen Rotation entlang der x-Achse beaufschlagt werden. Über entsprechende Amplituden wird die Bewegungskinematik auf die Biegematrize übertragen. Die reale Biegekinematik kann in Form eines NC-Codes an der Biegemaschine ausgelesen werden und durch Transformationen in ein Amplituden-Zeit-Diagramm übersetzt werden. Dieses kann wiederum direkt in das numerische Simulationsmodell eingelesen werden. Als zusätzliche Randbedingung muss auch der Vorschub definiert werden. Hierzu wird das komplette Ende des Rohres mit einer Verschiebungsrandbedingung beaufschlagt, wodurch die konstante Vorschubgeschwindigkeit im Prozess simuliert werden kann.

Nachdem sowohl das Halbzeug als auch die einzelnen Werkzeugaktivelemente modelliert und mit Randbedingungen versehen wurden, sind noch die allgemeinen numerischen Einstellungen, wie beispielsweise die globalen Kontaktbedingungen, Tribologie und weitere Parameter festzulegen. Als Kontaktbedingung wird der allgemeine Kontakt („General contact“) verwendet, der es erlaubt, dass prinzipiell jede Fläche mit jeder Fläche in Kontakt tritt. Da in dem Simulationsmodell lediglich die Wirkflächen der Werkzeuge konstruiert wurden, ist die Verwendung des allgemeinen Kontakts durchaus logisch und zulässig. Um die genaue Wechselwirkung zwischen den Flächen noch realitätsnaher zu gestalten, wird der sogenannte „Penalty-Contact“ verwendet, welcher die Reibung zwischen den Kontaktflächen definiert und eine stabile und effiziente Simulation zulässt. Als zusätzliche Bedingung wird ein konstanter Coulomb-Reibwert eingeführt, um die Reibung zu modellieren. Nach Beulich (2022) ist die Verwendung der Coulomb'schen Reibung zulässig, da mehrdimensionale Reibmodelle, die speziell für die Blechumformung entwickelt wurden, aufgrund der unterschiedlichen Prozessführung und Beölungseigenschaften der Halbzeuge nicht direkt auf das Freiformbiegen übertragbar sind. Die Festlegung der konstanten Reibzahl stellt eine wichtige Stellgröße für das Ergebnis der Simulation dar. Von Gantner et al. (2007) wurde eine Reibzahl von 0,04 beim Biegen von Vierkantprofilen aus Stahl mittels mehreren Rollen verwendet. Aufgrund der unterschiedlichen Beölung der Halbzeuge verwendet Beulich (2022) in seinem Simulationmodell für das Biegen von Rundrohren aus Aluminium unterschiedliche konstante Reibwerte zwischen 0,06 – 0,10. Für das verwendete Simulationmodell in der vorliegenden Dissertation wird die Reibzahl auf 0,1 festgelegt. Da es sich bei den verwendeten Versuchshalbzeugen um Konstruktionsrohre aus Stahl mit hohen Fertigungstoleranzen handelt (siehe Tabelle 4.2), die zu einer höheren Flächenpressung zwischen Halbzeug und Werkzeugkomponenten führen können, ist eine höhere Reibzahl als im Vergleich zu den präziser geformten Aluminiumrohren von Beulich (2022) legitim. Neben den Kontaktbedingungen und der Tribologie müssen auch noch weitere numerische Einstellungen getroffen werden, welche Einfluss auf die Berechnungsgenauigkeit und -dauer haben. Hierzu zählt vor allem die Größe der Vernetzung der Werkzeuge und des Halbzeugs sowie die Massenskalierung. Bei der Vernetzung wird für das Rohr eine Elementkantenlänge von 4 mm verwendet und für die Starrkörper der Werkzeugaktivelemente jeweils eine Elementkantenlänge von 1 mm. Darüber hinaus wird die Masse des Halbzeugs mit einem Faktor von 100 skaliert, um die Rechenzeit der expliziten Simulation innerhalb eines akzeptablen und auswertbaren Rahmens zu halten. Mit den genannten Einstellungen und einer Parallelisierung auf 4 CPU's liegt die Rechenzeit der einfachen Bögen bei ca. 6 h. Im Vergleich zu den Rechenzeiten in der Arbeit von Beulich (2022) können die Rechenzeiten als akzeptabel angesehen werden. Für eine weitere Reduzierung der Rechenzeit müssten weitere Annahmen getroffen werden oder eine höhere Parallelisierung vorhanden sein, um den komplexen Freiformbiegeprozess simulieren zu können. Der folgende

Abschnitt gibt Aufschluss über die Präzision und Qualität des vorgestellten Simulationsmodells und vergleicht die Ergebnisse der numerischen Abbildung mit den realen Experimenten aus dem vorangegangenen Abschnitt. Dadurch soll die Anwendbarkeit der numerischen Abbildung und der vorgestellten Methoden verifiziert werden.

6.3 Validierung und Bewertung der Ergebnisse

Um das Simulationsmodell zu validieren, werden die Ergebnisse der experimentellen Biegeversuche aus Kapitel 6.1 herangezogen und mit den Ergebnissen der Simulation verglichen. Hierzu wird die Kinematik der Biegemaschine als NC-Code exportiert und in die numerische Abbildung übertragen. Im Anschluss daran werden die Simulationen durchgeführt und die geometrischen Eigenschaften anhand des erzeugten diskreten Oberflächennetzes, wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben, ermittelt. Es werden lediglich die Versuche V1-V7 (siehe Tabelle 6.1) simuliert, da diese eine ausreichende Bandbreite an Radien und Winkeln liefern, um die Biegecharakteristik vergleichen zu können. Die Ergebnisse sind grafisch in Abbildung 6.4 dargestellt und nach Biegeradius und Biegewinkel ausgewertet in Tabelle 6.2 aufgetragen.

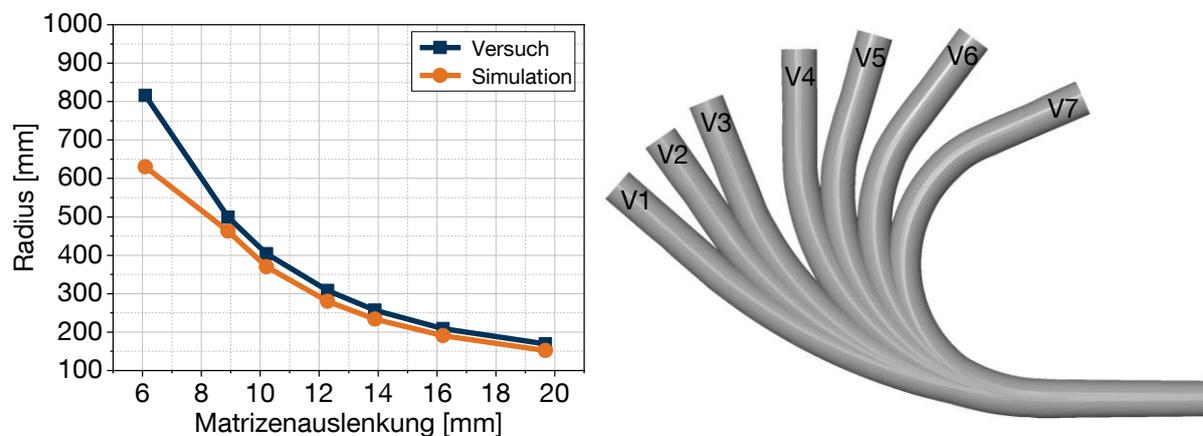


Abbildung 6.4: Auswertung des Biegeradius der Simulation im Vergleich zu den Biegeversuchen aus Kapitel 6.1

Die Ergebnisse zeigen sowohl für den Biegeradius als auch für den Biegewinkel insgesamt eine gute Übereinstimmung zwischen der Simulation und den experimentellen Biegeversuchen. Lediglich die Ergebnisse des Versuchs V1 zeigen größere Abweichungen zwischen der Simulation und den Experimenten. Eine Begründung hierfür kann die geringe Auslenkung der Biegematrix und der damit verbundene niedrige plastische Anteil bei großen Biegeradien sein. In den Arbeiten von Beulich (2022) ist derselbe Effekt zu sehen und wird mit der Überlagerung von elastischer

und plastischer Formänderung sowie dem größeren Einfluss von Werkzeugtoleranzen und Maschinengenauigkeit begründet. Da die Biegewinkel in direkter Abhängigkeit zum Biegeradius stehen, ist es logisch, dass die Biegewinkel bei Unterschätzung des Biegeradius überschätzt werden. Einen weiteren Grund für die Abweichung zwischen Simulation und Experimenten kann auch in den Annahmen und Vereinfachungen in Bezug auf die Reibung, Massenskalierung oder die Biegekräfte liegen, welche im Simulationsmodell nur approximiert dargestellt werden.

Tabelle 6.2: Ergebnisse der numerischen Simulation im Vergleich zu den Ergebnissen aus jeweils 3 experimentellen Biegeversuchen für zweidimensionale Bögen

Name	R_{Ist}	α_{Ist}	R_{Sim}	α_{Sim}	ϵ_R	ϵ_W
-	mm	°	mm	°	%	%
V1	816,45 ± 3,55	27,73 ± 1,34	629,80	40,78	-22,86	47,06
V2	498,83 ± 0,13	49,61 ± 0,07	462,41	55,06	-7,30	10,99
V3	404,06 ± 0,90	61,67 ± 0,31	369,94	69,03	-8,44	11,93
V4	308,43 ± 0,51	80,70 ± 0,24	280,41	89,34	-9,08	10,71
V5	257,17 ± 0,56	95,74 ± 0,27	233,50	105,98	-9,20	10,70
V6	209,29 ± 0,97	113,46 ± 0,34	191,03	126,29	-8,72	11,31
V7	169,08 ± 0,02	133,22 ± 1,57	151,85	156,22	-10,19	17,26

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine gute Übereinstimmung zwischen der Simulation und den Biegeversuchen besteht. Aufgrund der detailliert durchgeführten Materialcharakterisierung des Halbzeuges mit der Bestimmung der wichtigsten mechanischen Kennwerte kann zudem angenommen werden, dass die erzeugten mechanischen Eigenschaften des Simulationsmodells einen realitätsnahen Trend widerspiegeln. Um die Höhe der Eigenspannungen im Simulationsmodell abbilden zu können, müsste eine noch intensivere Untersuchung des Materials und der unterschiedlichen Kennwerte erfolgen. Dadurch, dass in der vorliegenden Arbeit jedoch eine qualitative Analyse der Veränderungen der Eigenspannungen und keine quantitative Analyse im Vordergrund steht, wird davon ausgegangen, dass das Simulationsmodell hinreichend genau ist. Diese Behauptung kann aufgrund der geringen Abweichung der geometrischen Eigenschaften zwischen Simulation und Realität getroffen werden. Da die mechanischen Eigenschaften in enger Verbindung mit dem resultierenden Biegeradius stehen, ist es ausreichend, wenn das Simulationsmodell bei den Biegeradien hinreichend genaue Ergebnisse liefert. Der Biegewinkel ist lediglich eine zusätzliche geometrische Kenngröße, die über die Anpassung der Vorschubslänge korrigiert werden kann. Somit lässt sich schlussfolgern, dass das dargestellte Simulationsmodell eine ausreichende Genauigkeit aufweist und als validiert angesehen werden kann, um im weiteren Verlauf der Arbeit als virtuelles Labor eingesetzt zu werden.

7 Sensitivitätsanalyse prozessrelevanter Stell- und Einflussgrößen

Zunächst müssen die prozessrelevanten Stell- und Einflussgrößen identifiziert werden, um die geometrischen und mechanischen Eigenschaften beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize flexibel entkoppeln zu können. Von Wei et al. (2020) und Beulich (2022) wurden hierzu bereits diverse Experimente und Simulationen durchgeführt, um den Einfluss einzelner Prozessparameter beim Freiformbiegen zu quantifizieren. Der Fokus der Untersuchungen lag dabei auf den geometrischen Eigenschaften und den Einflüssen bei Verwendung unterschiedlicher Materialien (Aluminium, Kupfer und Messing). Insbesondere die Ergebnisse der Arbeit von Beulich (2022) bilden die Grundlage für die nachfolgenden Untersuchungen. In den folgenden Abschnitten werden jedoch nicht nur die geometrischen Eigenschaften betrachtet, sondern auch die Auswirkungen und Veränderungen der mechanischen Eigenschaften analysiert. Darüber hinaus stellt die Verwendung von geschweißten Stahlrohren eine zusätzliche Abgrenzung zu den oben genannten Arbeiten dar. In der Analyse der Arbeiten von Wei et al. (2020) und Beulich (2022) konnten vor allem die Kinematik der Biegemaschine, die Halbzeugeigenschaften und der Abstand zwischen Biegematrize und Rohrführung als stärkste Einflussgrößen identifiziert werden, weswegen diese auch in den folgenden Abschnitten im Fokus stehen. Bei den Halbzeugeigenschaften werden hauptsächlich die geometrischen Halbzeugschwankungen innerhalb der Fertigungstoleranzen untersucht. Das Ziel dieses Kapitels ist es prozessrelevante Stellgrößen und deren Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften zu identifizieren und diese nutzbar zu machen, um die mechanischen Eigenschaften entkoppelt von den geometrischen Eigenschaften beeinflussen zu können.

7.1 Einfluss der Kinematik der Biegematrize

Bereits aus den Ergebnissen von Kapitel 6.1 ist zu entnehmen, dass vor allem die Kinematik der Biegematrize einen großen Einfluss auf die resultierende Geometrie beim Freiformbiegen hat. Betrachtet man die Abbildung 6.1 ist zu erkennen, dass mit steigender Auslenkung der Biegematrize der resultierende Biegeradius sinkt. Da die Versuche im Rahmen der Anlagenkalibrierung durchgeführt worden sind, wurde die vom Maschinenhersteller zur Verfügung gestellte

Benutzeroberfläche zur Konfiguration der Biegelinie benutzt. Bei der Benutzeroberfläche können der Biegeradius, der Biegewinkel, die Biegerichtung und die Vorschubgeschwindigkeit als wichtigste Parameter zur Definition der Biegelinie eingegeben werden. Die Maschine berechnet im Anschluss aus den gegebenen Parametern die Bewegungskinetik der Anlage. Dabei kann der Bediener keinen direkten Einfluss auf die Auslenkung oder die Rotation der Biegematrize nehmen, da der Zusammenhang in Abhängigkeit von der Kalibrierkurve automatisch vorgegeben wird. Dieser initial vorgegebene Zusammenhang zwischen Auslenkung und Rotation der Biegematrize wird im weiteren Verlauf der Arbeit als *tangentiales Biegen* bezeichnet. Aufgrund der Prozessgestaltung des Freiformbiegens und der kinematischen Formgebung kann die Biegematrize auch in nicht-tangentiale Positionen bewegt werden, solange diese innerhalb der Bewegungsgrenzen der Biegematrize liegen. Dabei wird zwischen Positionen unterschieden, die bei gleicher Auslenkung eine größere oder kleinere Rotation vorweisen als die tangentielle Rotation. Positionen mit einer höheren Rotation werden im Allgemeinen als *Überbiegen* und Positionen mit kleineren Rotationen als *Unterbiegen* bezeichnet. Abbildung 7.1 zeigt die verschiedenen Positionen der Biegematrize an einem Beispiel.

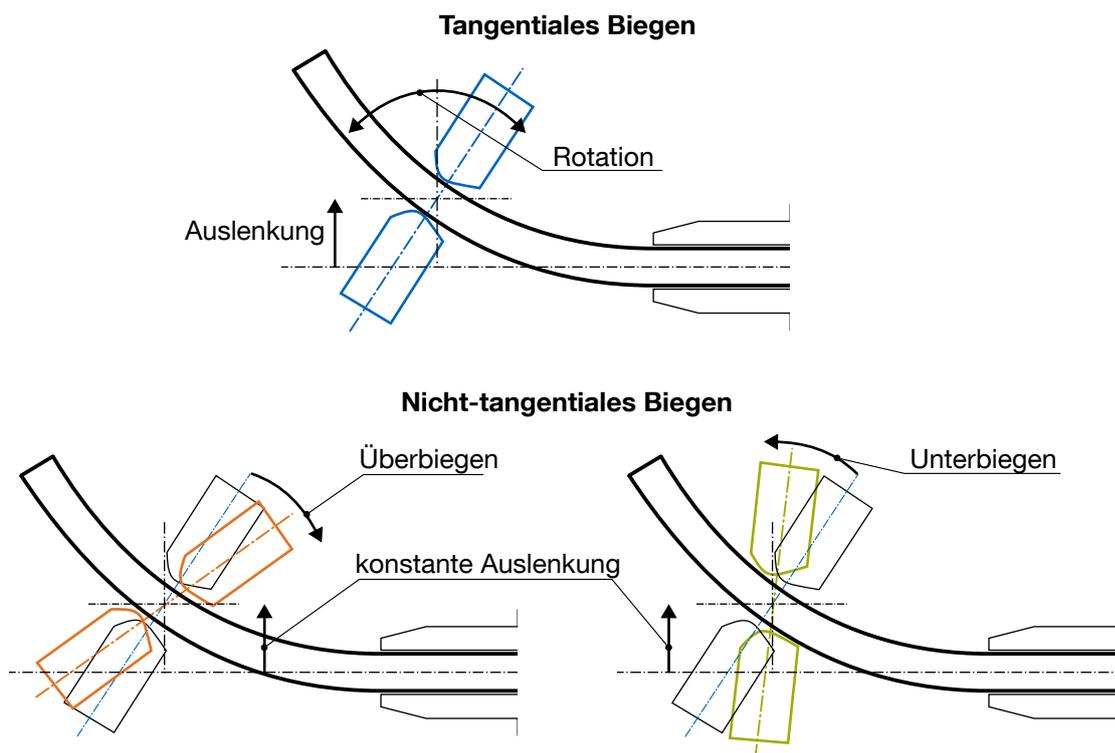


Abbildung 7.1: Schematische Darstellung des tangentialem Biegens im Vergleich zum nicht-tangentialem Über- und Unterbiegen

Durch die Modernisierung der Steuerung und die Integration einer Schnittstelle zur direkten Übertragung eines selbst generierten NC-Codes an die Freiformbiegeanlage ist es nun möglich,

die nicht-tangentialen Positionen der Biegematrize einzustellen. Damit können die vorhandenen Freiheitsgrade der Biegemaschine voll ausgenutzt werden und es besteht die Möglichkeit, entgegen der ursprünglichen Maschineneinstellung direkt Einfluss auf die Auslenkung und Rotation der Biegematrize zu nehmen.

Wie bereits in der Forschungshypothese formuliert, wird davon ausgegangen, dass durch nicht-tangentialen Biegen gleiche Biegegeometrien (Radius und Winkel) mit unterschiedlichen Eigenschaften (Eigenspannungen) gebogen werden können. Durch unterschiedliche Kombinationen von Auslenkung und Rotation kann somit ein Einfluss auf die Entwicklung der mechanischen Eigenschaften genommen werden, ohne die vorgegebene Zielgeometrie zu verändern. Um nun den Einfluss der Auslenkung und den Einfluss der Rotation der Biegematrize auf die geometrischen und mechanischen Eigenschaften bestimmen zu können, wird das validierte Simulationsmodell aus Kapitel 6 verwendet. In das numerische Modell gehen nun verschiedene kinematische Verläufe der Biegematrize ein, wobei unterschiedliche Kombinationen aus Auslenkung und Rotation der Biegematrize bei konstantem Vorschub im virtuellen Labor untersucht werden. Dabei wird angenommen, dass es unterschiedliche Kombinationen aus Auslenkung und Rotation der Biegematrize gibt, die eine übereinstimmende Geometrie haben, aber zu unterschiedlichen Eigenspannungen führen. Weiterhin wird angenommen, dass diese Forschungshypothese an realen Versuchsbauteilen bestätigt werden kann, indem die qualitativen Unterschiede in den Eigenspannungen im ausgewerteten BHN-Energiesignal sichtbar werden. Zusätzlich werden UCI-Härtemessungen durchgeführt, die im Idealfall Rückschlüsse auf die lokale Festigkeitsänderung zulassen. Die vorgestellte Methodik dient der Quantifizierung des Einflusses der Maschinenkinematik auf die mechanischen und geometrischen Eigenschaften. Ziel ist die Entkopplung der Eigenschaften beim eigenschaftsflexiblen Freiformbiegen mit bewegter Matrize.

Abbildung 7.2 zeigt auf der linken Seite beispielhafte trapezförmige Bewegungskurven der Biegematrize aufgeteilt in Auslenkung, Rotation und Vorschub. Analog zur Darstellung in Abbildung 5.3, bei der bereits die 3 Teilbereiche (Anbiegen (I), konstanter Bereich (II), Rückbiegen (III)) einer einfachen Biegung erläutert wurden, sind die Bereiche auch in der Bewegungskinematik zu erkennen. Zu Beginn wird die Biegematrize innerhalb einer festgelegten Zeitspanne (t_0 bis t_1) in die gewünschte Position bewegt. Es folgt eine weitere Zeitspanne (t_1 bis t_2), währenddessen die Position der Biegematrize konstant gehalten wird und durch den gleichmäßigen Vorschub der gewünschte Biegewinkel entsteht. Zum Ende erfolgt das Rückbiegen, indem die Biegematrize von der ausgelenkten Position zurück zur Nullstellung oder zur nächsten Biegeposition bewegt wird (t_2 bis t_3). Aufgrund der unterschiedlichen Auslenkungs- und Rotationswerte ergeben sich abhängig von der angewandten Stellgröße verschiedene Beschleunigungen beim An- und Rückbiegen. Da jedoch lediglich im konstanten Bereich von

einer gleichmäßigen Formgebung ausgegangen werden kann, wird die Auswertung auf diesen beschränkt. Daher können die Einflüsse der unterschiedlichen Beschleunigungen vernachlässigt werden. Der konstante Bereich beträgt für alle Parameterkombinationen 350 mm. Um die resultierenden geometrischen und mechanischen Eigenschaften abhängig von den prozessrelevanten Stör- und Einflussgrößen vergleichen zu können, ist die Identifikation skalarer Kennwerte erforderlich. Im Vergleich zum konstant gebogenen Bereich sind sowohl der Anbiegebereich als auch der Rückbiegebereich von diversen Parametern abhängig und haben nur eine geringe Länge. Aus diesem Grund werden diese Bereiche in der Auswertung nicht berücksichtigt. In der Simulation sowie in den experimentellen Untersuchungen wird eine konstante Länge für den Anbiege- und Rückfahrbereich sowie den konstanten Bereich definiert. Obwohl die Auslenkungs- und Rotationsgeschwindigkeiten für unterschiedliche Bewegungskurven im Anbiege- und Rückbiegebereich variieren, kann ein fester Auswertebereich im konstant gebogenen Bereich definiert werden, der die geometrischen und mechanischen Eigenschaften für alle Bauteile darstellt. Dieser Bereich wurde auf $200 \text{ mm} < L < 550 \text{ mm}$ festgelegt und wird vom vorderen Ende des Halbzeugs aus gemessen.

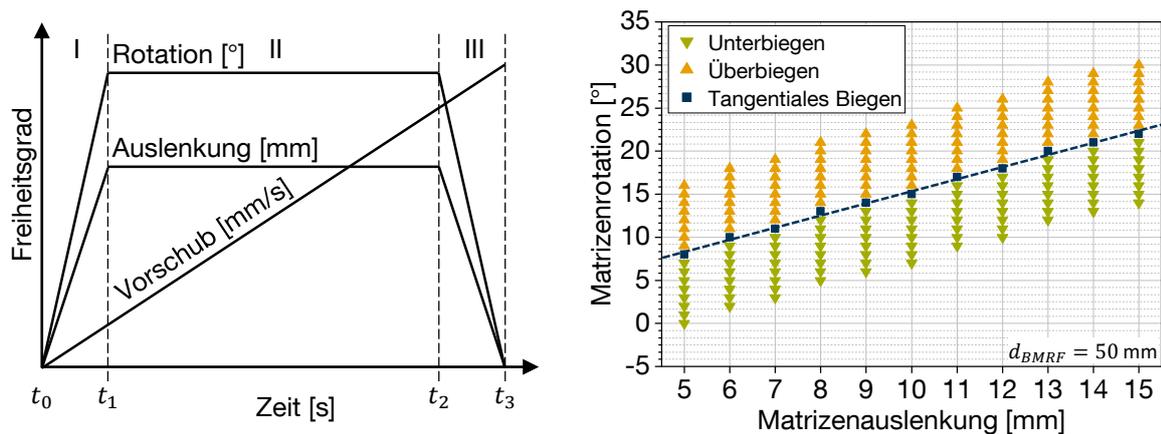


Abbildung 7.2: Visualisierung einer beispielhaften Bewegungskinematik der Biegeanlage und Darstellung der unterschiedlichen Kombinationen aus Matrizenauslenkung und -rotation zur simulativen Bestimmung des Einflusses der Bewegungskinematik

Auf der rechten Seite der Abbildung 7.2 sind alle unterschiedlichen Kombinationen aus Auslenkung und Rotation dargestellt, die zur Bestimmung des Einflusses der Matrizenkinematik simuliert wurden. Die Datenpunkte sind aufgeteilt in tangentielle und nicht-tangentiale Biegungen, wobei die nicht-tangentiale Biegungen zusätzlich in Über- und Unterbiegen unterteilt werden. Unterbiegen entspricht hierbei allen Rotationen die kleiner sind als die tangentielle Rotation, wobei die Auslenkung der Biegematrix konstant bleibt. Überbiegen ist charakterisiert durch Rotationen die größer sind als die tangentielle Rotation, ebenfalls bei konstanter Auslen-

kung. Insgesamt werden 187 Simulationen für das nicht-tangentiale Biegen analysiert, wobei die Auslenkungen zwischen 5 – 15 mm und die Rotationswinkel zwischen 0 – 30° variieren. Ausgehend von der tangentialen Kombination der Parameter Auslenkung und Rotation wird die Rotation pro Auslenkung um $\pm 8^\circ$ in 1° -Schritten erhöht und reduziert, was zu jeweils 17 unterschiedlichen Drehwinkel pro Auslenkung führt.

Die Ergebnisse der simulativen Parameterstudie werden anschließend bezüglich des gebogenen Radius und der vorhandenen Axialspannungen im konstant gebogenen Bereich analysiert. Die Auswertung des gebogenen Radius erfolgt wie bereits in Kapitel 5.1.1 beschrieben. Zur Analyse des vorliegenden Spannungszustandes in den numerischen Simulationen wird die Axialspannung (S22) als Auswertegröße gewählt. Diese wird entlang konstanter Pfade an der Außen- und Innenseite des gebogenen Bauteils ausgegeben und anschließend der Mittelwert und die Standardabweichung für den Auswertebereich des konstant gebogenen Bereichs von $200 \text{ mm} < L < 550 \text{ mm}$ berechnet. Aufgrund der Elementkantenlänge von 4 mm ergeben sich insgesamt 88 Datenpunkte, die in die Berechnung des Mittelwerts und der Standardabweichung einfließen. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird sowohl der Verlauf der Spannungen im genannten Auswertebereich analysiert und interpretiert, als auch die skalaren Größen Mittelwert und Standardabweichung zum Vergleich mit den ausgewerteten BHN-Energiesignalen verwendet. Um sich die wichtigsten geometrischen Eigenschaften noch einmal in das Bewusstsein zu rufen und darüber hinaus auch eine grafische Vorstellung der Auswertepfade zu erlangen, sind diese in Abbildung 7.3 anschaulich anhand eines einfachen Biegebauteils dargestellt.

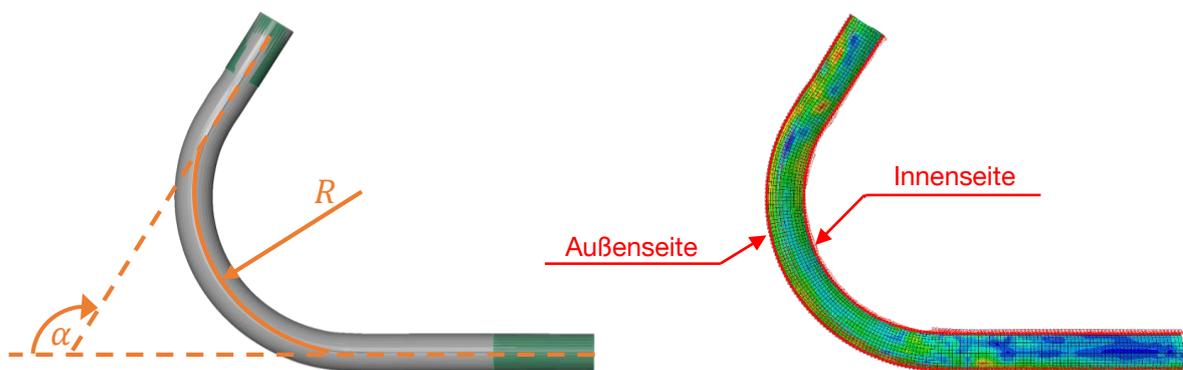


Abbildung 7.3: Auswertung der geometrischen Eigenschaften (links) und Darstellung der Pfade für die Innen- und Außenseite zur Auswertung der mechanischen Eigenschaften in der Simulation (rechts)

Zu Beginn der Auswertung werden die numerischen Simulationen auf den resultierenden Biegeradius hin analysiert. Abbildung 7.4 zeigt die Ergebnisse der Simulationen für den Radius in Abhängigkeit von der Auslenkung und der Rotation der Biegematrize, unterteilt durch die

Farbgebung in übergebogene, untergebogene und tangential gebogene Bauteile.

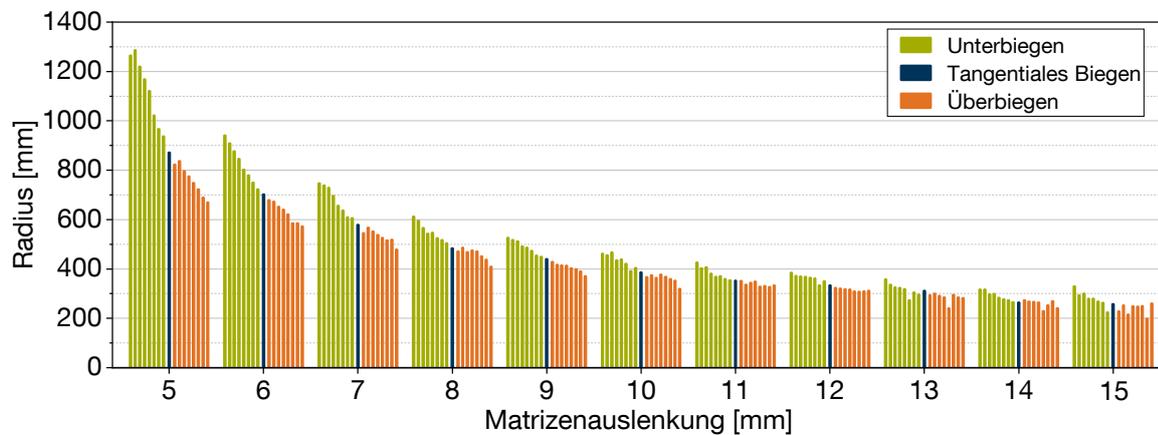


Abbildung 7.4: Resultierende Radien für unterschiedliche Kombinationen aus Matrizenauslenkung und -rotation

Bei gesamtheitlicher Betrachtung der Abbildung 7.4 bestätigt sich der bereits bekannte Zusammenhang, dass sich mit zunehmender Auslenkung ein geringerer Biegeradius einstellt. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass innerhalb einer gleichbleibenden Auslenkung die Rotation der Biegematrize einen Einfluss auf den Biegeradius und damit auf die geometrischen Eigenschaften des Biegebauteils hat. In der weiteren Analyse der dargestellten Ergebnisse zeigt sich, dass der Einfluss der Rotation bei kleineren Auslenkungen stärker vorhanden ist als im Vergleich zu den Versuchen mit höherer Auslenkung. Beispielsweise liegt der maximale Unterschied der erreichten Radien bei einer Auslenkung von 5 mm bei 617 mm, wohingegen die maximale Differenz bei einer Auslenkung von 15 mm lediglich 131 mm beträgt. In prozentualen Werten ausgedrückt bedeutet dies, dass bei 5 mm Auslenkung eine Radiusspanne von 34,15 % und bei einer Auslenkung von 15 mm eine Radiusspanne von 25,5 %, bezogen auf den tangentialen Radius, erreicht werden kann. Des Weiteren ist zu sehen, dass eine Veränderung in der Auslenkung bei kleinen Werten einen deutlich größeren Einfluss auf den gebogenen Radius hat, als bei großen Auslenkungen. So liegt beispielsweise der Unterschied in den tangentialen Biegungen zwischen 5 mm und 6 mm bei 169 mm, während der Unterschied zwischen 13 mm und 14 mm lediglich 47 mm beträgt.

In der Abbildung 7.4 entspricht eine horizontale Linie einer Isolinie des resultierenden Radius der Simulationsergebnisse. Es lässt sich erkennen, dass ein gewisser Radius mit unterschiedlichen Kombinationen von Matrizenauslenkungen und -rotationen erreicht werden kann. Würde man beispielsweise eine horizontale Linie für den Biegeradius $R = 300$ mm ziehen, dann ergeben sich mehrere Kombinationen aus unterschiedlichen Auslenkungen und Rotationen die diesen Biegeradius erzielen können. Für die weiteren Untersuchungen werden nun aus den vorhande-

nen 187 Datenpunkten Kombinationen gesucht, deren lokale Radien sich im konstant gebogenen Bereich weniger als 1 % voneinander unterscheiden. Damit ist zum einen sichergestellt, dass sich die Radien gleichen und zum anderen können die Simulationsergebnisse genutzt werden, um diese im weiteren Verlauf der Untersuchungen auf den vorliegenden Spannungszustand hin auszuwerten. Aus den 187 Datenpunkten ergeben sich mehrere Kombinationen, bei denen der Radius innerhalb der gewünschten Abweichung liegt. Als Referenzdatenmenge werden die in Tabelle 7.1 aufgelisteten Punkte verwendet. Die ausgewählten beispielhaften Daten zeigen Kombinationen von Matrizenauslenkung und Matrizenrotation, bei denen die Abweichung des konstant gebogenen Radius geringer als ± 1 % ist und diese somit als identisch bezeichnet werden können. Die Kombinationen aus Tabelle 7.1 wurden gewählt, da es innerhalb der 187 Datenpunkte hier zu den meisten Übereinstimmungen gekommen ist. Es wurden insgesamt 6 verschiedene nicht-tangentiale Kombinationen aus Matrizenauslenkung und Matrizenrotation identifiziert, deren konstant gebogener Radius sich näherungsweise gleicht. Durch die Simulationen ist zudem sichergestellt, dass sich die Kombinationen auch in späteren realen Versuchen ohne Kollision umsetzen lassen.

Tabelle 7.1: Ausgewählte Ergebnisse der numerischen Simulation verschiedener Kombinationen aus Matrizenauslenkung und -rotation mit identischen Radien. Die farbliche Umrandung liefert einen Hinweis auf die Stellung der Biegematrize (Überbiegen, Unterbiegen)

Bezeichnung	Auslenkung mm	Rotation °	R_{Sim} mm
9/22	9,00	22,00	369,32
10/16	10,00	16,00	366,06
11/13	11,00	13,00	367,89
11/14	11,00	14,00	369,33
12/12	12,00	12,00	368,74
12/13	12,00	13,00	367,68

Innerhalb der Tabelle 7.1 befinden sich 2 Kombinationen des Überbiegens (9/22 und 10/16) sowie 4 Kombinationen des Unterbiegens (11/13, 11/14, 12/12 und 12/13).¹ Der größte Radius innerhalb der genannten Kombinationen beträgt 369,33 mm bei der Kombination 11/14 und der kleinste Radius 366,06 mm bei 10/16. Berechnet man sich den Mittelwert und die Standardabweichung aus den 7 dargestellten Kombinationen, dann ergibt sich der Wert $368,17 \pm 1,14$ mm. Die maximale Abweichung beträgt somit 0,57 % (10/16) gemessen am Mittelwert der dargestellten Kombinationen.

¹Die Bezeichnung der Biegestrategien bezieht sich auf folgende Notation: Auslenkung in mm / Rotation in °

In der zu untersuchenden Forschungshypothese des nicht-tangentialen Biegens wird angenommen, dass durch unterschiedliche Kombinationen aus Auslenkung und Rotation der Biegematrize Geometrien gebogen werden können, deren geometrische Eigenschaften sich gleichen, während sich die mechanischen Eigenschaften unterscheiden. Dabei konnte bereits gezeigt werden, dass es Kombinationen gibt, die einen gleichen Biegeradius trotz unterschiedlicher Bewegungskurven ergeben. Zur weiteren wissenschaftlichen Untersuchung der Forschungshypothese folgt nun die Analyse der mechanischen Eigenschaften der Ergebnisse der numerischen Simulation. Der Fokus liegt dabei insbesondere auf den Eigenspannungen, da diese einen signifikanten Einfluss auf die Qualität der freiformgebogenen Bauteile haben. Als Indikator für den Eigenspannungszustand werden die Axialspannungen sowohl an der Außenseite als auch an der Innenseite der bereits erarbeiteten nicht-tangentialen Biegestrategien aus Tabelle 7.1 analysiert, da hier nach Franz (1961) die größten Spannungen und Dehnungen zu erwarten sind. Abbildung 7.5 zeigt sowohl den Verlauf der Axialspannungen, als auch die daraus berechneten Mittelwerte mit den zugehörigen Standardabweichungen, um eine bessere Vergleichbarkeit zu schaffen.

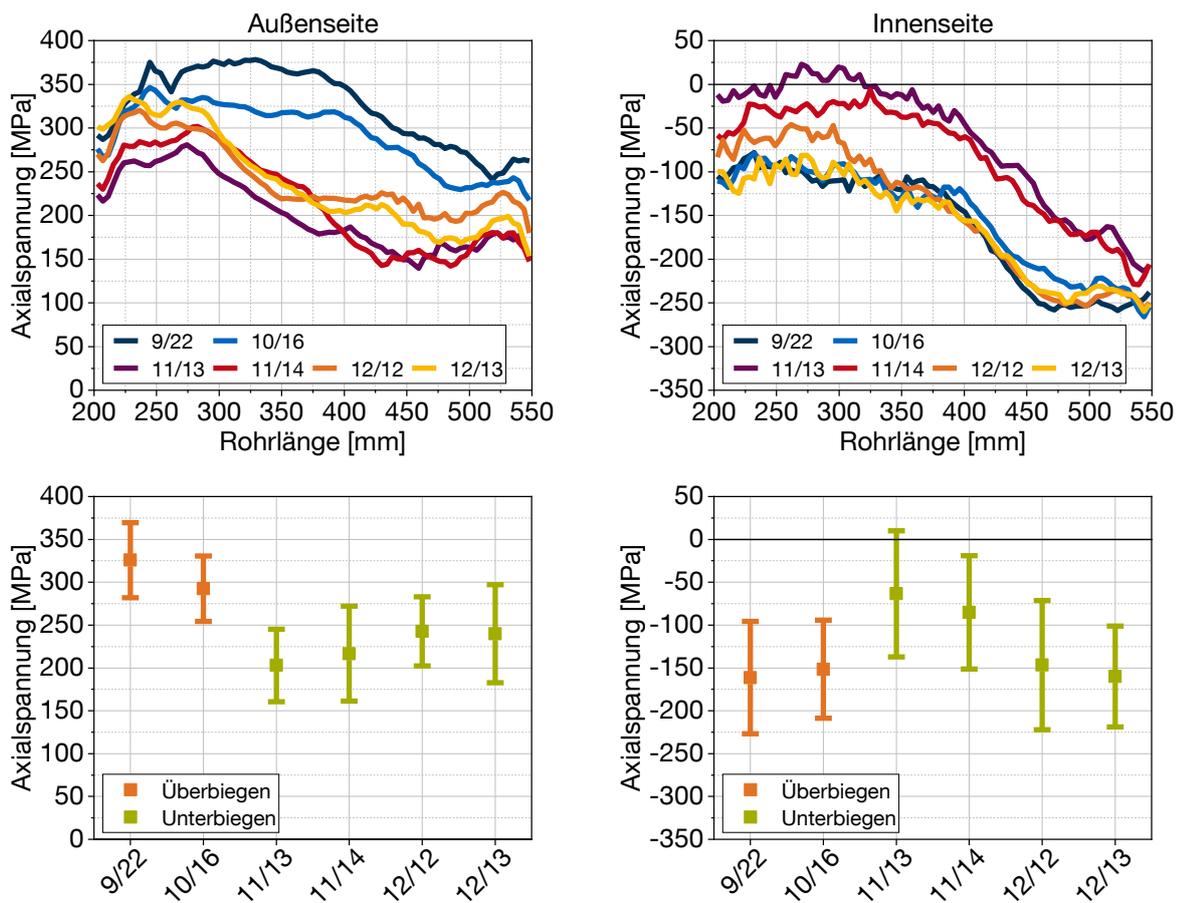


Abbildung 7.5: Verlauf und Mittelwerte der Axialspannung an der Außen- und Innenseite für nicht-tangential gebogene Rohre mit identischer Krümmung

In den unterschiedlichen Teilabbildungen in Abbildung 7.5 sind einige Auffälligkeiten zu erkennen und es lassen sich verschiedene Erkenntnisse ableiten. Zu Beginn wird der Verlauf der axialen Spannungen auf der Außenseite untersucht, und es fällt sofort auf, dass diese von Zugspannungen dominiert wird. Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass die übergebogenen Kombinationen (9/22, 10/16) insgesamt einen deutlich höheren Verlauf der axialen Spannungen aufweisen, als die untergebogenen Kombinationen (11/13, 11/14, 12/12 und 12/13). Zudem zeigt sich, dass bei den übergebogenen Kombinationen die axiale Spannung über einen längeren Bereich annähernd konstant ist und erst gegen Ende des Auswertebereichs absinkt, während bei den untergebogenen Kombinationen ein nahezu konstanter Abfall über die gesamte Rohrlänge zu sehen ist. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Verläufen werden in der Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen deutlicher sichtbar, wobei die auf den ersten Blick hohen Standardabweichungen auf die Art der Verläufe der Axialspannungen zurückzuführen sind. Betrachtet man nun die Mittelwerte und Standardabweichungen auf der Außenseite, so ist zu erkennen, dass die Mittelwerte der übergebogenen Bauteile deutlich über denen der untergebogenen Bauteilen liegen. Die höchsten axialen Spannungen werden bei der Kombination 9/22 erreicht, während die geringsten Spannungen bei 11/13 erreicht werden. Für die Innenseite der freiformgebogenen Bauteile ergibt sich ein deutlich anderer Verlauf als auf der Außenseite. Zu Beginn zeigt sich, dass auf der Innenseite der freiformgebogenen Bauteile hauptsächlich Druckspannungen vorherrschen und diese im Vergleich zu den Zugspannungen auf der Außenseite insgesamt geringer ausfallen. Im Gegensatz zur Außenseite gleichen sich bei der Innenseite die unterschiedlichen Verläufe in ihrer Art und unterscheiden sich nur in der Höhe der axialen Spannungen. Die Unterschiede werden auch auf der Innenseite bei Betrachtung der Mittelwerte und Standardabweichungen deutlicher sichtbar. Dabei ist zu erkennen, dass sich die geringsten axialen Spannungen für die untergebogene Kombination 11/13 ergibt, während die sich die maximalen Druckspannungen bei der übergebogenen Kombination 9/22 und der untergebogenen Kombination 12/13 nahezu gleichen. In Kombination mit der Außenseite zeigt sich, dass bei hohen Axialspannungen auch auf der Innenseite höhere betragsmäßige Spannungen entstehen und bei absinkenden Spannungen auf der Außenseite auch die Spannungen der Innenseite betragsmäßig reduziert werden. Insgesamt betrachtet wirkt die Darstellung der Mittelwerte auf der Innenseite fast wie die Spiegelung der Ergebnisse der Außenseite, nur mit geringeren Werten und mit geringeren Unterschieden zueinander. Zusammenfassend zeigt sich in der numerischen Simulation, dass es sowohl auf der Außenseite als auch auf der Innenseite zu Unterschieden in den Verläufen und den Mittelwerten der nicht-tangentialen Biegestrategien kommt. In Verbindung mit den Ergebnissen aus Tabelle 7.1 zeigt die Simulation, dass es unterschiedliche Kombinationen aus Matrizenauslenkung und -rotation gibt, die zu einem annähernd identischen Radius führen, aber deutlich unterschiedliche Spannungen im konstant gebogenen Bereich aufweisen.

Um die Ergebnisse der Simulation zu validieren und damit die Forschungshypothese des nicht-tangentialen Biegens zu bestätigen, werden im Folgenden die Bewegungskurven der 6 Biegestrategien (Tabelle 7.1) auf die Biegeanlage übertragen und dort gebogen. Im Anschluss an den Freiformbiegeprozess werden die geometrischen Eigenschaften analysiert und die Ergebnisse mit der numerischen Simulation verglichen. Die gleiche Vorgehensweise wird ebenfalls für die mechanischen Eigenschaften angewandt, wobei hier der mikromagnetische BHN-Sensor mit anschließender Auswertung des BHN-Signals sowie das UCI-Härtemessgerät zum Einsatz kommen. Dabei wird sowohl die Härte als auch das BHN nicht am gesamten Verlauf des konstant gebogenen Radius gemessen, sondern an 5 Messpunkten die gleichmäßig über den Auswertebereich verteilt sind. Auch hier werden sowohl die Innenseite als auch die Außenseite des gebogenen Rohrs vermessen, ausgewertet und analysiert. Die Ergebnisse der experimentell ermittelten Biegeradien sind in Tabelle 7.2 aufgelistet.

Tabelle 7.2: Ergebnisse der Versuche verschiedener Kombinationen aus Matrizenauslenkung und -rotation bezogen auf den Radius im konstant gebogenen Bereich. Die farbliche Umrandung liefert einen Hinweis auf die Stellung der Biegematrize mit Bezug zur Abbildung 7.2 (Überbiegen, Unterbiegen)

Bezeichnung	Auslenkung	Rotation	R_{Ist}
-	mm	°	mm
9/22	9	22	399,62
10/16	10	16	405,83
11/13	11	13	407,33
11/14	11	14	405,22
12/12	12	12	393,51
12/13	12	13	394,13

Auf den ersten Blick zeigt sich auch hier eine sehr gute Übereinstimmung der einzelnen Radien für die unterschiedlichen Biegestrategien. Betrachtet man die Differenz zwischen dem maximalen Radius (407,33 mm bei 11/13) und dem minimalen Radius (393,51 mm bei 12/12), so unterscheiden sich die beiden Radien lediglich um 13,82 mm oder 3,51 %. Berechnet man den größten Fehler in Abhängigkeit des Mittelwerts aller 6 gebogenen Bauteile ($400,94 \pm 5,57$ mm) beträgt dieser lediglich 1,85 %. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Simulation unterscheiden sich die Radien um ca. 10 %. Trotz der Abweichung wird das Simulationsmodell als hinreichend genau angenommen. Mit diesen Ergebnissen kann ein erster Teil der aufgestellten Forschungshypothese des nicht-tangentialen Biegens bestätigt werden, denn mit unterschiedlichen Kombinationen aus Matrizenauslenkung und -rotation ist es möglich Bauteile mit gleichem Biegeradius im konstant gebogenen Bereich zu fertigen.

Um nun den zweiten Teil der aufgestellten Forschungshypothese bestätigen zu können, werden die freiformgebogenen Bauteile mit dem BHN-Sensor und dem UCI-Härteprüfgerät vermessen. Mit den verschiedenen Messverfahren sollen unterschiedliche mechanische Eigenschaften in den Bauteilen nachgewiesen werden und damit die Simulation validiert werden. Während das UCI-Härtemessgerät Veränderungen in der Härte detektieren soll, werden durch das BHN-Signal Aufschlüsse über Unterschiede und Veränderungen im vorliegenden Spannungszustand und der Eigenschaftsentwicklung während des Freiformbiegens erwartet. Dabei wurde bereits bestätigt, dass eine Veränderung im Spannungszustand zu einer Veränderung der Intensität des BHN-Signals führt, je nach vorliegender Hauptbelastung (vgl. Abbildung 5.9). Durch Vergleich der einzelnen Messungen zueinander können somit Aussagen über die Veränderung der Eigenspannungen getroffen werden. Hierzu werden auf der Außenseite und der Innenseite im konstant gebogenen Bereich des freiformgebogenen Rohres 5 Messpunkte gleich verteilt. Anschließend werden mit den genannten Sensoren die Messungen durchgeführt, wobei die Messzeit mit dem BHN-Sensor an jedem Punkt 0,25 s beträgt. Als Messparameter des BHN-Sensors wird die Amplitudenspannung der Anregerspule auf 0,255 V, die Frequenz auf 100 Hz, die Vorverstärkung auf 2000, die Abtastrate auf 2000 Hz und die FFT-Überabtastung auf 8-fach eingestellt. Die FFT-Überabtastung ermöglicht es dem System, weitere Abtastwerte zu erzeugen und bestimmt zusammen mit der Abtastrate, wie viele Spektren erzeugt werden. Zur Durchführung der Messungen werden die gebogenen Stahlrohre mit einer Vorrichtung in Position gehalten und die Messungen per Hand durchgeführt. Um sicherzustellen, dass der mikromagnetische Sensor in der richtigen Messposition gehalten wird, wurde die Spitze des Messkopfes an die Krümmung des Rohres angepasst. Für die UCI-Härtemessung wurde eine spezielle Sondenführung gefertigt, um die Sonde möglichst senkrecht auf der Rohrkrümmung ansetzen zu können. Im Anschluss an die Messungen werden die Härtemessungen analysiert und das BHN-Signal entsprechend des Prozessschaubildes in Abbildung 5.7 ausgewertet und ebenfalls analysiert. In Abbildung 7.6 sind sowohl für die UCI-Härtemessungen als auch für die mikromagnetischen BHN-Messungen die jeweiligen Mittelwerte und Standardabweichungen dargestellt.

Betrachtet man die Ergebnisse der Abbildung 7.6 zeigt sich, dass bei den UCI-Härtemessungen sehr große Standardabweichungen auftreten und sich die einzelnen Ergebnisse kaum voneinander unterscheiden. Auf der Innenseite lässt sich bei der Biegestrategie 12/12 ein leichter Abfall der Härte erkennen, jedoch reichen die zur Verfügung stehenden Daten nicht aus, um eine Aussage über den gesamtheitlichen Trend oder über Veränderungen der Härte zu treffen, da die Werte innerhalb der Standardabweichungen sowohl ansteigen als auch abfallen (als im Vergleich zur Ausgangshärte des Grundmaterials). Dadurch, dass alle Bauteile einen gleichen Biegeradius haben, also eine ähnliche plastische Verformung erfahren haben, ist es durchaus nachvollziehbar, dass sich die Härte nicht stark unterscheidet. Dementsprechend lässt sich schlussfolgern, dass

die UCI-Härte keine brauchbaren Ergebnisse liefert, um die Veränderungen in den mechanischen Eigenschaften zu messen und wird deswegen im weiteren Verlauf der Arbeit nicht weiter betrachtet.

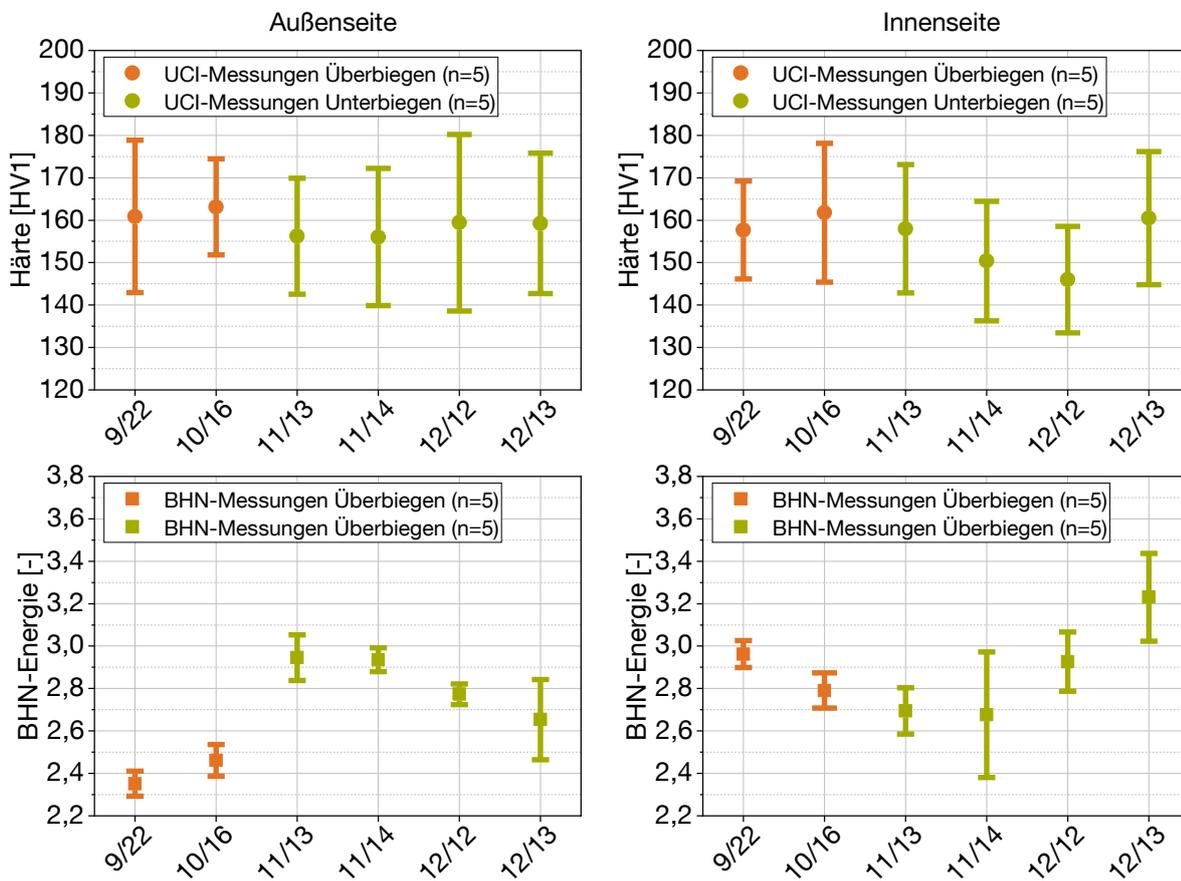


Abbildung 7.6: Ergebnisse der UCI-Härtemessungen (oben) und der BHN-Messungen (unten) für die Außen- und Innenseite freiformgebogener Bauteile

Im Gegensatz zu den UCI-Härtemessungen zeigen die Ergebnisse der mikromagnetischen BHN-Messungen sowohl innen als auch außen ausgeprägtere Unterschiede zueinander. Betrachtet man zuerst die Außenseite, dann ist zu erkennen, dass die maximale BHN-Energie bei den untergebogenen Kombinationen 11/13 und 11/14 erreicht wird, während die minimale BHN-Energie eindeutig der Biegestrategie 9/22 zuzuweisen ist. Zudem zeigt sich, dass die übergebogenen Kombinationen (9/22, 10/16) eine geringere BHN-Energie als die restlichen untergebogenen Biegestrategien aufweisen. Betrachtet man die untergebogenen Biegestrategien getrennt von den übergebogenen Biegestrategien, dann zeigt sich, dass mit steigender Auslenkung das BHN-Energieniveau absinkt. Bei gleicher Auslenkung scheint es zudem so, dass eine höhere Rotation zu einer geringeren BHN-Energie führt. Im Gegensatz zur Außenseite liegt auf der Innenseite die

maximale BHN-Energie bei der Kombination 12/13 vor, während die niedrigste BHN-Energie innerhalb des Bereichs der Standardabweichungen bei der Kombination 11/14 festgestellt wird. Zudem zeigt sich ein umgekehrter Trend als im Vergleich zur Außenseite. Auf der Außenseite nimmt das BHN-Energieniveau bei den untergebogenen Bauteilen mit steigender Auslenkung ab, während auf der Innenseite das BHN-Energieniveau mit zunehmender Auslenkung bei den untergebogenen Biegestegen ansteigt. Bei den übergebogenen Bauteilen zeigt sich ebenfalls ein umgekehrter Trend zwischen Außen- und Innenseite. Zusammenfassend lässt sich anhand der Versuchsergebnisse aussagen, dass sich die Außenseite und die Innenseite in den BHN-Energien unterscheiden und einen beinahe umgekehrten Verlauf haben. Zudem zeigt sich innerhalb der einzelnen Biegestrategien, dass sich die BHN-Energiewerte signifikant voneinander unterscheiden. In Zusammenhang mit den Ergebnissen aus Tabelle 7.2 bedeutet dies, dass bei der Verwendung der identifizierten nicht-tangentialen Biegestrategien Bauteile mit nahezu identischen Radien gebogen werden können, deren ausgewerteten BHN-Messungen signifikante Unterschiede aufweisen.

Nachdem sich nun sowohl in der Simulation als auch in den Versuchsergebnissen die Forschungshypothese zu bestätigen scheint, gilt es nun die erzielten Ergebnisse zu interpretieren, diskutieren und Schlüsse daraus abzuleiten. Um die theoretischen Überlegungen und numerischen Simulationen mit den Ergebnissen der Versuchen kombinieren zu können, müssen zunächst einige valide Annahmen wiederholt werden. Als erste Annahme wird der theoretische Spannungszustand im plastifizierten Rohr definiert, wobei angenommen wird, dass bei freiformgebogenen Rundrohren auf der Innenseite überwiegende Druckspannungen und auf der Außenseite überwiegende Zugspannungen vorherrschen (vgl. Abbildung 2.10). Diese Annahme wird durch die Simulationsergebnisse aus Abbildung 7.5 bekräftigt. Darüber hinaus wurde bereits in Kapitel 5.2.2 bestätigt, dass sich Veränderungen im ausgewertete BHN-Signal mit Veränderungen im vorherrschenden Spannungszustand korrelieren lassen. Dabei zeigt die Abbildung 5.9, dass das BHN-Energielevel mit ansteigender Druckbelastung steigt während die BHN-Energie bei ansteigender Zugbelastung fällt. Dieser Zusammenhang muss stets beachtet werden, wenn Ergebnisse des mikromagnetischen BHN-Sensors analysiert werden. In den Versuchsergebnissen des nicht-tangentialen Biegens haben sich ebenfalls Unterschiede in den ausgewerteten BHN-Energieleveln für die Innenseite und die Außenseite sowie für übergebogene und untergebogene Rohre ergeben. In Abbildung 7.7 werden die Annahmen und Ergebnisse nun kombiniert, wobei auf der Ordinate zum einen die resultierende BHN-Energie und zum anderen der qualitative Verlauf der Veränderung des vorherrschenden Spannungszustandes (Zug- oder Druckspannung) der freiformgebogenen Rohre dargestellt wird. Zudem wurden für die untergebogenen und die übergebogenen Rohre lineare Trendlinien eingefügt, um einen besseren Überblick über die Zusammenhänge zwischen den Daten zu bekommen.

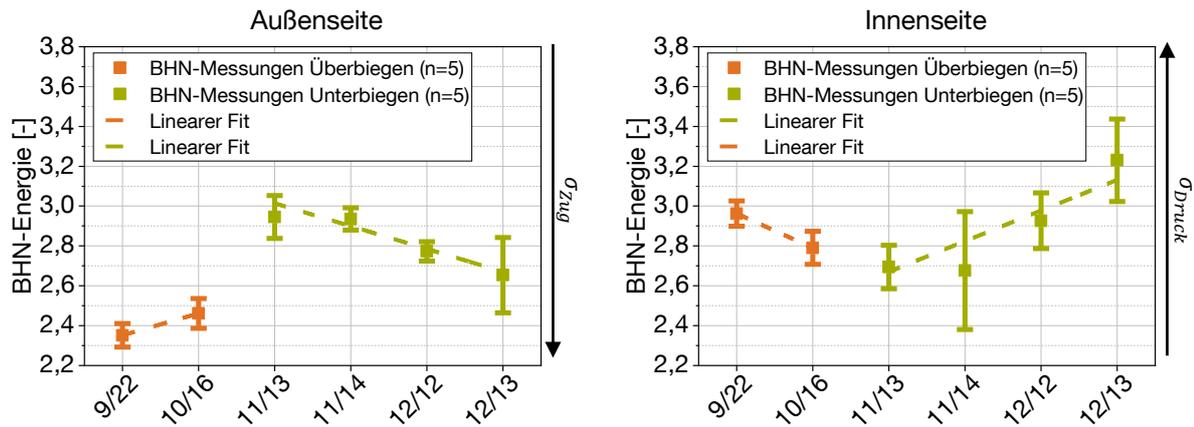


Abbildung 7.7: Lineare Trendlinien der mittleren BHN-Energie für übergebogene und untergebogene Freiformbiegebauteile mit identischen Biegeradien

Für die übergebogenen Bauteile (9/22, 10/16) zeigt die Abbildung 7.7 für die Außenseite einen Anstieg der BHN-Energie, während auf der Innenseite ein Abfall der BHN-Energie zu erkennen ist. Der Anstieg auf der Außenseite kann mit einer Reduktion der Zugspannungen korreliert werden und der Abfall der BHN-Energie auf der Innenseite mit einer Reduktion der Druckspannungen. Mit diesem Zusammenhang ist zu erkennen, dass trotz einer höheren Auslenkung bei der Kombination 10/16 höhere Zug- und Druckspannungen bei der Kombination 9/22 erreicht werden. Da es nur 2 Kombinationen an übergebogenen Bauteilen gibt, lässt sich über einen gesamtheitlichen Zusammenhang nicht viel aussagen. Betrachtet man die Außenseite der untergebogenen Bauteile zeigt sich, dass ein kontinuierlicher Anstieg der Zugspannungen mit der steigenden Matrizenauslenkung und -rotation korreliert. Für die Innenseite der übergebogenen Rohre zeigt sich ein Abfall der BHN-Energie, was aufgrund des überwiegend vorherrschenden Druckzustandes mit sinkenden Druckspannungen in Verbindung gebracht werden kann. Darüber hinaus sinken mit zunehmender Auslenkung die Druckspannungen bei den übergebogenen Bauteilen, während diese bei den untergebogenen Bauteilen ansteigen. Innerhalb der untergebogenen Bauteile zeigt sich auf der Innenseite der gleiche Trend wie auf der Außenseite, dass mit ansteigender Auslenkung und Rotation die Spannungen steigen. Betrachtet man nun die beiden Seiten gekoppelt miteinander, dann zeigt sich, dass ein Anstieg in den Zugspannungen auf der Außenseite mit einem Anstieg der Druckspannungen auf der Innenseite korreliert werden kann. Dieser Zusammenhang ist sowohl bei den übergebogenen als auch bei den untergebogenen Biegestrategien zu erkennen.

Um die Wissensbasis beim nicht-tangentialen Biegen zu erweitern und genauer zu verstehen, warum sich die Spannungszustände der ausgewählten Biegestrategien so entwickeln wie dargestellt, wird erneut das Simulationsmodell herangezogen. Dieses Mal wird nicht der Zeitpunkt

nach Beendigung der Biegung betrachtet, sondern der Zeitpunkt kurz nachdem die maximale Matrizenauslenkung und -rotation erreicht wurde ($t_1 + \Delta t$). Des Weiteren wird am genannten Zeitpunkt nicht die Auswertung entlang der Außenseite oder Innenseite des Rundrohres gewählt, sondern ein Pfad in Umfangsrichtung des gebogenen Rundrohres genau an der Angriffsstelle der Biegematrize gesetzt. Da der vorherrschende Spannungszustand im Rohr bereits bekannt ist wird für die Auswertung die Mises-Vergleichsspannung entlang des Halbzeugumfangs für alle 6 Biegestrategien ausgegeben und analysiert. Obwohl die vorherrschenden Eigenspannungen nicht durch die Mises-Vergleichsspannung dargestellt werden können, wird diese aufgrund ihrer Stabilitätsvorteile im Vergleich zur axialen Spannung S22 für die nachfolgende Analyse ausgewählt. Die Darstellung soll Einblick in die Intensität des Matrizenangriffspunkts bieten und nicht unmittelbar mit den Eigenspannungen korreliert werden. Daher ist die Mises-Vergleichsspannung eine geeignete Auswertungsgröße. Abbildung 7.8 zeigt den Verlauf der Mises-Vergleichsspannung aufgetragen über den normierten Umfang. Darüber hinaus sind in der Abbildung 7.8 die Innenseite und Außenseite ebenfalls grafisch dargestellt und deren Position über den normierten Umfang markiert.

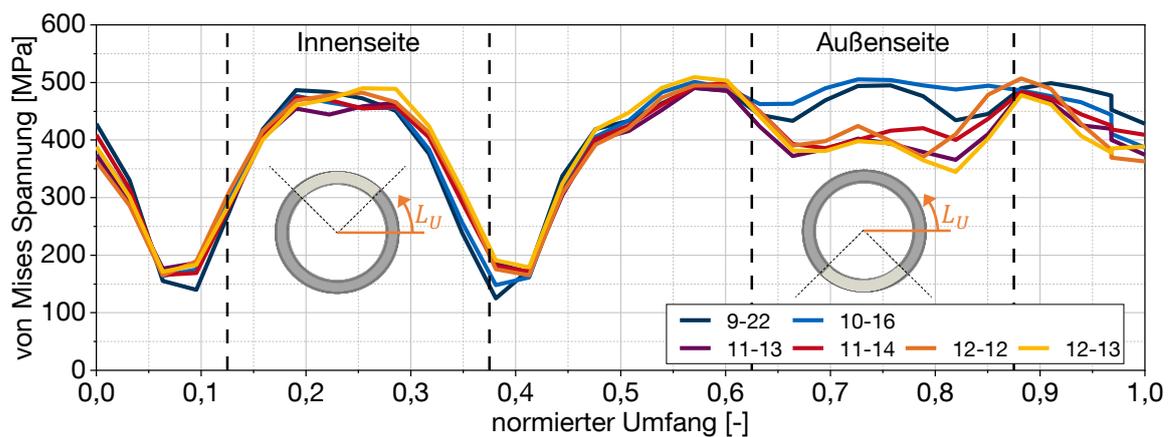


Abbildung 7.8: Mises-Vergleichsspannung der einzelnen Biegestrategien aufgetragen über den normierten Umfang des Halbzeuges direkt am Matrizenangriffspunkt zum Zeitpunkt direkt nach Erreichen der maximalen Auslenkung und Rotation

Die Abbildung 7.8 stellt anschaulich dar, dass sich die Verläufe voneinander unterscheiden. Betrachtet man die einzelnen Verläufe im Bereich der Außenseite detaillierter, so ist zu erkennen, dass die übergebogenen Varianten (9/22, 10/16) eine höhere Mises-Vergleichsspannung aufweisen als im Vergleich zu den untergebogenen Varianten (11/13, 11/14, 12/12, 12/13). Dabei wird angenommen, dass eine höhere Mises-Vergleichsspannung als Indikator für einen stärkeren Eindruck durch die Biegematrize und einer damit verbundenen erhöhten Eintragung von Spannungen auf der jeweiligen Bauteilseite gesehen werden kann. Die Darstellung in Abbildung 7.8

deckt sich zudem mit den mikromagnetischen Messungen der realen Versuche, da auch hier bei den übergebogenen Bauteilen höhere Spannungen auf der Außenseite auftreten. Für die Innenseite zeigen sich keine eindeutigen Unterschiede zwischen den übergebogenen und den untergebogenen Bauteilen. Alle Kombinationen liegen relativ nahe beieinander. Bezieht man nun die Messungen aus den realen Versuchen mit ein, dann lässt sich erkennen, dass auf der Innenseite die Unterschiede geringer sind als auf der Außenseite, was sich auch in der Abbildung 7.8 zeigt.

Zusammenfassend konnte in den vorliegenden Untersuchungen gezeigt werden, dass durch das nicht-tangentiale Biegen sowohl in den Simulationen als auch in den realen Versuchen Bauteile gebogen werden konnten, deren geometrische Eigenschaften sich gleichen und deren vorliegender Axialspannungszustand unterschiedlich ist. Mit diesen Ergebnissen lässt sich annehmen, dass die Anlagenkinematik eine prinzipiell geeignete Stellgröße darstellt, um die mechanischen Eigenschaften, insbesondere die Eigenspannungen, von den geometrischen Eigenschaften zu entkoppeln. Das eingeführte nicht-tangentiale Biegen kann dazu genutzt werden unterschiedliche Spannungszustände unter Beibehaltung der Zielgeometrie zu realisieren. Dies konnte sowohl in der virtuellen Abbildung als auch in den Biegeexperimenten nachgewiesen werden. Die gezeigten Ergebnisse bestätigen die aufgestellte Forschungshypothese, dass die Anlagenkinematik prinzipiell als Stellgröße zur Entkopplung zwischen der Biegegeometrie und dem Eigenspannungszustand genutzt werden kann. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden nun weitere prozessrelevante Stell- und Einflussgrößen identifiziert und deren Einfluss auf die geometrischen und mechanischen Eigenschaften analysiert, bewertet und diskutiert.

7.2 Einfluss der Halbzeugschwankungen

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die Anlagenkinematik als prinzipiell geeignete Stellgröße zur Entkopplung von geometrischen und mechanischen Eigenschaften identifiziert wurde, befasst sich das folgende Kapitel mit der Analyse der Auswirkungen unterschiedlicher Halbzeugschwankungen auf das Biegeergebnis. Dabei werden die Auswirkungen unterschiedlicher Wanddicken s und Außendurchmesser D_A im Vergleich zu den Rohren im Anlieferungszustand untersucht. Bereits in der Arbeit von Beulich (2022) wurden die Sensitivität unterschiedlicher Parameter auf die Geometrie durch Simulationen des Freiformbiegeprozesses für Aluminiumrohre untersucht und analysiert, wobei sowohl die Wanddicke als auch der Außendurchmesser einen Einfluss auf das gebogene Bauteil hatten. Vatter (2015) forschte in seiner wissenschaftlichen Arbeit ebenfalls an den Einflüssen unterschiedlicher Halbzeug- und Werkzeugparameter

auf das Biegeergebnis unter Anwendung der FEM beim DRSB. Trotz unterschiedlicher Prozesswirkmechanismen konnte auch Vatter (2015) einen Einfluss der Wanddicke und des Außendurchmessers auf die Krümmung und die Torsion der gebogenen Bauteile beobachten. Auf Basis der genannten Quellen wird auch für die anschließenden Untersuchungen ein Einfluss unterschiedlicher Halbzeugschwankungen auf die geometrischen Eigenschaften und in Züge dessen auch auf die mechanischen Eigenschaften erwartet. Um den Einfluss quantifizieren zu können, werden überwiegend Simulationen durchgeführt und analysiert und als Ergänzung Versuche mit geschweißten Rundrohren aus P235TR1 mit verringerter Wanddicke ($s = 2,3$ mm) durchgeführt. Bei der Analyse der Simulationen wird im folgenden Kapitel auf die Mises-Vergleichsspannung gesetzt. Damit ist zwar keine Abbildung des Eigenspannungszustandes möglich, aber aufgrund von Stabilitätsvorteilen im Vergleich zu der Axialspannung S22 lassen sich qualitative Aussagen über den Einfluss auf den vorherrschenden Spannungszustand treffen. Zudem werden reale Versuche mit Rohren unterschiedlicher Wandstärke durchgeführt, welche eine deutlich höhere Aussagekraft besitzen. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse mit den bereits vorhandenen Ergebnissen aus Kapitel 7.1 verglichen und analysiert. Ziel ist es, aus den Ergebnissen Erkenntnisse über den Einfluss der Halbzeugschwankungen auf die geometrischen und mechanischen Eigenschaften abzuleiten und damit die bestehende Wissensbasis zur entkoppelten Beeinflussung geometrischer und mechanischer Eigenschaften beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize zu erweitern.

Zu Beginn wird der Einfluss der geometrischen Halbzeugschwankungen auf den Radius des konstant gebogenen Bereichs untersucht. Basierend auf dem Zusammenhang zwischen Matrizenauslenkung und Biegeradius (vgl. Abbildung 6.1) wird eine neue Biegekinematik definiert, um den Einfluss der Halbzeugschwankungen zu untersuchen. Die Biegekinematik wird so gewählt, dass ein möglichst enger Biegeradius entsteht, da aufgrund des hohen Umformgrads ein großer Einfluss der Halbzeugschwankungen erwartet wird. Als Halbzeugschwankungen werden Veränderungen in der Wanddicke und im Außendurchmesser getrennt voneinander untersucht, um den Einfluss der unterschiedlichen Störgrößen quantifizieren zu können. Für die Wanddicke wird dabei ein Bereich von 2,30 – 2,90 mm festgelegt. Dies deckt entsprechend der Fertigungstoleranzen der geschweißten Rundrohre den möglichen Bereich der Wanddicken ab, da diese laut DIN EN 10217-1:2019 eine Schwankung von $\pm 0,3$ mm aufweisen dürfen. Für den Außendurchmesser wird der Bereich auf 41,9 – 42,9 mm eingeschränkt, was ebenfalls den erlaubten Toleranzbereich von $\pm 0,5$ mm abdeckt. Für die Simulationen wird jeweils ein Parameter verändert, während der andere Parameter konstant gehalten wird. In der Abbildung 7.9 sind die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen in Bezug auf den entstandenen Biegeradius dargestellt. Die Parameterkonfiguration mit $s = 2,6$ mm und $D_A = 42,4$ mm entspricht den nominellen Werten und somit der idealen Konfiguration, weswegen es als Referenz gesehen werden kann.

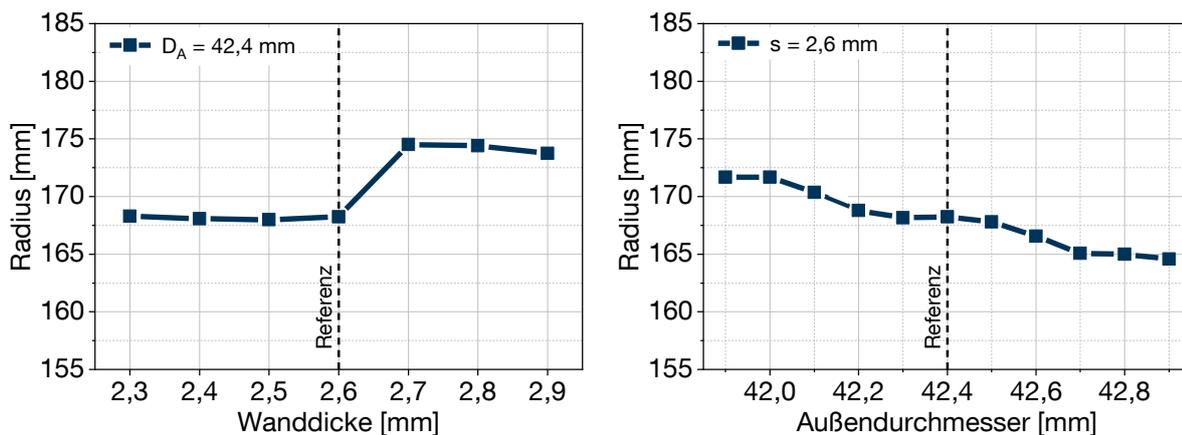


Abbildung 7.9: Simulationsergebnisse zur Bewertung der Einflüsse der geometrischen Halbzugschwankungen auf den konstant gebogenen Radius

Betrachtet man zuerst die Ergebnisse bei Veränderung der Wanddicke, so lässt sich deutlich erkennen, dass eine Reduzierung der Wanddicke unter 2,6 mm keine augenscheinliche Veränderung im Biegeradius mit sich bringt, sondern sich ein annähernd konstanter Biegeradius (~ 168 mm) einstellt. Wird die Wanddicke hingegen ausgehend von 2,6 mm erhöht, so zeigt sich eine deutliche Veränderung des gebogenen Radius und damit ein Einfluss auf die geometrischen Eigenschaften. Steigt die Wanddicke von 2,6 mm auf 2,7 mm an, so ist in den Simulationsergebnissen auch ein Sprung im Radius des konstant gebogenen Bereichs von ~ 168 mm auf ~ 175 mm zu erkennen. Wird die Wanddicke nun weiterhin erhöht, so bleibt der Radius auf dem erhöhten Niveau und fällt dann tendenziell ab. Die simulierten Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass eine Erhöhung der Wanddicke einen deutlich stärkeren Effekt zeigt als die Reduzierung der Wanddicke.

Bei Veränderung des Außendurchmessers unter Beibehaltung der konstanten Wanddicke von $s = 2,6$ mm zeigen die Ergebnisse einen signifikant anderen Trend, als im Vergleich zur Veränderung der Wanddicke. Betrachtet man die rechte Seite der Abbildung 7.9 so ist zu erkennen, dass eine Reduzierung des Außendurchmessers, ausgehend von $D_A = 42,4$ mm eine Erhöhung des gebogenen Radius mit sich bringt. Wird der Außendurchmesser hingegen erhöht, so zeigt sich eine kontinuierliche Abnahme des Biegeradius. So unterscheiden sich beispielsweise die Simulationsergebnisse mit $D_A = 41,9$ mm und $R = 171,69$ mm zu denen mit $D_A = 42,9$ mm und $R = 164,58$ mm um über 4 %. Somit lässt sich für den Außendurchmesser anhand der gezeigten Ergebnisse ableiten, dass ein Anstieg des Außendurchmessers, ausgehend von der unteren Toleranzgrenze von 41,9 mm, zu einer kontinuierlichen Reduzierung des gebogenen Radius führt.

Zusammenfassend lässt sich anhand der vorliegenden Simulationsergebnisse ableiten, dass sowohl die Wanddicke als auch der Außendurchmesser einen Einfluss auf die geometrischen

Eigenschaften haben. Das deckt sich soweit auch mit den Ergebnissen des Stands der Technik, in dem beispielsweise Beulich (2022) und Vatter (2015) den selben Zusammenhang für unterschiedliche Materialien und Biegeprozesse identifiziert haben. Bei den vorgestellten Ergebnissen zeigt sich, dass der Außendurchmesser einen größeren Einfluss auf den Biegeradius hat als im Vergleich zur Wanddicke, was sich ebenfalls mit den Ergebnissen von Beulich (2022) deckt. In den Ausarbeitungen von Beulich (2022) wird festgestellt, dass der Biegeradius eine höhere Sensitivität in Bezug auf den Außendurchmesser aufweist als bezüglich der Wanddicke. Dennoch wird in der Arbeit keine erklärende Begründung für diesen Effekt geliefert, und die beiden Parameter werden auch nicht weiter untersucht.

Eine mögliche Begründung in den vorgestellten Effekten liegt in der Veränderung des Abstands zwischen Rundrohr und Werkzeugkomponenten, insbesondere des Biegedorns und der Biegematrize. Zwar wird eine gewisse Toleranz basierend auf den Halbzeugabmessungen festgelegt, jedoch sind die erlaubten Fertigungstoleranzen für die Halbzeuge höher als die gängigen allgemeinen Fertigungstoleranzen der Werkzeugkomponenten. Steigt beispielsweise der Außendurchmesser des Halbzeuges an, verringert diese den Abstand zwischen Rohraußenseite und Innenseite der Biegematrize. Dadurch wird beim Auslenken der Matrize das Rohr zum einen direkter umgeformt, da der Kraftangriffspunkt der Biegematrize einen geringeren Abstand überwinden muss, um in Kontakt mit der Außenseite des Rohrs zu kommen. Dies hat zur Folge, dass das Rohr dementsprechend früher umgeformt wird und zudem eine etwas höhere effektive Auslenkung erfährt und sich dadurch die tendenziell engeren Radien ausbilden. Reduziert man im Umkehrschluss den Außendurchmesser, so erhöht sich die Toleranz zwischen Rohraußenseite und Matrizeninnenseite, wodurch das Rohr später in Kontakt mit dem Werkzeug tritt und dadurch ein größerer Biegeradius entsteht. Im Vergleich zur Wanddicke hat der Außendurchmesser auch einen größeren Einfluss, da der Außendurchmesser mit der bewegten Matrize in Kontakt tritt und über die Außenseite des Rohrs die Biegung eingeleitet wird. Wenn die Wanddicke verändert wird, führt dies zu einer Änderung der Toleranz gegenüber dem Biegedorn und der Rohrinne. Dies hat auch Auswirkungen auf die geometrischen Eigenschaften, allerdings sind die Effekte nicht so signifikant aufgrund der Flexibilität des Biegedorns. Insgesamt zeigt sich jedoch, dass die geometrischen Halbzeugschwankungen innerhalb des Toleranzbereichs nur geringe Auswirkungen auf die resultierende Geometrie haben. Der Biegeradius variiert zwischen Werten von 165 mm bis 175 mm, was einer Schwankung von weniger als 5 % entspricht. Der geringe Einfluss bestätigt sich auch in den Versuchsdurchführungen. Das untersuchte Grundmaterial weist Schwankungen in der Wandstärke auf (vgl. Abbildung 5.4), die jedoch alle am unteren Ende des geforderten Toleranzbandes sind. Führt man nun Biegeversuche durch, so variieren diese in einem sehr geringen Maße, was zum einen an den geringen geometrischen Halbzeugschwankungen und zum anderen an den gering schwankenden Prozessrandbedingungen (z. B.

Schmierung) liegt. Die Unterschiede sind jedoch sehr gering, da auch die Schwankungen sehr gering sind.

Nachdem die Einflüsse der Halbzeugschwankungen auf die geometrischen Eigenschaften bestimmt wurden folgt nun die Betrachtung der mechanischen Eigenschaften, mit Fokus auf die Eigenspannungen. Hierzu werden zuerst die Simulationen entlang der Außen- und Innenseite in Bezug auf die Mises-Vergleichsspannung ausgewertet und analysiert. Im Anschluss daran werden noch Versuche mit Rundrohren mit reduzierter Wanddicke durchgeführt und deren geometrische und mechanische Eigenschaften mittels den bereits bekannten Methoden ebenfalls untersucht. Abbildung 7.10 zeigt die Ergebnisse der ausgewerteten Mises-Vergleichsspannung aus der Simulation jeweils für die Außen- und Innenseite des Rohrs bei konstanten Außendurchmesser und veränderter Wanddicke sowie für konstante Wanddicke und variierenden Außendurchmesser. Wie bereits in den vorangegangenen Auswertungen wird zur besseren Vergleichbarkeit jeweils der Mittelwert und die Standardabweichung für den konstant gebogenen Bereich des Radius gebildet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.10 dargestellt.

Auf der linken Seite der Abbildung 7.10 ist die Außenseite und auf der rechten Seite die Innenseite des gebogenen Rohrs dargestellt. Im oberen Teil der Abbildung 7.10 sind die Mises-Vergleichsspannungen bei variierender Wanddicke und gleichbleibenden Außendurchmesser aufgetragen und im unteren Teil die Ergebnisse für variierenden Außendurchmesser bei konstanter Wanddicke. Betrachtet man zu Beginn die oberen beiden Abbildungen, dann zeigt sich, dass die Spannungen auf der Außenseite mit zunehmender Wanddicke ebenfalls zunehmen. Auf der Innenseite hingegen steigen die Mittelwerte der Mises-Vergleichsspannung zunächst an und sinken ab $s = 2,7$ mm wieder ab. Vergleicht man die Auswirkungen der varriierenden Wanddicke auf die Mises-Vergleichsspannung auf der Außenseite mit denen auf der Innenseite, ist zu erkennen, dass die Auswirkungen auf der Innenseite deutlicher zu erkennen sind als auf der Außenseite. Dieser Effekt kann auf die Wechselwirkung zwischen Rohr und Dorn beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize zurückgeführt werden, da der Außendurchmesser konstant bleibt und sich dadurch auch keine Veränderung im Kraftangriffspunkt ergibt.

Steigt die Wanddicke an, wird der Abstand zwischen Rohrinne- und Dornaußenseite geringer. Fängt die Matrize sich nun an zu bewegen, tritt der erste Kontaktpunkt zwischen Biegematrize und Rohr auf der Außenseite auf. Hierüber wird die Kraft, die zur Umformung des Rohres notwendig ist eingeleitet. Nach einer geringen Bewegung tritt die Rohrinne- in Kontakt mit dem flexiblen Dorn, wobei die Dauer bis zum Kontakt zwischen Rohrinne- und Dornaußenseite bei ansteigender Wanddicke geringer wird. Somit tritt das Rohr bei höheren Wanddicken früher mit dem Dorn in Kontakt, wodurch sich bereits früher Spannungen im Bauteil aufbauen können. Zusätzlich dazu sorgt eine höhere Wanddicke für eine geringere Toleranz

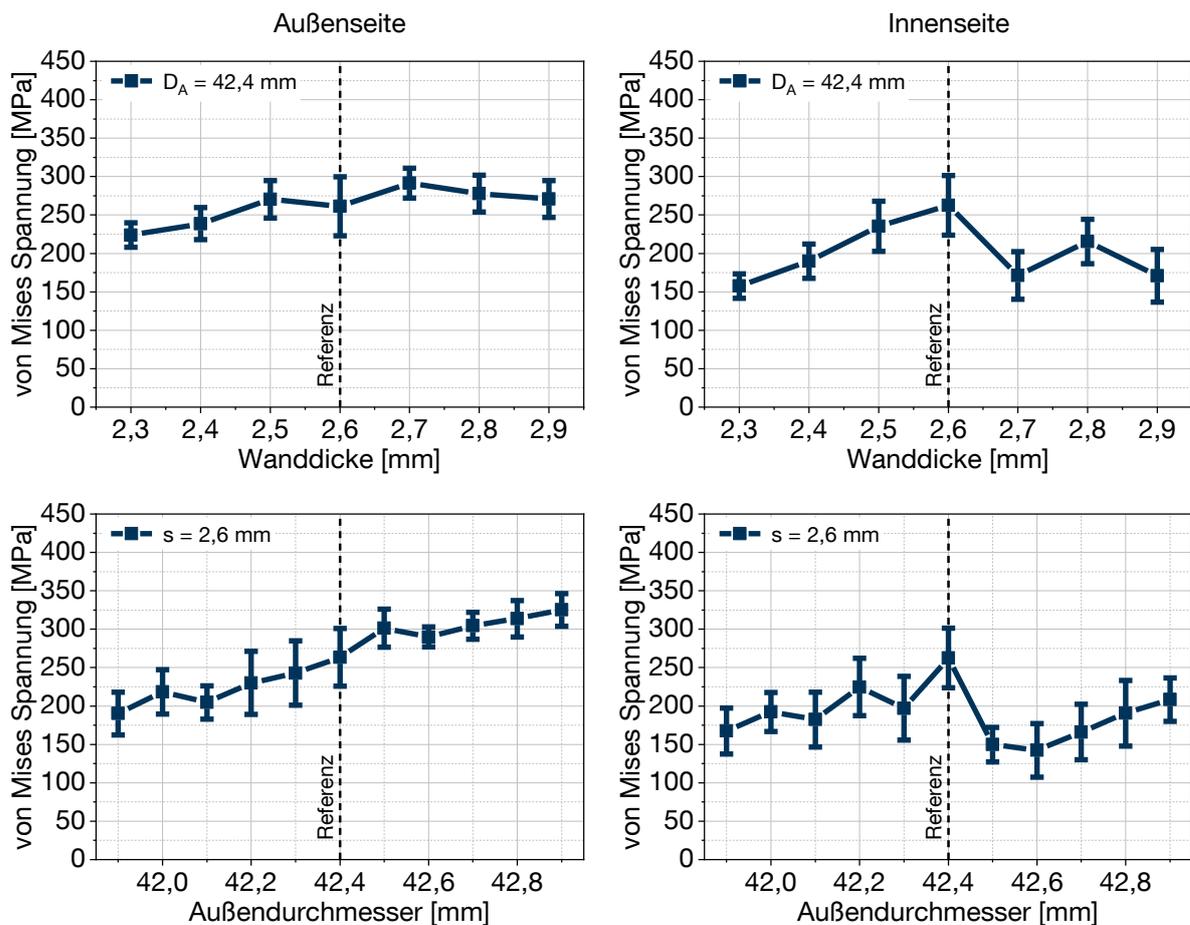


Abbildung 7.10: Simulationsergebnisse zur Bewertung der Einflüsse der Halbzeugschwankungen auf die Mises-Vergleichsspannung im konstant gebogenen Radius aufgeteilt auf Außenseite und Innenseite

zwischen Dorn und Rohrinneite, wodurch beispielsweise die Reibung oder die Flächenpressung ansteigt, was wiederum in erhöhten Spannungen resultiert. Der Abfall in den Spannungen auf der Außen- und Innenseite des Bauteils ab $s = 2,7$ mm ist auf den Anstieg des gebogenen Radius zurückzuführen. Würde sich der gebogene Radius nicht verändern, dann müssten die Spannungen auch für die höheren Wanddicken weiter ansteigen.

Betrachtet man den unteren Teil der Abbildung 7.10 dann erkennt man auf der Außenseite einen nahezu kontinuierlichen Anstieg der Spannungen mit ansteigendem Außendurchmesser. Die Werte für die Mises-Vergleichsspannung liegen im Bereich von 190 – 300 MPa, wobei das Maximum bei einem Außendurchmesser von 42,9 mm und das Minimum bei einem Außendurchmesser von 41,9 mm erreicht wird. Auf der Innenseite hingegen ist kein eindeutiger Trend zu erkennen, da die Spannungswerte mit ansteigendem Außendurchmesser zuerst ansteigen, dann bei 42,5 mm abfallen und wieder ansteigen. Der Anstieg der Spannungen auf der Außenseite

steht im direkten Zusammenhang mit der Verringerung des gebogenen Radius bei ansteigenden Außendurchmesser. Bei einem erhöhten Außendurchmesser kommt es zum früheren Kontakt zwischen Biegematrize und Rohr, weswegen das Rohr eine effektiv größere Auslenkung und damit einen höheren Umformgrad erreicht. Der höhere Umformgrad führt anschließend zu einer engeren Biegung, was wiederum einen Anstieg der Eigenspannungen mit sich zieht. Auf der Innenseite treten unterschiedliche Effekte auf. Wird der Außendurchmesser bis zum nominalen Wert von 42,4 mm erhöht, so steigen auch auf der Innenseite die Spannungen an, was analog zur Außenseite mit dem enger werdenden Biegeradius zu erklären ist. Steigt der Außendurchmesser nun über den nominalen Wert von 42,4 mm, sinkt die Mises-Vergleichsspannung auf der Innenseite zunächst ab und nähert sich anschließend wieder dem nominalen Wert an. Dieser Abfall ab 42,5 mm ist über den Biegedorn zu erklären. Steigt der Außendurchmesser an und bleibt die Wanddicke konstant, so erhöht sich der Abstand zwischen der Innenfläche des Rohrs und den Außenflächen des Biegedorns. Dementsprechend erfolgt der Kontakt zwischen den beiden Flächen später, wodurch der Dorn das Rohr weniger stark von innen abstützt. Mit zunehmendem Rohraußendurchmesser wird dieser Effekt durch die geringere Toleranz und den damit verbundenen erhöhten Spannungseintrag zwischen den Außenflächen des Rohrs und der Biegematrize überwunden. Dies bedeutet, dass die Biegematrize früher in Kontakt mit der Außenfläche des Rohrs tritt und die Umformung einleitet. Daraus resultierend steigen schließlich auch auf der Innenseite die Mises-Vergleichsspannungen an. Da in der Simulation idealisierte Bedingungen unter anderem für die Reibung herrschen, können sich diese Effekte im realen Freiformbiegeprozess stärker oder weniger stark ausprägen.

Um nun die Auswirkungen der geometrischen Halbzeugschwankungen für den realen Freiformbiegeprozess zu analysieren, werden Rohre mit $D_A = 42,4$ mm und $s = 2,3$ mm gebogen und mit den bereits bekannten Ergebnissen verglichen. Hierzu werden die bereits bekannten 6 Biegestrategien des nicht-tangentialen Biegens (9/22, 10/16, 11/13, 11/14, 12/12, 12/13) verwendet und im Anschluss an den Freiformbiegeprozess die geometrische und mechanische Eigenschaften bestimmt sowie mit den bereits bekannten Ergebnissen aus Kapitel 7.1 verglichen. Abbildung 7.11 zeigt die Ergebnisse des Vergleichs des resultierenden Biegeradius im konstant gebogenen Bereich für Rundrohre mit unterschiedlichen Wanddicken und gleichem Außendurchmesser. Anhand der Abbildung 7.11 ist zu erkennen, dass auch bei den Rohren mit geringerer Wanddicke ($s = 2,3$ mm) die 7 Biegestrategien des nicht-tangentialen Biegens zu identischen Radien im konstanten Bereich führen. Im Vergleich zu den freiformgebogenen Rundrohren mit Wanddicke $s = 2,6$ mm ergeben sich bei den gebogenen Rundrohren mit Wanddicke $s = 2,3$ mm nur minimale Unterschiede im gebogenen Radius, wobei die dünneren Rohre zu kleinere Radien neigen. Die Ergebnisse spiegeln die bereits bekannten Ergebnisse aus der Simulation wieder, dass es durch die Reduzierung der Wanddicke zwar einen Einfluss gibt,

dieser jedoch bei den geometrischen Eigenschaften kaum spürbar ist. Dieses Ergebnis validiert auch die Simulation, da im virtuellen Labor ebenfalls nur ein geringer Einfluss der verringerten Wandstärke zu erkennen ist, obwohl ein deutlich kleinerer Biegeradius mit mehr Umformung simuliert wurde.

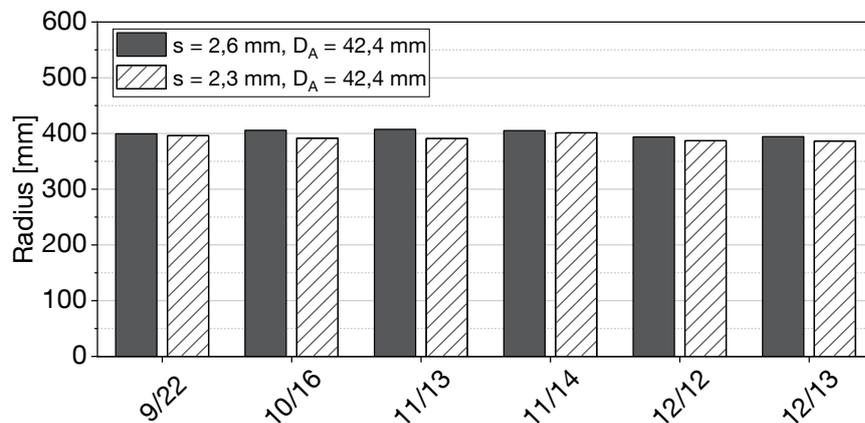


Abbildung 7.11: Vergleich des konstant gebogenen Radius für unterschiedliche Wanddicken bei ausgewählten nicht-tangentialen Positionen der Biegematrix

In Abbildung 7.12 ist ein Vergleich der ausgewerteten BHN-Messungen an den freiformgebogenen, dünnen Rohren ($s = 2,3$ mm) und den gebogenen Standardrohren ($s = 2,6$ mm) dargestellt, um den realen Einfluss der veränderten Wanddicke auf die mechanischen Eigenschaften zu zeigen. Es wird zwischen Außenseite und Innenseite der gebogenen Bauteile unterschieden, wobei die Messungen und Auswertungen analog zum vorangegangenen Kapitel durchgeführt werden. Betrachtet man die linke Seite der Abbildung 7.12 dann zeigt sich, dass der gesamtheitliche Verlauf der dünneren Rundrohre dem der Standardrohre näherungsweise entspricht. Bei genauerer Betrachtung ist zu erkennen, dass die BHN-Energie der dünneren Rohre höher liegen als die Referenzrohre. Da die Außenseite durch überlagerte Zugspannungen charakterisiert ist, ist ein höheres BHN-Energielevel mit einer Reduzierung der vorliegenden Spannungen gleichzusetzen. Dementsprechend führt eine Reduzierung der Wanddicke auf der Außenseite des freiformgebogenen Bauteils zu geringeren Zugspannungen, da die gemessene BHN-Energie im Vergleich zu den Referenzrohren ansteigt. Der Unterschied zwischen den Referenzrohren und den Rohren mit dünnerer Wanddicke fällt auf der Außenseite bei den untergebogenen Biegestrategien geringer aus als bei den übergebogenen Bauteilen, wenn man die Standardabweichungen der Messung mit in Betracht zieht. Auch auf der Innenseite lässt sich mit den dünneren Rohren ein ähnlicher gesamtheitlicher Verlauf wie bei den dickeren Referenzrohren erkennen. Auch hier liegen die BHN-Energien der dünneren Rohre über den Referenzrohren, was jedoch für höhere Druckspannungen spricht. Betrachtet man die absoluten BHN-Energiewerte, so zeigen sich bei

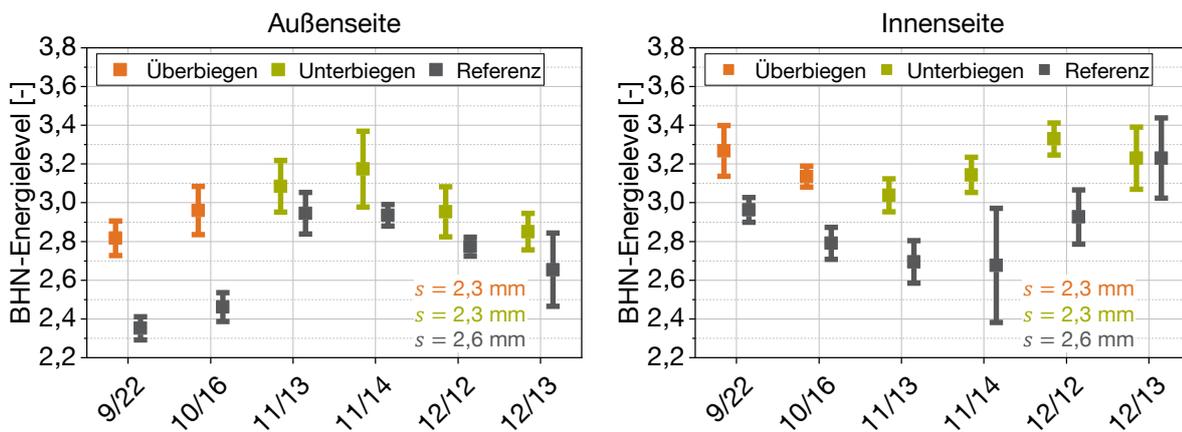


Abbildung 7.12: Vergleich der ausgewerteten BHN-Messungen für über- und untergebogenen Bauteile mit unterschiedlichen Wanddicken, wobei der Radius der einzelnen Biegungen vergleichbar ist

den Biegestrategien 10/16 und 11/13 um ca. 20 % erhöhte BHN-Energien als im Vergleich zu den gleichen Biegestrategien mit den Referenzrohren. Da auf der Innenseite vorrangig Druckspannungen auftreten, ist eine Erhöhung des BHN-Energielevels mit einer Erhöhung der Druckspannungen gleichzusetzen. Dementsprechend weisen die dünneren Rohre auf der Innenseite deutlich höhere Druckspannungen auf, als die Rohre mit der Referenzwanddicke $s = 2,6$ mm.

Dieser Effekt kann über das Arbeitsdiagramm des Freiformbiegens (vgl. Abbildung 2.12) sowie den damit verbundenen Kenngrößen Biegefaktor (Gleichung 2.11) und Wanddickenfaktor (Gleichung 2.12) erklärt werden. Durch die Reduzierung der Wanddicke wird der Wanddickenfaktor erhöht, da die Wanddicke im Nenner steht. Durch die Erhöhung des Wanddickenfaktors und unter Beibehaltung des Biegefaktors wird der Arbeitspunkt im Arbeitsdiagramm weiter nach rechts verschoben, wodurch der Arbeitspunkt näher an einen Bereich rückt indem Biegen nicht mehr möglich ist und Fehler auftreten (vgl. Abbildung 2.7). Darüber hinaus stellt sich vor allem auf der Innenseite der Halbzeuge beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize als Fehler zuerst die Faltenbildung ein, bevor das Bauteil anfängt zu knicken. Nach Borchmann (2021) kann das Überschreiten einer kritischen Druckspannung zur Faltenbildung führen, wobei besonders bei kleinen Biegefaktoren und großen Wanddickenfaktoren ein großes Faltenrisiko besteht. Dementsprechend müssen die Spannungen auf der Innenseite bei dünneren Rohren ansteigen, da diese auf der Innenseite mehr gestaucht werden und damit die Druckspannungen ansteigen. Betrachtet man die rechte Seite der Abbildung 7.12 ist dieser Effekt zu erkennen und darüber hinaus zeigt sich, dass mit steigender Überbiegung dieser Effekt verstärkt und durch ansteigendes Unterbiegen der Effekt abgeschwächt wird. Dies bedeutet, dass beim Überbiegen dünner Rohre die Gefahr der Faltenbildung erhöht wird, als im Vergleich zum Unterbiegen, was wiederum die

Wahrscheinlichkeit der Faltenbildung reduzieren kann.

Anhand der dargestellten Ergebnisse können über den Einfluss der Halbzeugschwankungen auf die geometrischen und mechanischen Eigenschaften bei freiformgebogenen Bauteilen unterschiedlich Schlussfolgerungen abgeleitet werden. Zum einen zeigt sich durch die Simulation, dass Veränderungen sowohl im Außendurchmesser als auch in der Wanddicke Auswirkungen auf die geometrischen und mechanischen Eigenschaften von freiformgebogenen Rundrohren haben. Zum anderen legen die realen Versuchsergebnisse nahe, dass einer reduzierte Wanddicke, einen Anstieg der Druckspannungen auf der Innenseite des Bauteils bewirkt und damit die Gefahr der Faltenbildung erhöht wird. Dadurch, dass die Norm DIN EN 10217-1:2019 Fertigungstoleranzen in der Wanddicke von $\pm 0,3$ mm und im Außendurchmesser von $\pm 0,5$ mm zulässt, kann es durchaus zu erheblichen Chargenschwankungen bei den verwendeten Rundrohren kommen. In den Untersuchungen des Ausgangsmaterials hat sich jedoch gezeigt, dass die wahren Fertigungstoleranzen viel niedriger als die zugelassenen Fertigungstoleranzen sind, wodurch die Auswirkungen der Halbzeugschwankungen geringer ausfallen.

7.3 Einfluss des Abstandes zwischen Biegematrize und Rohrführung

Vorangegangene Untersuchungen, beispielsweise von Beulich (2022) haben bereits gezeigt, dass der Einfluss des Abstandes zwischen der Biegematrize und dem Ausgang der Rohrführung (d_{BMRf}) einen hohen Einfluss auf die Machbarkeit und auf die Qualität des Biegebauteils hat. Dies ist vor allem darin begründet, dass der Ausgang der Rohrführung den Beginn des gebogenen Radius definiert und eine hoher Anteil der notwendigen Biegekräfte durch die Rohrführung aufgenommen werden. Um zu verhindern, dass die Oberfläche der zu biegenden Halbzeuge am Ausgang der Rohrführung beschädigt wird und dafür zu sorgen, dass die Biegungen fließender ineinander überlaufen, ist der Ausgang der Rohrführung meist mit einem Radius versehen. Dadurch wird auch sichergestellt, dass es nicht zum abknicken des Rohres kommt, wenn enge Radien gebogen werden. In der Arbeit von Beulich (2022) wurden Versuche mit unterschiedlichen Materialien, Querschnitten und Abständen zwischen der Biegematrize und der Rohrführung durchgeführt, wobei sich im Bezug auf die resultierende Geometrie und die Qualität des freiformgebogenen Bauteils zeigte, dass es für engere Biegungen empfehlenswert ist den Abstand zu verringern, wohingegen der Abstand für größere Radien vergrößert werden sollte. Um neben den Einfluss auf die geometrischen Eigenschaften auch den Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften, insbesondere den Spannungszustand quantifizieren zu können, werden Simulationen mit unterschiedlichen Abständen zwischen Biegematrize und Rohrführung durchgeführt. Als Kinematik werden dabei die 6 nicht-tangentialen Biegestrategien aus den vorangegangenen

Kapiteln verwendet. Eine Reduzierung des Abstands zwischen Matrize und Rohrführung führt voraussichtlich zu einem kleineren Biegeradius am Bauteil, wodurch die Spannungen sowohl auf der Außen- als auch auf der Innenseite ansteigen. Im Gegensatz dazu wird erwartet, dass sich bei einer Vergrößerung des Abstands ein größerer Biegeradius am Bauteil ergibt, was zu einer insgesamt Abnahme der Spannungen im Vergleich zu den Ergebnissen aus Kapitel 7.1 führen sollte.

In der Simulationsstudie wird der Abstand in jeweils 5 mm Schritten um insgesamt ± 15 mm verändert, ausgehend vom Referenzabstand ($d_{\text{BMRF}} = 50$ mm). Der Abstand bezieht sich dabei auf den Ursprung des Koordinatensystems der Biegeanlage und dem Ausgang des Rohrführung (vgl. Abbildung 4.2) und entspricht dem realen Abstand zwischen Matrize und Rohrführung an der Biegeanlage. Die untere Abstandsgrenze von 35 mm wurde so gewählt, dass sich trotz des geringen Abstands die Matrize immer noch frei bewegen kann, ohne mit dem Ausgang der Rohrführung zu kollidieren. Bei der oberen Abstandsgrenze von 65 mm schließt der Ausgang der Rohrführung mit dem unbeweglichen Dornschaft ab, was bedeutet, dass der unbewegliche Dornschaft direkt am Beginn der Umformzone steht, aber nicht in diese hineinragt. Somit ist bezüglich der Werkzeugkomponenten eine Vergleichbarkeit weithin sichergestellt und es muss kein zusätzliches bewegliches Dornglied eingefügt oder entfernt werden. Die Ergebnisse der Simulationen sind in Bezug auf den resultierenden Biegeradius im konstant gebogenen Bereich in Abbildung 7.13 dargestellt.

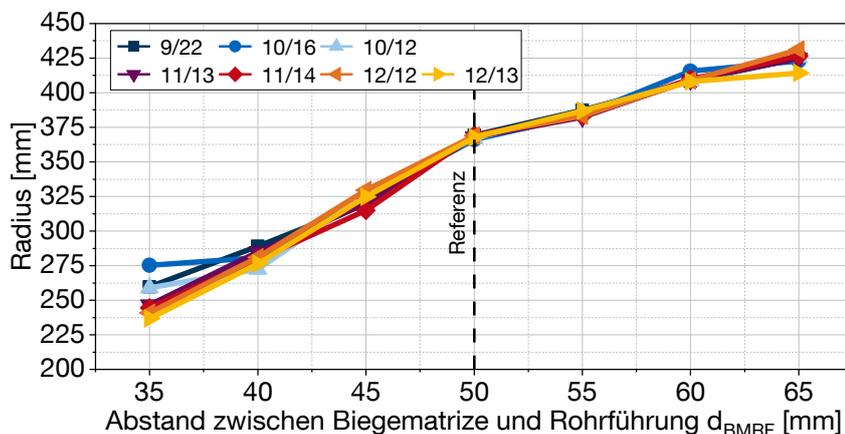


Abbildung 7.13: Simulationsergebnisse zur Veränderung des Abstandes zwischen Biegematrize und Rohrführung in Bezug auf den resultierenden Biegeradius

Die Ergebnisse der Abbildung 7.13 zeigen die Sensitivität des resultierenden Biegeradius bezüglich Veränderungen des Abstands zwischen Biegematrize und Rohrführung. Es lässt sich ein klarer Trend erkennen: Eine Reduktion des Abstands führt zu kleineren Radien und engeren

Biegungen, während eine Erhöhung des Abstands zu einer Vergrößerung der Radien führt. Die Radien reichen von ca. 250 mm bis hin zu ca. 425 mm, was einer Spanne von 175 mm entspricht. Es ist festzustellen, dass bei den untersuchten Biegestrategien trotz veränderter Abstände stets ein identischer Radius entsteht. Erst in den Grenzbereichen der veränderten Abstände fächert sich der Radius auf. Abweichungen bei größeren Radien sind auf Schwankungen in den Halbzeug-Eigenschaften, den optischen Messungen und der Approximation des Kreissegments im konstant gebogenen Bereich zurückzuführen. Jedoch hat die Kinematik der Matrize bei kleineren Radien einen entscheidenden Einfluss auf die Geometrie des gebogenen Bauteils. Wenn man die Abbildung 7.13 genauer betrachtet, zeigt sich bei einer Abstandsänderung von 35 mm, dass die Biegestrategien mit höherer Auslenkung tendenziell engere Radien aufweisen im Vergleich zu den Biegestrategien mit geringerer Auslenkung.

Um einen Bezug zu den Auswirkungen auf den vorliegenden Spannungszustand herzustellen, werden an den Grenzbereichen des Abstands die Mises-Vergleichsspannungen für die Außenseite und Innenseite ermittelt. Wie bereits erwähnt, wird aufgrund von qualitativen Vergleichen und Stabilitätsvorteilen die Mises-Vergleichsspannung gewählt, obwohl sich daraus keine direkte Korrelation zum vorliegenden Eigenspannungszustand ergibt. Um einen Vergleich mit den Referenzwerten ($d_{\text{BMRF}} = 50 \text{ mm}$) aus Kapitel 7.1 zu ermöglichen, werden nicht die durchschnittlichen Werte und Standardabweichungen angegeben, sondern die prozentuale Veränderung. Es ist zu beachten, dass aufgrund des veränderten Abstands zwischen Biegematrize und fixer Rohrführung auch die Radien für verschiedene Abstände variieren. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse ist daher nicht möglich. In Abbildung 7.14 ist der prozentuale Unterschied der Mises-Vergleichsspannung im Vergleich zu den Referenzwerten dargestellt.

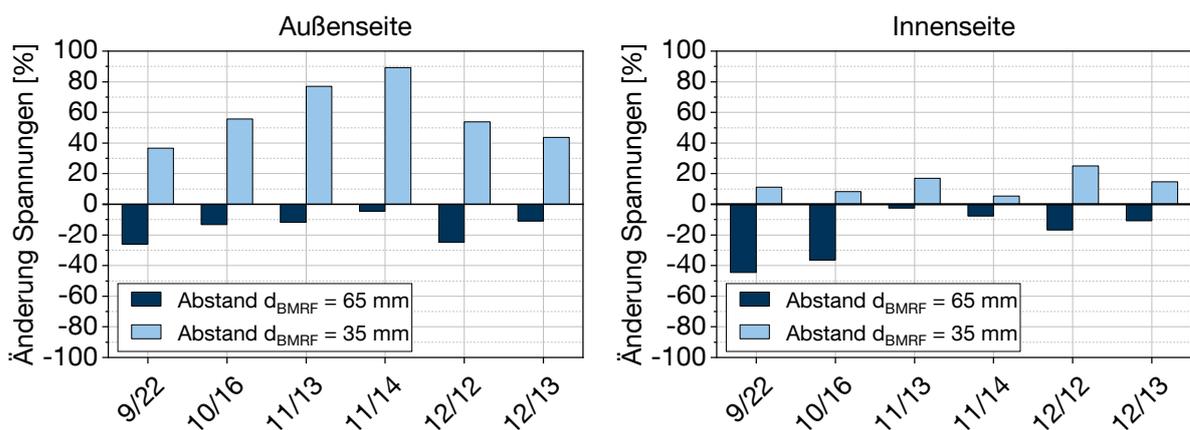


Abbildung 7.14: Darstellung der prozentualen Änderung der Mises-Vergleichsspannung für die Grenzbereiche der Abstandsänderung jeweils bezogen auf die Referenzwerte aus Kapitel 7.1

Es zeigt sich, dass sich die Abstandsänderung bei den Spannungen je nach Biegestrategie anders auswirkt. Klar zu erkennen ist, dass bei allen Biegestrategien auf der Außenseite die Spannungen zunehmen, wenn der Abstand verringert wird und die Spannungen abnehmen, wenn der Abstand vergrößert wird. Die hängt vor allem mit der Veränderung der gebogenen Radien zusammen, da sich die Radien bei der Abstandsänderung ebenfalls verändern. Die Effekte auf der Innenseite sind deutlich weniger stark ausgeprägt als auf der Außenseite, zeigen jedoch denselben Trend. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich auch der Abstand als Stellgröße zur Beeinflussung der geometrischen und mechanischen Eigenschaften eignet, wobei hier zum einen eine ansteuerbare und längenveränderliche Rohrführung benötigt wird und zum anderen eine sehr enge Verknüpfung mit der Kinematik besteht.

7.4 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse

In den vorangegangenen Kapiteln wurden unterschiedliche prozessrelevante Stell- und Störgrößen auf deren Einfluss auf die geometrischen und mechanischen Eigenschaften hin untersucht, mit dem Ziel die mechanischen Eigenschaften entkoppelt von den geometrischen Eigenschaften zu beeinflussen und dadurch einen eigenschaftsflexiblen Freiformbiegeprozess zu ermöglichen. Dabei wurden insbesondere die Kinematik der Biegematrize und der Abstand zwischen Biegematrize und Rohrführung als wesentliche Stellgrößen innerhalb der zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade der Freiformbiegeanlage identifiziert. Als prozessrelevanteste Störgrößen wurden die geometrischen Halbzeugschwankungen des Außendurchmessers und der Wanddicke innerhalb der erlaubten Fertigungstoleranzen analysiert.

Die Kinematik der Biegematrize hat sich dabei als ideale Stellgröße zur entkoppelten Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften von der Biegegeometrie gezeigt, denn durch eine nicht-tangentiale Anstellung der Biegematrize wird es ermöglicht Biegebauteile mit unterschiedlichen Eigenspannungszustand bei gleicher Zielgeometrie zu fertigen. Dabei kann zwischen Überbiegen (höhere Rotation der Biegematrize) und Unterbiegen (geringere Rotation) unterschieden werden. Beim Überbiegen werden die Spannungen aufgrund der höheren Rotation vor allem auf der Außenseite erhöht, wohingegen Unterbiegen eher für eine Erhöhung der Druckspannungen auf der Innenseite führt. Diese Ergebnisse können genutzt werden, um freiformgebogene Bauteile anforderungsgerecht für nachfolgende Prozesse zu fertigen oder um auf Halbzeugschwankungen in unterschiedlichen Chargen zu reagieren und somit den Ausschuss zu reduzieren.

Eine weitere Stellgröße liefert der Abstand zwischen Biegematrize und Rohrführung, der einen erheblichen Einfluss auf die geometrischen Eigenschaften des Biegebauteils und dementspre-

chend auch auf die mechanischen Eigenschaften hat. Um den Freiheitsgrad auch an der Biegeanlage zu nutzen, müsste eine Aktorik entworfen werden, die es erlaubt die Position der Rohrführung in Relation zur Biegematrize zu verändern. Mit diesem zusätzlichen Freiheitsgrad in Verbindung mit dem nicht-tangentialen Biegen ergeben sich eine Vielzahl an Möglichkeiten Bauteile mit angepassten Eigenspannungen zu fertigen ohne dabei die Zielgeometrie verändern zu müssen.

Mit den genannten Stellgrößen kann neben der Entkopplung der Geometrie und den mechanischen Eigenschaften prinzipiell auch auf Schwankungen in den Halbzeugeigenschaften reagiert werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass vor allem die geometrischen Halbzeugschwankungen einen signifikanten Einfluss auf die Bauteilgeometrie und die daraus resultierenden mechanischen Eigenschaften haben. Durch unzureichende Kenntnis dieser Schwankungen kann es beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize zu Abweichungen und Ausschuss kommen, was wiederum in einem zeit- und kostenintensiven Kompensationsprozess resultiert. Für die verwendeten Halbzeuge wurde die Fertigungsqualität der Halbzeuge untersucht, wobei sich herauskristallisierte, dass die Fertigungstoleranzen eingehalten werden und die Halbzeuge innerhalb eines schmalen Bandes am unteren Ende liegen. Dementsprechend sind die Halbzeuge von besserer Qualität als es in den Fertigungstoleranzen vorgeschrieben ist, weswegen die Effekte der Chargenschwankungen in den Versuchen keinen erheblichen Einfluss zeigten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Anlagenkinematik geeignet ist eine Entkopplung der geometrischen und mechanischen Eigenschaften zu ermöglichen und das nicht-tangentiale Biegen die Möglichkeiten des Freiformbiegens mit bewegter Matrize erheblich steigert. Um ein noch breites Spektrum an Bauteileigenschaften abzudecken müsste auch die Position der Rohrführung in Relation zu Biegematrize als stellbare Aktorik entworfen werden, da der Abstand einen großen Einfluss auf die Bauteilgeometrie und dementsprechend auf die mechanischen Eigenschaften des freiformgebogenen Bauteils hat. Zusammen mit der vorgestellten Messtechnik und den zur Verfügung stehenden Stellgrößen lassen sich Eigenschaftsschwankungen in den Halbzeugen auch bereits vor dem Biegen identifizieren und mit dem eigenschaftsflexiblen Freiformbiegen besteht die Möglichkeit im Rahmen einer angepassten Vorsteuerung auf die Chargenschwankungen zu reagieren und Bauteile innerhalb der gewünschten Fertigungstoleranz und eines gewünschten Eigenschaftszielbereichs zu fertigen.

8 Untersuchungen zur Rückfederung und Belastbarkeit

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur Rückfederung und Belastbarkeit freiformgebogener Stahlrohre vorgestellt. Dabei kommen einige beispielhafte Bauteile aus Kapitel 7 zum Einsatz, bei denen trotz identischer Krümmung im konstant gebogenen Bereich unterschiedliche Spannungszustände vorliegen. Der erste Abschnitt des Kapitels gibt einen Überblick über die Versuchsabläufe zur Bestimmung der Rückfederung und der Belastbarkeit, während im zweiten Abschnitt die Versuchsergebnisse aufgeführt und diskutiert werden.

8.1 Versuchsdurchführung

Bei der Versuchsdurchführung wird zwischen den Versuchen zur Bestimmung der Rückfederung und den Versuchen zur Bestimmung der Belastbarkeit unterschieden. Für beide Versuchsgruppen werden jeweils 7 Rohre mit den bekannten Biegestrategien aus Kapitel 7 gebogen. Die freiformgebogenen Bauteile sind dadurch charakterisiert, dass alle eine vergleichbare Krümmung im konstant gebogenen Bereich aufweisen, sich jedoch im Spannungszustand auf der Außen- und Innenseite voneinander unterscheiden. Um nun die Auswirkungen der unterschiedlichen Spannungszustände auf die Rückfederung zu untersuchen, werden die Bauteile nach dem Freiformbiegen spannungsarmgeglüht und im Anschluss daran mit dem Zustand vor der Wärmebehandlung verglichen. In diesem Kontext wird angenommen, dass durch das Spannungsarmglühen die Eigenspannungen freigesetzt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Ausgangszustände der Bauteile können sich anschließend verschiedene Rückfederungen nach dem Spannungsarmglühen ergeben und messbar sein. Um den gesamten Prozess zur Bestimmung der Rückfederung besser zu verstehen, ist dieser in Abbildung 8.1 grafisch dargestellt und die einzelnen Schritte im Folgenden detailliert beschrieben.



Abbildung 8.1: Prozessablaufdiagramm zur Untersuchung der Rückfederung unterschiedlicher nicht-tangential freiformgebogener Bauteile

Der Prozessablauf beginnt mit dem nicht-tangentialen Freiformbiegen und der damit verbundenen Fertigung von Bauteilen mit unterschiedlichen Spannungszuständen auf der Innen- und Außenseite bei konstanten Biegeradius und Biegewinkel. Im Anschluss daran werden die freiformgebogenen Bauteile mittels optischer Geometriemessung digitalisiert, die geometrischen Eigenschaften analysiert und die Ergebnisse gespeichert. Um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erzielen, werden die Rückfederungen anhand der gemessenen Winkel zwischen den beiden Schenkeln bewertet. Da der Biegewinkel in direkten Zusammenhang mit dem Biegeradius steht, lassen sich Änderungen am Biegewinkel auch auf Änderungen im Biegeradius zurückführen und umgekehrt. Im Anschluss an die Charakterisierung der Rohre nach dem Freiformbiegen folgt das Spannungsarmglühen zur Freisetzung der Eigenspannungen. Dabei wird erwartet, dass die Bauteile aufgrund ihres unterschiedlichen Spannungszustandes auch unterschiedlich stark rückfedern. Für das Spannungsarmglühen werden die freiformgebogenen Rohre in einen Wärmebehandlungssofen gegeben und es wird eine definierte Temperaturkurve abgefahren. Als Temperaturkurve wird eine einfache Trapezkurve verwendet, welche eine Aufheizrate, eine Haltezeit und eine Abkühlrate vorsieht. Für die Untersuchungen wird eine Aufheizzeit von 2 h festgelegt, nach der die gewünschte Haltetemperatur erreicht wird. Die Haltetemperatur wird anschließend für weitere 2 h gehalten, ehe diese über 48 h wieder zurück auf Raumtemperatur abgekühlt wird. Um die Parameter der Temperaturkurve mit dem höchsten Spannungsabbau zu identifizieren, werden in Voruntersuchungen Rohrabschnitte mit unterschiedliche Haltetemperaturen (580 °C, 600 °C und 620 °C) geglüht und im Anschluss daran der Abbau der Spannungen mittels Zerlegemethode bewertet. Für die Ermittlung de Abbaus der Eigenspannungen nach dem Spannungsarmglühen wurden jeweils 3 Ringe entlang der Rohrlängsachse vorsichtig aufgetrennt und der Rücksprung des Materials gemessen. Dabei gilt je geringer der Rücksprung ausfällt, desto mehr Spannungen wurden durch das Spannungsarmglühen abgebaut. Bei den Versuchen hat sich gezeigt, dass die Haltetemperatur von 620 °C zu den Ergebnissen mit dem geringsten Rückfederungen führt, weswegen diese Temperatur für die Untersuchungen der freiformgebogenen Rohre beim Spannungsarmglühen verwendet wird. Nachdem der Wärmebehandlungsprozess abgeschlossen ist, werden die Rohre abermals mit dem optischen Geometriemessgerät digitalisiert und in Bezug auf deren geometrische Eigenschaften ausgewertet. Im Anschluss werden die Ergebnisse vor und nach dem Spannungsarmglühen miteinander verglichen und Rückschlüsse auf die Rückfederung gezogen.

Der zweite Prüfversuch behandelt die Analyse der Belastbarkeit der freiformgebogenen Bauteile und wird in der Universalprüfmaschine Zwick 1484 durchgeführt. Das Ziel der Prüfung ist es, Unterschiede in der maximalen Belastbarkeit der Bauteile festzustellen und diese mit dem vorliegenden Eigenspannungszustand in Verbindung zu bringen. Dadurch, dass bereits gezeigt wurde, dass die Bauteile den gleichen Biegeradius besitzen (vgl. Kapitel 7.1) und der Biegewinkel di-

rekt über die Vorschubslänge eingestellt werden kann, können die geometrischen Eigenschaften vernachlässigt werden. Zur Durchführung der Prüfung werden Bauteile mit einem Biegewinkel von 180° gebogen, in der Zugprüfmaschine eingespannt und der obere Schenkel um einen vorgegebenen Weg ($\Delta L_T = 150$ mm) in Richtung des unteren Schenkels verschoben. Durch das Verfahren der Traverse wird im Prüfbauteil eine Kraft erzeugt, die von der Kraftmessdose in der Universalprüfmaschine aufgenommen wird. Zusätzlich mit dem verbauten Wegsensor entsteht ein zeitsynchronisiertes Kraft-Weg-Signal, welches im Anschluss ausgewertet, analysiert und über die unterschiedlichen Biegestrategien hinweg verglichen werden kann. Abbildung 8.2 zeigt den Versuchsaufbau und zeigt zudem eine schematische Darstellung der durchgeführten Prüfung. Aufgrund der unterschiedlichen Spannungszustände auf der Innen- und Außenseite der freiformgebogenen Bauteile und des annähernd konstanten Radius für alle 7 Versuchsbauteile, wird erwartet, dass sich die Kraft-Weg-Kurven unterscheiden und dieser Unterschied mit dem vorliegenden Spannungszustand korreliert werden kann. Um darüber hinaus eine bessere Vergleichbarkeit der Daten zueinander zu schaffen, wird aus den Kraft-Weg-Kurven die maximale Kraft und der dazugehörige Verfahrensweg der Traverse bestimmt sowie die auftretenden Kräfte bei der Hälfte des Verfahrenswegs der Traverse ($\Delta L_T = 75$ mm) ausgewertet und ebenfalls miteinander verglichen.

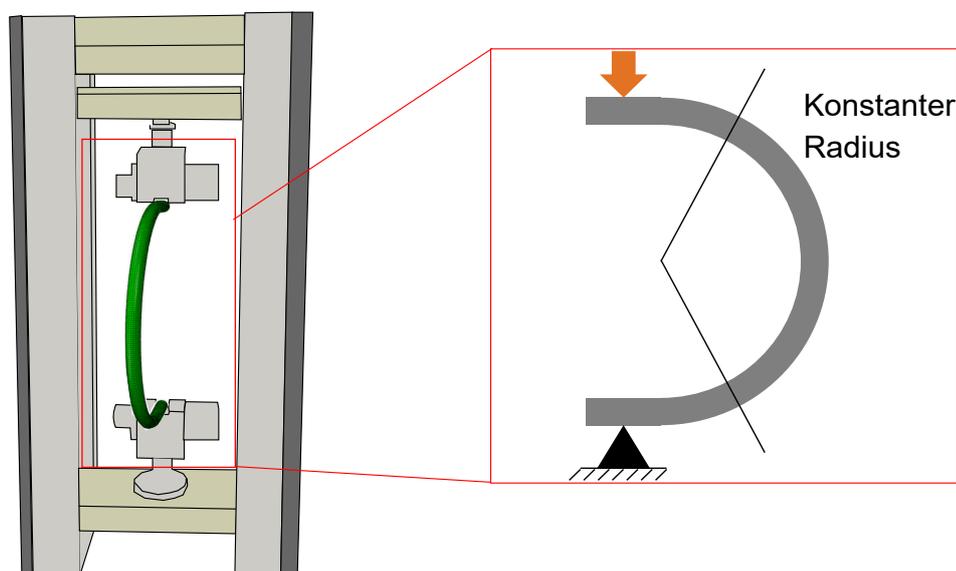


Abbildung 8.2: Schematische Darstellung der Universalprüfmaschine mit im unteren Prüfraum eingebauten hydraulischen Spannbacken für Belastungsversuche an halbrunden Rohrbögen

8.2 Versuchsergebnisse und Diskussion

In Abbildung 8.3 sind die Ergebnisse der Winkeldifferenz vor und nach dem Spannungsarmglühen auf der linken Seite dargestellt. Dabei sind auf der Abszisse die unterschiedlichen Biegestrategien aufgelistet, während auf den Ordinaten die Winkeländerungen aufgrund der freigesetzten Eigenspannungen und der damit verbundenen Rückfederung nach dem Spannungsarmglühen dargestellt sind. Die Winkeldifferenz berechnet sich über den Unterschied des Winkels zwischen den beiden Schenkel vor und nach dem Spannungsarmglühen, wobei eine positive Winkeldifferenz auf eine Erhöhung des Winkels und eine negative Winkeldifferenz auf eine Reduzierung des Winkels hinweist. Aufgrund des direkten Zusammenhangs zwischen Biegewinkel und Biegeradius und der konstanten Rohrlänge für alle Bauteile kann eine Reduzierung des Winkels mit einer Erhöhung des Radius und eine Erhöhung des Winkels mit einer Reduzierung des Biegewinkels gleichgesetzt werden. Die rechte Seite der Abbildung 8.3 zeigt die bereits aus Kapitel 7.1 und Abbildung 7.6 bekannten BHN-Energien der nicht-tangential gebogenen Rohre vor dem Spannungsarmglühen für die Innen- und Außenseite in einer anderen Darstellungsweise. Die BHN-Energien sollen helfen Korrelationen zwischen dem Abbau der Spannungen durch das Spannungsarmglühen und der damit verbundenen Winkeländerung sowie mit der späteren Prüfung der Belastbarkeit herzustellen. Auf eine Messung der BHN-Energien nach dem Spannungsarmglühen wird verzichtet, da sich das Gefüge durch das Spannungsarmglühen ändert, was einen erheblichen Einfluss auf das BHN-Signal hat und damit nicht mehr vergleichbar ist. In der vorgestellten Analysemethodik des BHN-Signals kann nicht zwischen dem Einfluss der Gefügeänderung durch das Spannungsarmglühen oder dem Einfluss des Spannungsabbaus unterschieden werden.

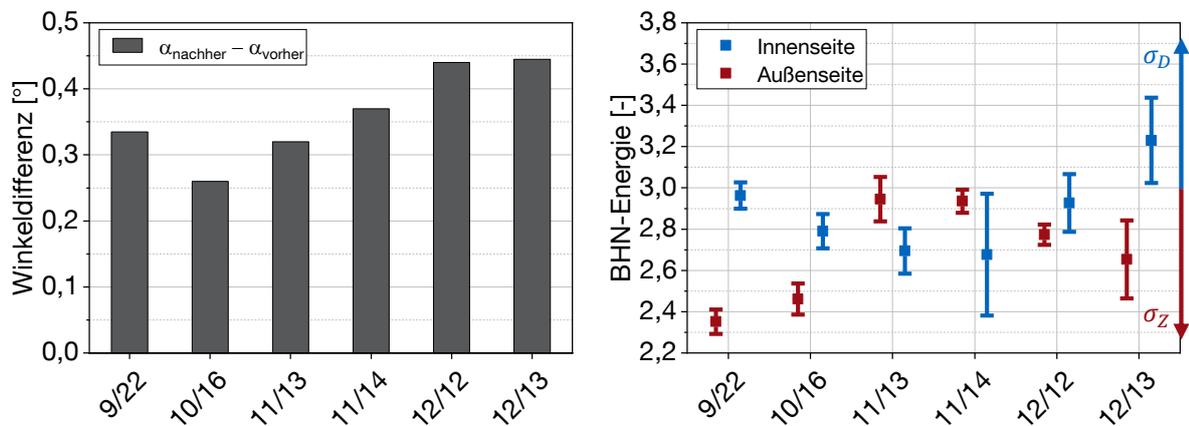


Abbildung 8.3: Darstellung der Winkeldifferenz durch das Spannungsarmglühen (links) und BHN-Energien für die Außen- und Innenseite vor dem Spannungsarmglühen

Im Gesamtüberblick der dargestellten Ergebnisse ist direkt zu erkennen, dass alle Biegestrategien unterschiedlich stark rückfedern, da die Winkeldifferenz in allen untersuchten Biegestrategien variiert. Die maximale Winkeldifferenz wird bei der Biegestrategie 12/13 mit einer Winkeldifferenz von $0,45^\circ$ erreicht. Die geringste Winkeldifferenz tritt bei der Biegestrategie 10/16 auf und beträgt $0,26^\circ$. Betrachtet man den Verlauf aller dargestellten Winkeländerungen, so nehmen diese bis zur Biegestrategie 10/16 ab und steigen anschließend wieder an. Nimmt man nun auch die ausgewerteten BHN-Energien mit in Betracht, so ist tendenziell der gleiche, annähernd parabolische Verlauf der Winkeländerungen und der Spannungen auf der Innenseite zu erkennen. Wichtig zu beachten ist dabei, dass die gezeigten BHN-Energien aus Abbildung 8.3 den bereits gebogenen Zustand vor dem Spannungsarmglühen zeigen. Bereits in Kapitel 7 wurde erläutert, dass auf der Innenseite überwiegend Druckspannungen vorliegen und deswegen eine Erhöhung des BHN-Energielevels mit einem Anstieg in den Spannungen gleichzusetzen ist, während auf der Außenseite aufgrund der überlagerten Zugspannungen das Gegenteil der Fall ist. Liegen nun höhere Zugspannungen auf der Außenseite vor, wie es bei den übergebogenen Biegestrategien (9/22 und 10/16) der Fall ist, so führt dies tendenziell zu einer geringeren Rückfederung als im Vergleich zu den untergebogenen Biegestrategien. Dieser Effekt ist so zu interpretieren, dass durch das frei werden hoher Zugspannungen auf der Außenseite die gebogenen Rohre in gewisser Weise aufgehen, was zu einem reduzierten Biegewinkel und einem erhöhtem Biegeradius führt. Erhöht man hingegen durch Unterbiegen (11/13, 11/14, 12/12 und 12/13) die Druckspannungen auf der Innenseite, steigt auch die Winkeländerung an. Durch den Abbau hoher Spannungen auf der Innenseite beim Spannungsarmglühen zieht sich das gebogene Bauteil enger zusammen, was zu einer Erhöhung des Biegewinkels führt.

Zusammenfassend zeigen die dargestellten Ergebnisse, dass variierende Spannungszustände in Bauteilen mit vergleichbaren Radien auch zu unterschiedlichen Rückfederungen nach dem Spannungsarmglühen führen. Übergebogene Bauteile neigen eher zu einer Verringerung des Biegewinkels und einer entsprechenden Erhöhung des Biegeradius. Im Gegensatz dazu führt das Unterbiegen der Bauteile zu höheren Spannungen auf der Innenseite, was eine Erhöhung des Biegewinkels und eine Reduzierung des Biegeradius nach dem Spannungsarmglühen bewirkt. Demnach können nicht-tangentialen Biegestrategien genutzt werden, um Bauteile vor dem Spannungsarmglühen zu verbessern, damit eine gewünschte Rückfederung erzielt wird oder die Rückfederung gemäß den Bauteilanforderungen positiv beeinflusst wird.

Um den Einfluss unterschiedlicher Spannungszustände in freiformgebogenen Bauteilen durch einen weiteren Prüfversuch zu bestätigen, wird zusätzlich zur Rückfederung auch die Belastbarkeit der freiformgebogenen Bauteile untersucht. Hierzu werden Bauteile mit einem Biegewinkel von 180° durch Anwendung des nicht-tangentialen Biegens gefertigt und anschließend in die

Universalprüfmaschine eingespannt (vgl. Abbildung 8.2). Zur Durchführung der Prüfung wird der obere Schenkel um 150 mm in Richtung des unteren Schenkels verschoben und die entstehende Kraft-Weg-Kurve aufgezeichnet. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 8.4 grafisch dargestellt, wobei auf der linken Seite die Kraft-Weg-Kurven der unterschiedlichen Biegestrategien zu sehen sind. Auf der rechten Seite der Abbildung 8.4 sind die maximal auftretenden Kräfte (F_{max}) während der gesamten Prüfung sowie die Kräfte bei einem Standardweg der Traverse von 75 mm dargestellt. Bei den Kraft-Weg-Kurven handelt es sich um das aufgezeichnete Rohsignal ohne Glättung, weswegen hier einige Ausreißer zu erkennen sind. Diese Stellen treten jedoch nur sehr vereinzelt auf und beeinflussen den Gesamtverlauf nicht entscheidend und können daher vernachlässigt werden.

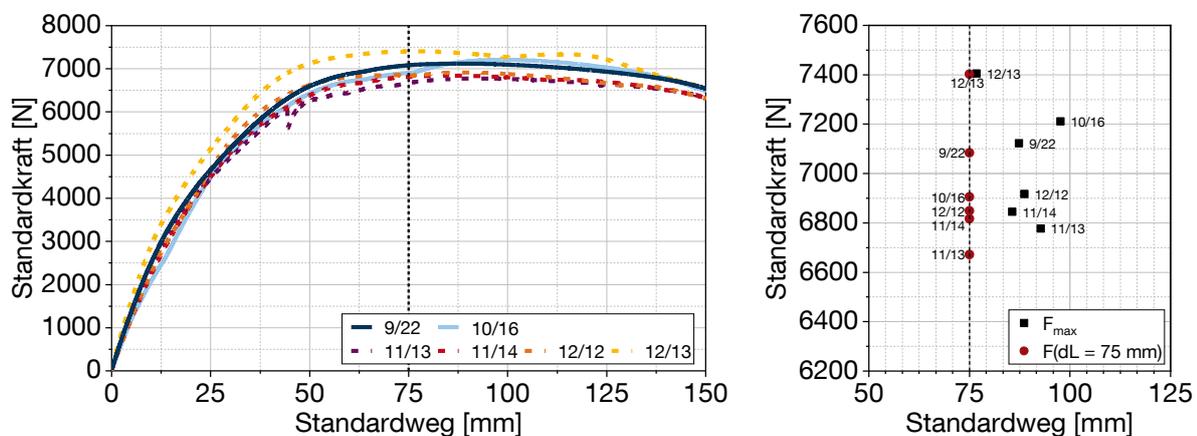


Abbildung 8.4: Kraft-Weg-Kurven der Belastbarkeitsprüfung unterschiedlicher Biegestrategien (links) und maximal auftretende Kräfte sowie auftretende Kräfte bei einem Standardweg von 75 mm

Die Ergebnisse der Abbildung 8.4 zeigen entsprechend der Erwartung deutliche Unterschiede in den einzelnen Verläufen. Es zeigt sich, dass die Biegestrategie 12/13 einen insgesamt höheren Verlauf hat als alle anderen Biegestrategien und die Kombination 11/13 den Verlauf mit den geringsten Kräften hat. Betrachtet man die einzelnen Verläufe genauer, so ist kein klarer Unterschied zwischen übergebogenen und untergebogenen Biegestrategien zu erkennen. Es gibt sowohl untergebogene Biegestrategien die sowohl einen höheren Kraftverlauf (12/13) als auch einen niedrigeren Kraftverlauf (11/13) als die übergebogenen Varianten aufweisen. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Biegestrategie und Belastbarkeit lässt sich auch nicht feststellen, wenn man die Kraftmaxima in der rechten Darstellungsweise betrachtet. Zu erkennen ist, dass der Unterschied zwischen der höchsten (12/13) und der geringsten (11/13) maximalen Kraft ca. 0,65 kN beträgt. Die übrigen Biegestrategien verteilen sich unregelmäßig über diese Spanne hinweg. Nimmt man nun die auftretenden Kräfte bei einem Standardweg von 75 mm mit in

die Auswertung auf, so ändert sich in der Reihenfolge der maximal auftretenden Kräfte lediglich die beiden übergebogenen Strategien (9/22 und 10/16). Insgesamt betrachtet lässt sich kein eindeutiger Trend in Bezug auf die Auswirkung von übergebogenen oder untergebogenen Bauteilen feststellen. Obwohl kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Belastbarkeit und den unterschiedlichen Spannungsniveaus der Bauteile hergestellt werden kann, unterstützen die Ergebnisse dennoch die These, dass das nicht-tangentiale Biegen signifikante Veränderungen im Spannungszustand der freiformgebogenen Rohre bewirken kann und sich dies auch auf die Qualität der Bauteile auswirken kann. Dies lässt sich anhand der deutlichen Unterschiede in der Belastbarkeit für die verschiedenen Biegestrategien in den Ergebnissen erkennen.

Bezüglich der realen Belastbarkeit der freiformgebogenen Bauteile sind die dargestellten Kraft-Weg-Kurven, aufgrund des sehr einfachen Versuchsaufbaus nur bedingt aussagefähig. Trotzdem kann mit den Ergebnissen der Belastbarkeitsprüfung die zu Beginn aufgestellte Forschungshypothese bestätigt werden. Die Forschungshypothese sagt aus, dass sich durch die Entkopplung von Geometrie und Eigenspannungen beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize Bauteile mit angepassten Eigenschaften produzieren lassen, wobei die Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften messbar sind und durch Versuche nachgewiesen werden können. Alle gezeigten Bauteile haben die gleiche Zielgeometrie und unterscheiden sich in den mechanischen Eigenschaften, insbesondere im Eigenspannungszustand. Dies konnte sowohl in der Simulation als auch durch mikromagnetische Messungen an real gebogenen Bauteilen nachgewiesen werden. Darüber hinaus konnten sowohl beim Spannungsarmglühen als auch bei den Versuchen zur Belastbarkeit Unterschiede zwischen den einzelnen Biegestrategien gemessen und nachgewiesen werden. Dementsprechend kann auch der letzte Teil der aufgestellten Forschungshypothese bestätigt werden. Durch die Entkopplung von Geometrie und Eigenspannungen beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize ist es möglich, Bauteile mit angepassten Eigenschaften herzustellen, wobei die Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften messbar sind und sich durch Versuche nachweisen lassen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation untersucht das eigenschaftsflexible Freiformbiegen mit bewegter Matrize als Antwort auf die Anforderungen des Megatrends Nachhaltigkeit in der Produktionstechnik. Angesichts der steigenden Bedeutung des Recyclings von Altmetallen für die Herstellung von Halbzeugen zur Reduzierung von CO₂-Emissionen und zur Förderung der Nachhaltigkeit, treten verstärkte Schwankungen in den mechanischen Eigenschaften der Halbzeuge aufgrund des durchmischten Ausgangsmaterials auf. Dies hat erhebliche Auswirkungen auf die resultierenden Bauteile, insbesondere bei einem inkrementellen Prozess wie dem Freiformbiegen mit bewegter Matrize. Die Arbeit konzentriert sich darauf, verschiedene Mess- und Auswertekonzepte einzusetzen und innovative Methodiken zu entwickeln, um die gewünschten Eigenschaften beim Biegen gezielt zu steuern und die Auswirkungen der Halbzeugschwankungen zu minimieren. Dabei wird besonderes Augenmerk auf die Entkoppelung der mechanischen und geometrischen Eigenschaften gelegt, um den Herausforderungen der Zukunft gerecht zu werden. Die Erweiterung der Prozessfreiheitsgrade ermöglicht die Identifizierung von Stellgrößen, die eine gezielte Beeinflussung der Eigenschaften erlauben. Prüfversuche dienen dazu, den positiven Effekt des eigenschaftsflexiblen Freiformbiegens nachzuweisen und somit die Eignung dieses Verfahrens für eine nachhaltige und ressourcenschonende Produktion zu belegen.

Die wissenschaftliche Arbeit widmet sich zu Beginn der Identifizierung geeigneter Messverfahren und Auswertekonzepte, um sowohl die geometrischen Merkmale als auch die mechanischen Eigenschaften der freiformgebogenen Bauteile zu bestimmen. Dabei wird für die Bestimmung der geometrischen Eigenschaften ein optisches Lasermesssystem eingesetzt, welches eine digitale Erfassung und anschließende Auswertung der Bauteile ermöglicht. Als wichtigste Merkmale werden der Biegeradius und der Biegewinkel in den gebogenen Bauteilen analysiert, sowie in den Ausgangsrohren der Verlauf des Außendurchmessers und der Wanddicke betrachtet. Bei der Untersuchung der nicht gebogenen Ausgangsrohre zeigt sich, dass die verwendeten längsnahtgeschweißten Rundrohre aus P235TR1 innerhalb der definierten Fertigungstoleranzen nach DIN EN 10217-1:2019 liegen und diese somit für das Freiformbiegen mit bewegter Matrize geeignet sind. Darüber hinaus weisen die Halbzeuge geringfügige Schwankungen in den geometrischen Abmessungen auf, die jedoch deutlich unter den erlaubten Fertigungstoleranzen liegen. Zur Analyse der geometrischen Merkmale wird ein mehrstufiges Verfahren vorgestellt,

aus dem letztlich der Biegeradius im konstant gebogenen Bereich und der Biegewinkel abgeleitet werden können. Bei den mechanischen Eigenschaften stehen vor allem die Eigenspannungen im Vordergrund, ergänzt durch die Untersuchung der Härte. Zur Bestimmung der Härte wird ein UCI-Messgerät eingesetzt, mit dem ohne aufwendige Probenvorbereitung ein präziser Härtewert auf der Oberfläche ermittelt werden kann. Die Eignung des Verfahrens wird durch Messungen an ungebogenen Rohren und dem Vergleich zu klassischen Härtemessungen bestätigt. Für die Bewertung des Eigenspannungszustands kommt ein mikromagnetischer BHN-Sensor zum Einsatz. Um dessen Validierung beim Freiformbiegen von Rundrohren zu gewährleisten, wurden Rohrzug- und Rohrdruckversuche durchgeführt und mit dem BHN-Sensor aufgenommen. Die Auswertung zeigt, dass das BHN-Signal Änderungen in den Eigenspannungen widerspiegelt und eine qualitative Vergleichsmöglichkeit für den Spannungszustand freiformgebogener Bauteile liefert. Insgesamt bestätigen die dargestellten Verfahren die aufgestellte Forschungshypothese zur Eignung der unterschiedlichen Messverfahren zur Bestimmung geometrischer und mechanischer Eigenschaften freiformgebogener Bauteile.

Für die Identifizierung der Stellgrößen zur Entkopplung geometrischer und mechanischer Eigenschaften wird ein numerisches Modell des gesamten Prozesses erstellt. Dieses virtuelle Labor ermöglicht die gezielte Veränderung einzelner Parameter und die Quantifizierung des Einflusses prozessrelevanter Stell- und Störgrößen. Die Validierung des Modells erfolgt anhand von real gebogenen Bauteilen mit unterschiedlichen Biegeradien und Biegewinkeln. Der Soll-Ist-Vergleich zeigt eine sehr gute Näherung der Simulationsergebnisse an die realen Bauteile. Unterschiede in den Ergebnissen lassen sich durch Unstetigkeiten beispielsweise in der Reibung oder in den Halbzeugeigenschaften im realen Prozess erklären. Aufbauend auf dem virtuellen Labor wird im Anschluss eine Sensitivitätsanalyse der prozessrelevanten Stell- und Störgrößen durchgeführt, wobei neben der Anlagenkinematik auch der Abstand zwischen Biegematrize und Rohrführung als Stellgröße und die geometrischen Fertigungstoleranzen der Halbzeuge als Störgrößen untersucht werden. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Anlagenkinematik als geeignete Stellgröße zur Entkopplung geometrischer und mechanischer Eigenschaften dient. Durch die vollständige Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade und einer damit verbundenen nicht-tangentiale Stellung der Biegematrize wird das Über- und Unterbiegen als Alternative zur tangentialen Stellung der Biegematrize eingeführt. Dieses nicht-tangentiale Über- und Unterbiegen ermöglicht es, Bauteile mit unterschiedlichen Spannungszuständen bei gleicher Zielgeometrie zu biegen. Experimentelle Freiformbiegeversuche und mikromagnetische BHN-Messungen als Indikator für Veränderungen in den Eigenspannungen bestätigen diese Ergebnisse. Weitere Untersuchungen mit verschiedenen Biegestrategien verdeutlichen darüber hinaus den Einfluss von geometrischen Halbzeugschwankungen und dem Abstand zwischen Biegematrize und Rohrführung auf die resultierenden Eigenspannungen und Biegegeometrien.

Abschließend werden in der Dissertation die freiformgebogenen Bauteile mit gleicher Geometrie, aber unterschiedlichen Spannungszuständen in zwei Prüfverfahren auf Rückfederungsverhalten und Belastbarkeit untersucht. Zur Analyse der Rückfederung werden die Bauteile spannungsarmgeglüht und die Rückfederung durch einen Vorher-Nachher-Vergleich über den Biegewinkel bestimmt. Die Belastbarkeitsprüfung erfolgt in einer Universalprüfmaschine und eine vorgegebene Belastungskurve. Die erzielten Ergebnisse der Untersuchung zeigen signifikante Unterschiede sowohl in der Rückfederung als auch in der Belastbarkeit der freiformgebogenen Bauteile. Besonders bemerkenswert ist, dass diese Unterschiede trotz der identischen Bauteilgeometrie auftreten, was auf die variierenden mechanischen Eigenschaften zurückzuführen ist. Diese Erkenntnis bekräftigt die erfolgreiche Umsetzung des eigenschaftsflexiblen Freiformbiegens mit bewegter Matrize, da es ermöglicht, die mechanischen Eigenschaften gezielt zu steuern und dadurch Bauteile mit spezifischen Eigenschaften zu erzeugen. Diese innovative Methode eröffnet neue Perspektiven für die Biegetechnik und unterstreicht ihre Relevanz im Hinblick auf die Anforderungen der modernen Industrie der Zukunft.

Zusammenfassend konnte diese Dissertation erfolgreich zeigen, dass die Freiheitsgrade der Freiformbiegeanlage genutzt werden können, um Bauteile mit gleicher Zielgeometrie, aber unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften herzustellen. Durch den Einsatz des BHN-Sensors konnte die Veränderung der Eigenschaften gemessen und durch Prüfversuche nachgewiesen werden. Die aufgestellten Forschungshypothesen wurden durch zahlreiche Simulationen, Versuche und Messungen bestätigt, und somit konnte die Forschungsfrage zum eigenschaftsflexiblen Freiformbiegen erfolgreich beantwortet werden. Diese Erkenntnisse tragen dazu bei, den Anforderungen des Megatrends Nachhaltigkeit in der Produktionstechnik gerecht zu werden und eröffnen neue Möglichkeiten für die Fertigung anforderungsgerechter Biegebauteile.

9.2 Ausblick und Potentiale des eigenschaftsflexiblen Freiformbiegens

Das vorgestellte eigenschaftsflexible Freiformbiegen mit bewegter Matrize ermöglicht es, die mechanischen Eigenschaften eines Biegebauteils unabhängig von seiner Geometrie zu beeinflussen und auf Schwankungen in den Halbzeugen durch eine angepasste Kinematik zu reagieren. Dieser innovative Forschungsansatz erweitert die Einsatzmöglichkeiten des Freiformbiegens mit bewegter Matrize erheblich und steigert die Qualität und Effizienz des Prozesses. Dabei stellt er einen zentralen Baustein des Entwicklungsprozesses des Freiformbiegens mit bewegter Matrize dar. Die gewonnenen Erkenntnisse tragen dazu bei, die Produktionstechnik nachhaltiger und anforderungsgerechter zu gestalten und somit den Herausforderungen der Zukunft gerecht zu werden.

Wie bereits erläutert spielt der Megatrend Nachhaltigkeit in der Stahlherstellung bereits eine wichtige Rolle, da vermehrt auf Recycling und Wiederverwertung von Altmetallen gesetzt wird. Dadurch werden zukünftige Halbzeuge breitere Schwankungen in den mechanischen Eigenschaften aufweisen, was ohne Anpassung der derzeit gesteuerten Produktionsprozesse hin zu eigenschaftsgeregelten Prozessen zu mehr Ausschuss führen wird. Das eigenschaftsflexible Freiformbiegen bietet hier eine Lösung im Bereich der Biegetechnologie, indem es als Stellgröße in einen eigenschaftsbasierten Regelkreis integriert wird. Das Ziel besteht darin, eine Regelstruktur zu entwickeln, die auf Halbzeugschwankungen mit den Stellgrößen des eigenschaftsflexiblen Freiformbiegens reagiert. Eine Softsensorik, basierend auf dem vorgestellten mikromagnetischen Sensor, kann zudem eine echtzeitfähige Korrelation zu den gewünschten mechanischen Eigenschaften ermöglichen. Darüber hinaus ist es von entscheidender Bedeutung die Auswertung des BHN-Signals weiter zu erforschen, um eine quantitative Bestimmung der Eigenspannungen während des Biegeprozesses zu ermöglichen. Im Bereich der Regelungstechnik muss eine eigenschaftsbasierte Regelungsstruktur entwickelt werden, die, basierend auf den Halbzeugschwankungen, eine prädiktive Vorsteuerung vorgibt und das Bauteil während des Biegeprozesses gezielt nachregelt, um die gewünschten Eigenschaften im gebogenen Bauteil zu erreichen. Verschiedene Kennlinienfelder müssen erarbeitet werden, um den Regelkreis für unterschiedliche Querschnitte oder Werkstoffe anpassbar zu machen. Die Umsetzung des eigenschaftsgeregelten Freiformbiegens ermöglicht die Fertigung von Bauteilen mit spezifischen mechanischen Eigenschaften, die direkt während des Biegeprozesses eingestellt werden können. Darüber hinaus bietet die Kombination aus Sensoren und Softsensoren die Möglichkeit, den Zustand der mechanischen Eigenschaften nach dem Biegen zu bestimmen und nachgelagerte Prozesse entsprechend anzupassen und zu optimieren. Dieser ganzheitliche Ansatz eröffnet neue Perspektiven für die Produktionstechnik und trägt zur Weiterentwicklung des Freiformbiegens mit bewegter Matrize bei.

Die vorgestellten Inhalte dieser Dissertation und die aufgezeigten Potentiale des eigenschaftsflexiblen Freiformbiegens verdeutlichen den Wandel in der Produktionstechnik, insbesondere bei den Umformprozessen. Dabei steht die Herausforderung im Übergang von gesteuerten zu geregelten Prozessen, um auf Halbzeugschwankungen und Störungen reagieren zu können und somit in resiliente und flexible Fabriken der Zukunft Einzug zu halten. Die wissenschaftliche Durchdringung des eigenschaftsflexiblen Freiformbiegens liefert die Basis, um Bauteile mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften herzustellen und damit den Anforderungen von Nachhaltigkeit, Individualisierbarkeit und dem Wandel in der Produktion gerecht zu werden. Mit einem Fokus auf geregelte Prozesse werden die Grundlagen für eine flexible, effiziente und nachhaltige Produktionstechnik von morgen gelegt und damit der Weg für die Fabriken der Zukunft geebnet.

A Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1	Ausgangszustand (\mathbf{M}_0), aktueller Zustand (\mathbf{M}) und entspannter Zustand (\mathbf{M}_r) bei endlicher Verformung	4
Abbildung 2.2	Beispielhafter Verlauf eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms mit Kennzeichnung der wichtigsten Bereiche und mechanischen Kennwerte . . .	6
Abbildung 2.3	Einflussfaktoren auf den Reibwert während des Umformprozesses (modifiziert von Doege und Behrens (2016))	7
Abbildung 2.4	Klassifizierung der Eigenspannungen nach Macherauch et al. (1973) . .	9
Abbildung 2.5	Beispielhafte Einteilung formgebundener Biegeverfahren in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3430	11
Abbildung 2.6	Prinzipskizze Rotationszugbiegen in Anlehnung an Borchmann (2021) .	12
Abbildung 2.7	Arbeitsdiagramm für das Rotationszugbiegen in Anlehnung an Engel et al. (2008)	13
Abbildung 2.8	Prinzipskizze des 3-Rollen-Schubbiegens modifiziert von Kersten (2013)	15
Abbildung 2.9	Schematische Darstellung des Rollprofilierens zur Herstellung längsnahtgeschweißter Rohre in Anlehnung an v. Breitenbach (2008)	16
Abbildung 2.10	Grundlegende Begriffe am Rohrbogen modifiziert von Franz (1961) . .	17
Abbildung 2.11	Freiformbiegen mit bewegter Matrize als schematische Darstellung mit Kennzeichnung der wichtigsten Werkzeugelemente	19
Abbildung 2.12	Arbeitsdiagramm einer Aluminiumlegierung für das Freiformbiegen mit bewegter Matrize (Beulich, 2022)	21
Abbildung 3.1	Schematische Darstellung der Vorgehensweise in dieser Arbeit	35
Abbildung 4.1	Schematische Darstellung der Freiformbiegeanlage mit beweglicher Matrize	38
Abbildung 4.2	Biegewerkzeuge im verbauten Zustand	40
Abbildung 4.3	Mikrostruktur von P235TR1 unter 500-facher Vergrößerung	42
Abbildung 4.4	Aus 3 Versuchen gemittelttes technisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm der verwendeten Rundrohre aus P235TR1 und Aufnahme aus dem Versuchsaufbau	43
Abbildung 4.5	Schematische Darstellung des optischen Messsystems mit handgeführtem Laserscanner und statischen Trackingsystem	44
Abbildung 4.6	Schematischer Aufbau einer UCI-Sonde und das verwendete UCI-Härteprüfgerät mit handgeführter Sonde	46
Abbildung 4.7	Magnetische Hysteresekurve modifiziert von Jedamski et al. (2020) und exeparisches Rohsignal des Barkhausenrauschens	48
Abbildung 4.8	Gesamte Messkette des mikromagnetischen BHN-Sensors	49
Abbildung 5.1	Charakteristische Merkmale für Biegegeometrien mit ansteigender Komplexität	52

Abbildung 5.2	Ablaufdiagramm für die Ausrichtung freiformgebogener Bauteile und die anschließende Bestimmung der charakteristischen Biegemerkmale	53
Abbildung 5.3	Zusammenhang zwischen der Prozesskinematik und dem am Biegebau- teil resultierenden Krümmungsverlauf	54
Abbildung 5.4	Stichprobenartige Analyse des Außendurchmessers und der mittleren Wanddicke an Rohrabschnittsproben unterschiedlicher Längen	58
Abbildung 5.5	Vickers-Härteprüfung für das Grundmaterial entlang der Wanddicke und für die Schweißnaht entlang der Umfangsrichtung	61
Abbildung 5.6	UCI-Härtemessung für das Grundmaterial und die Schweißnaht auf der Oberfläche (Referenzbereich Vickers-Härtemessung = graue Schattierung)	62
Abbildung 5.7	Darstellung der Auswertemethodik des zweidimensionalen BHN-Signals über ein Operatorennetz mithilfe des Energy-Detectors (ED) und an- schließende statistische Auswertung des Energie-Zeit-Diagramms	64
Abbildung 5.8	Versuchsaufbau und Belastungskurve des zyklischen Zug- und Druckver- suchs an ganzen Rohrabschnitten zur Validierung der Auswertemethodik des mikromagnetischen BHN-Sensors	65
Abbildung 5.9	BHN-Energie und Kraft-Weg-Diagramm der Traverse für die kontinu- ierlichen und zyklischen Rohrzug- und Rohrdruckversuche	66
Abbildung 6.1	Zusammenhang zwischen Matrizenauslenkung und Biegeradius einzel- ner zweidimensionaler Bögen für geschweißte Rundrohre vom Typ P235TR1	72
Abbildung 6.2	In das Simulationsmodell implementierte Fließkurven für das Grundma- terial und die Schweißnaht und Parameter des Ludwik-Voce Fitting	75
Abbildung 6.3	a) Darstellung der allgemeinen Zeit-Weg-Diagramme für die Matrizen- auslenkung und -rotation sowie den konstanten Vorschub; b) unterschied- liche Bereiche während des Freiformbiegens eines zweidimensionalen Bogens; c) numerisches Freiformbiegemodell und Markierung der wich- tigsten Komponenten	76
Abbildung 6.4	Auswertung des Biegeradius der Simulation im Vergleich zu den Biege- versuchen aus Kapitel 6.1	79
Abbildung 7.1	Schematische Darstellung des tangentialen Biegens im Vergleich zum nicht-tangentialen Über- und Unterbiegen	82
Abbildung 7.2	Visualisierung einer beispielhaften Bewegungskinematik der Biegean- lage und Darstellung der unterschiedlichen Kombinationen aus Matrizen- auslenkung und -rotation zur simulativen Bestimmung des Einflusses der Bewegungskinematik	84
Abbildung 7.3	Auswertung der geometrischen Eigenschaften (links) und Darstellung der Pfade für die Innen- und Außenseite zur Auswertung der mechani- schen Eigenschaften in der Simulation (rechts)	85
Abbildung 7.4	Resultierende Radien für unterschiedliche Kombinationen aus Matrizen- auslenkung und -rotation	86
Abbildung 7.5	Verlauf und Mittelwerte der Axialspannung an der Außen- und Innenseite für nicht-tangential gebogene Rohre mit identischer Krümmung	88

Abbildung 7.6	Ergebnisse der UCI-Härtemessungen (oben) und der BHN-Messungen (unten) für die Außen- und Innenseite freiformgebogener Bauteile . . .	92
Abbildung 7.7	Lineare Trendlinien der mittleren BHN-Energie für übergebogene und untergebogene Freiformbiegebauteilen mit identischen Biegeradien . . .	94
Abbildung 7.8	Mises-Vergleichsspannung der einzelnen Biegestrategien aufgetragen über den normierten Umfang des Halbzeuges direkt am Matrizenangriffspunkt zum Zeitpunkt direkt nach Erreichen der maximalen Auslenkung und Rotation	95
Abbildung 7.9	Simulationsergebnisse zur Bewertung der Einflüsse der geometrischen Halbzeugschwankungen auf den konstant gebogenen Radius	98
Abbildung 7.10	Simulationsergebnisse zur Bewertung der Einflüsse der Halbzeugschwankungen auf die Mises-Vergleichsspannung im konstant gebogenen Radius aufgeteilt auf Außenseite und Innenseite	101
Abbildung 7.11	Vergleich des konstant gebogenen Radius für unterschiedliche Wanddicken bei ausgewählten nicht-tangentialen Positionen der Biegematrize .	103
Abbildung 7.12	Vergleich der ausgewerteten BHN-Messungen für über- und untergebogenen Bauteile mit unterschiedlichen Wanddicken, wobei der Radius der einzelnen Biegeungen vergleichbar ist	104
Abbildung 7.13	Simulationsergebnisse zur Veränderung des Abstandes zwischen Biegematrize und Rohrführung in Bezug auf den resultierenden Biegeradius .	106
Abbildung 7.14	Darstellung der prozentualen Änderung der Mises-Vergleichsspannung für die Grenzbereiche der Abstandsänderung jeweils bezogen auf die Referenzwerte aus Kapitel 7.1	107
Abbildung 8.1	Prozessablaufdiagramm zur Untersuchung der Rückfederung unterschiedlicher nicht-tangential freiformgebogener Bauteile	111
Abbildung 8.2	Schematische Darstellung der Universalprüfmaschine mit im unteren Prüfraum eingebauten hydraulischen Spannbacken für Belastungsversuche an halbrunden Rohrbögen	113
Abbildung 8.3	Darstellung der Winkeldifferenz durch das Spannungsarmglühen (links) und BHN-Energien für die Außen- und Innenseite vor dem Spannungsarmglühen	114
Abbildung 8.4	Kraft-Weg-Kurven der Belastbarkeitsprüfung unterschiedlicher Biegestrategien (links) und maximal auftretende Kräfte sowie auftretende Kräfte bei einem Standardweg von 75 mm	116

B Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1	Chemische Zusammensetzung von P235TR1, Massenanteile in [%]	42
Tabelle 4.2	Ausgangsquerschnitt, Ausgangslänge und ermittelte Werkstoffkennwerte jeweils gemittelt aus 3 Rohrzugversuchen	43
Tabelle 5.1	Gemessene Wanddicke an 12 Proben mit je 2 Messpunkten pro Umfangsrichtung (n = 24)	57
Tabelle 6.1	Aus jeweils 3 Biegeversuchen gemittelter Biegeradius und Biegewinkel für zweidimensionale Bögen	73
Tabelle 6.2	Ergebnisse der numerischen Simulation im Vergleich zu den Ergebnissen aus jeweils 3 experimentellen Biegeversuchen für zweidimensionale Bögen	80
Tabelle 7.1	Ausgewählte Ergebnisse der numerischen Simulation verschiedener Kombinationen aus Matrizenauslenkung und -rotation mit identischen Radien. Die farbliche Umrandung liefert einen Hinweis auf die Stellung der Biegematrize (Überbiegen , Unterbiegen)	87
Tabelle 7.2	Ergebnisse der Versuche verschiedener Kombinationen aus Matrizenauslenkung und -rotation bezogen auf den Radius im konstant gebogenen Bereich. Die farbliche Umrandung liefert einen Hinweis auf die Stellung der Biegematrize mit Bezug zur Abbildung 7.2 (Überbiegen , Unterbiegen)	90

C Literaturverzeichnis

Literatur

- ANDREEVA, E. (2008). „Über die Wirbelstromprüfung und magnetische Streuflussprüfung mittels GMR-Sensoren“. Dissertation. Universität des Saarlandes.
- AVILA, J. A., F. F. CONDE, H. C. PINTO, J. RODRIGUEZ und F. A. F. GRIJALBA (2019). „Microstructural and Residuals Stress Analysis of Friction Stir Welding of X80 Pipeline Steel Plates Using Magnetic Barkhausen Noise“. In: *Journal of Nondestructive Evaluation* 38.4. ISSN: 0195-9298.
- BANABIC, D., Hrsg. (2000). *Formability of Metallic Materials: Plastic Anisotropy, Formability Testing, Forming Limits*. Berlin und Heidelberg: Springer. ISBN: 9783662040133.
- BARGEL, H.-J., Hrsg. (2022). *Werkstoffkunde: Strukturen - grundlegende Eigenschaften*. Berlin, Germany: Springer Vieweg. ISBN: 9783662639603.
- BARKHAUSEN, G. H. (1919). „Zwei mit Hilfe der neuen Verstärker entdeckte Erscheinungen“. In: *Physikalische Zeitschrift*. — Leipzig 20 17, S. 401–403.
- BARTELDES, S., C. RADEK, S. KRIEGEL und W. HOLWEGGER (2019). „Analysemöglichkeiten des Barkhausen-Rauschens zur zerstörungsfreien Bestimmung partieller Härteunterschiede“. In: *DGZfP Jahrestagung 2019*.
- BAUSCHINGER, J. (1886). „Über die Veränderung der Elastizitätsgrenze und die Festigkeit des Eisens und Stahls durch Strecken und Quetschen, durch Erwärmen und Abkühlen und durch oftmals wiederholte Beanspruchungen“. In: *Mitteilungen aus dem Mechanisch-Technischen Laboratorium der K. Technischen Hochschule in Munchen* Vol. 13.
- BEULICH, N., P. CRAIGHERO und W. VOLK (2017). „FEA Simulation of Free-Bending – a Preforming Step in the Hydroforming Process Chain“. In: *Journal of Physics: Conference Series* 896, S. 012063. ISSN: 1742-6588.
- BEULICH, N., R. MERTENS, J. SPOERER und W. VOLK (2019). „Influence of tube roll-forming on material properties and subsequent bending processes“. In: *Forming Technology Forum*.
- BEULICH, N., J. SPOERER und W. VOLK (2019). „Sensitivity analysis of process and tube parameters in free-bending processes“. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 651.1, S. 012031. ISSN: 1757-8981.
- BEULICH, N. (2022). „Entwicklung einer Methodik zur Auslegung und Absicherung des Freiformbiegens mit bewegter Matrize für dreidimensionale Biegegeometrien“. Dissertation. Technische Universität München.
- BORCHMANN, L. (2021). „Regelung des Werkstoffflusses zur Erhöhung der Bauteilqualität beim Rotationszugbiegen“. Dissertation. Universität Siegen.

- BORCHMANN, L., P. FROHN-SÖRENSEN und B. ENGEL (2020). „In situ detection and control of wrinkle formation during rotary draw bending“. In: *Procedia Manufacturing* 50, S. 589–596. ISSN: 23519789.
- BUSCH, A. B. (2022). „Einfluss der thermischen Eigenspannungen auf die statische und zyklische Festigkeit eines Hybridverbunds aus GFK und Stahl“. Dissertation. Universität Siegen.
- CARL ZEISS GOM METROLOGY GMBH (2021). *Technisches Datenblatt T-Scan: Ihr mobiler Messraum ZEISS T-SCAN*. Hrsg. von CARL ZEISS GOM METROLOGY GMBH. Online. URL: <https://www.handsonmetrology.com/wp-content/uploads/2022/02/T-Scan-Produktflyer-DE1.pdf>.
- CHATTI, S. (1998). „Optimierung der Fertigungsgenauigkeit beim Profilbiegen“. Dissertation. Universität Dortmund.
- CHENG, C., C. PAN, X. BAI, C. LIU und X. GUO (2022). „Investigation on the influence of weld position on the deformation behavior of welded tube during free bending process“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 120.3-4, S. 2201–2215. ISSN: 0268-3768.
- CZICHOS, H. und K.-H. HABIG (2015). *Tribologie-Handbuch*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-8348-1810-2.
- DOBMANN, G., W. A. THEINER und R. BECKER (1989). „Progress in the Micromagnetic Multiparameter Microstructure and Stress Analysis (3MA)“. In: *Nondestructive Characterization of Materials*. Hrsg. von P. HÖLLER, V. HAUKE, G. DOBMANN, C. O. RUUD und R. E. GREEN. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 516–523. ISBN: 978-3-642-84005-0.
- DOEGE, E. und B.-A. BEHRENS (2016). *Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen*. Berlin, Germany: Springer Vieweg. ISBN: 9783662438909.
- ENGEL, B., C. GERLACH und S. CORDES (2008). „Biegemomentabschätzung des Dornbiegeverfahrens“. In: *UTF Science* 2, S. 1–8.
- ENGEL, B. und H. R. HASSAN (2014). „Investigation of Neutral Axis Shifting in Rotary Draw Bending Processes for Tubes“. In: *steel research international* 85.7, S. 1209–1214. ISSN: 16113683.
- FRANZ, W.-D. (1961). *Das Kalt-Biegen von Rohren*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-540-02659-4.
- FRITSCH, F. N. und J. BUTLAND (1984). „A Method for Constructing Local Monotone Piecewise Cubic Interpolants“. In: *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing* 5.2, S. 300–304. ISSN: 0196-5204.
- GANTNER, P., D. K. HARRISON, A. K. de SILVA und H. BAUER (2007). „The Development of a Simulation Model and the Determination of the Die Control Data for the Free-Bending Technique“. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 221.2, S. 163–171. ISSN: 0954-4054.
- GANTNER, P., D. K. HARRISON, A. K. M. de SILVA und H. BAUER (2004). „New Bending Technologies for the Automobile Manufacturing Industry“. In: *Proceedings of the 34th International MATADOR Conference*. Springer London, S. 211–216.

- GANTNER, P., H. BAUER, D. K. HARRISON und A. K. de SILVA (2005). „Free-Bending— A new bending technique in the hydroforming process chain“. In: *Journal of Materials Processing Technology* 167.2-3, S. 302–308. ISSN: 09240136.
- GERTH, U. (2002). „Mechanische Kennwerte natürlicher und technisch erzeugter Gläser ermittelt mit Eindruckverfahren und Modellrechnungen.“ Dissertation. Clausthal: Technischen Universität Clausthal. URL: <https://d-nb.info/967176123/34>.
- GHIOTTI, A., E. SIMONETTO, S. BRUSCHI und P. F. BARIANI (2017). „Springback measurement in three roll push bending process of hollow structural sections“. In: *CIRP Annals* 66.1, S. 289–292. ISSN: 00078506.
- GHIOTTI, A., E. SIMONETTO, S. BRUSCHI und E. SAVIO (2021). „Enhancing the accuracy of in-process springback measurements of complex tube bending processes using cost-effective embedded sensors“. In: *Measurement Science and Technology* 32.6, S. 064002. ISSN: 0957-0233.
- GLADWELL, G. und C. KLEESATTEL (1968). „The contact — impedance meter — 2“. In: *Ultrasonics* 6.4, S. 244–251. ISSN: 0041624X.
- GOGOLINSKII, K. V., V. A. SYASKO, A. S. UMANSKII, A. A. NIKAZOV und T. I. BOBKOVA (2019). „Mechanical properties measurements with portable hardness testers: advantages, limitations, prospects“. In: *Journal of Physics: Conference Series* 1384.1, S. 012012. ISSN: 1742-6588.
- GROCHE, P. und G. V. BREITENBACH (2008). „Roll Forming Strategies for Welded Tubes“. In: *steel research international* 79.1, S. 40–46. ISSN: 16113683.
- GROCHE, P., G. V. BREITENBACH und R. STEINHEIMER (2005). „Properties of Tubular Semi-finished Products for Hydroforming“. In: *steel research international* 76.2-3, S. 181–186. ISSN: 16113683.
- GROTH, S. (2020). „Methode zur Produktplanung beim Freiformbiegen“. Dissertation. Universität Siegen.
- GÜNTHER, D., F. HOFFMANN und T. HIRSCH (2004). „Entstehung und Ursachen von Eigenspannungen beim Gasnitrieren chromlegierter Stähle“. In: *HTM Journal of Heat Treatment and Materials* 59.1, S. 18–27. ISSN: 1867-2493.
- GUO, X., X. CHENG, Y. XU, J. TAO, A. ABD EL-ATY und H. LIU (2020). „Finite element modelling and experimental investigation of the impact of filling different materials in copper tubes during 3D free bending process“. In: *Chinese Journal of Aeronautics* 33.2, S. 721–729. ISSN: 10009361.
- GUO, X., W. WEI, Y. XU, A. ABD EL-ATY, H. LIU, H. WANG, X. LUO und J. TAO (2019). „Wall thickness distribution of Cu–Al bimetallic tube based on free bending process“. In: *International Journal of Mechanical Sciences* 150, S. 12–19. ISSN: 00207403.
- GUO, X. und H. XIONG (2018). „Numerical simulation and experimental study on mechanism and characteristics of tube free-bending forming process“. In: *Procedia Manufacturing* 15, S. 836–843. ISSN: 23519789.

- HABSCHIED, M., B. de GRAAFF, A. KLUMPP und V. SCHULZE (2015). „Fertigung und Eigenspannungen*“. In: *HTM Journal of Heat Treatment and Materials* 70.3, S. 111–121. ISSN: 1867-2493.
- HARTMANN, C., M. EDER, D. OPRITESCU, D. MAIER, M. SANTAELLA und W. VOLK (2018). „Geometrical compensation of deterministic deviations for part finishing in bulk forming“. In: *Journal of Materials Processing Technology* 261, S. 140–148. ISSN: 09240136.
- HENCKY, H. (1928). „Über die Form des Elastizitätsgesetzes bei ideal elastischen Stoffen“. In: *Zeitschrift für technische Physik* 9, S. 215–220.
- HERMES, M. (2011). „Neue Verfahren zum rollenbasierten 3D-Biegen von Profilen“. Dissertation. Technische Universität Dortmund.
- HEYN, E. (1913). „Eigenspannungen, insbesondere Reckspannungen und die dadurch bedingten Krankheitserscheinungen in Konstruktionsteilen“. In: S. 510–533.
- HINKEL, M. (2013). „Prozessfenster für das Spannen von Rohrprofilen beim Rotationszugbiegen unter Berücksichtigung der Tribologie“. Dissertation. Universität Siegen.
- HOFFMANN, H., G. SPUR und R. NEUGEBAUER (2012). *Handbuch Umformen*. [Erscheinungsort nicht ermittelbar]: Carl Hanser Fachbuchverlag. ISBN: 978-3-446-43004-4.
- HOFFMANN, J., Hrsg. (2014). *Taschenbuch der Messtechnik*. München: Hanser, Carl. ISBN: 978-3-446-44342-6.
- HOJA, S., H. KLÜMPER-WESTKAMP, J. EPP, F. HOFFMANN und H.-W. ZOCH (2012). „Einfluss der Oberflächenfertigung und des Nitrierens auf den Eigenspannungszustand des warmfesten Stahls X38CrMoV5-3“. In: *HTM Journal of Heat Treatment and Materials* 67.3, S. 211–216. ISSN: 1867-2493.
- HOOKE, R. (1676). *A description of helioscopes and some other instruments*. London: Martyn.
- HUBER, M. T. (1904). „Zur Theorie der Berührung fester elastischer Körper“. In: *Annalen der Physik* 319.6, S. 153–163. ISSN: 00033804.
- ISMAIL, A., D. MAIER, S. STEBNER, S. MÜNSTERMANN, W. VOLK und B. LOHMANN (2023). „Free-form Bending Control using Optimal Residual Strategies“. In: *22nd IFAC World Congress in Yokohama, Japan*.
- ISSLER, L., H. RUOSS und P. HÄFELE (2003). *Festigkeitslehre - Grundlagen*. Berlin u. a.: Springer. ISBN: 9783540407058.
- JEDAMSKI, R., J. HEINZEL, M. RÖSSLER, J. EPP, J. ECKEBRECHT, J. GENTZEN, M. PUTZ und B. KARPUSCHEWSKI (2020). „Potential of magnetic Barkhausen noise analysis for in-process monitoring of surface layer properties of steel components in grinding“. In: *tm - Technisches Messen* 87.12, S. 787–798. ISSN: 0171-8096.
- JÖRG NEU GMBH (2020). *Datenblatt zur Freiformbiegeanlage NSB090-S*. Hrsg. von J. NEU GMBH. Online. URL: <https://www.neu-gmbh.de/de/freiformbiegen-nsb>.
- KERSTEN, S. (2013). „Prozessmodelle zum Drei-Rollen-Schubbiegen von Rohrprofilen“. Dissertation. Universität Siegen.

- KHODAYARI, G. (1994). „Untersuchungen zum elastisch-plastischen Biegen von Stahlprofilen“. Dissertation. Universität Siegen.
- KLEESATTEL, C. und G. GLADWELL (1968). „The contact - impedance meter-1“. In: *Ultrasonics* 6.3, S. 175–180. ISSN: 0041624X.
- KLEESATTEL, C. (1967). „Resonant sensing devices“. US3308476 (A).
- KLOOS, K. H. (1979). „Eigenspannungen, Definition und Entstehungsursachen“. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 10.9, S. 293–302. ISSN: 0933-5137.
- KRAUSE, C., D. FEHRENBACH, L. WOLF, M. T. KIESEWETTER, C. RADEK und M. SCHAUDIG (2021). „Measurement Potential of the Barkhausen Effect for Obtaining Additional Information on the Component Condition in Manufacturing“. In: *HTM Journal of Heat Treatment and Materials* 76.5, S. 370–382. ISSN: 1867-2493.
- KRAUSE, C., B. UYSAL, M. ENGLER, C. RADEK und M. SCHAUDIG (2022). „Application of Machine Learning Techniques to Determine Surface Hardness Based on the Barkhausen Effect“. In: *HTM Journal of Heat Treatment and Materials* 77.6, S. 409–424. ISSN: 1867-2493.
- LANDGREBE, D., B. DOMES, T. OTTO-ADAMCZAK, M. WERNER und K. SILBERMANN (2015). *Querkraftfreies Freiformbiegen von Rohren*. Hannover: Europ. Forschungsges. für Blechverarbeitung e.V. (EFB). ISBN: 978-3-86776-454-4.
- LANGENBERG, P. und W. DAHL (2001). „Bruchmechanische Nachweise zur Stahlgütewahl für moderne Feinkornbaustähle“. In: *International Journal of Materials Research* 92.8, S. 867–874. ISSN: 1862-5282.
- LEMAITRE, J. und J.-L. CHABOCHE (2002). *Mechanics of solid materials*. Cambridge: Cambridge Univ. Press. ISBN: 0521328535.
- LI, H., H. YANG, Z. Y. ZHANG, G. J. LI, N. LIU und T. WELO (2014). „Multiple instability-constrained tube bending limits“. In: *Journal of Materials Processing Technology* 214.2, S. 445–455. ISSN: 09240136.
- LINDGREN, M. und T. LEPISTÖ (2001). „Effect of prestraining on Barkhausen noise vs. stress relation“. In: *NDT & E International* 34.5, S. 337–344. ISSN: 09638695.
- (2002). „Application of Barkhausen noise to biaxial residual stress measurements in welded steel tubes“. In: *Materials Science and Technology* 18.11, S. 1369–1376. ISSN: 0267-0836.
- (2003). „Relation between residual stress and Barkhausen noise in a duplex steel“. In: *NDT & E International* 36.5, S. 279–288. ISSN: 09638695.
- MACHERAUCH, E., H. WOHLFAHRT und U. WOLFSTIEG (1973). „Zur zweckmäßigen Definition von Eigenspannungen“. In: *HTM Journal of Heat Treatment and Materials* 28.3, S. 201–211. ISSN: 1867-2493.
- MACVEAN, D. B. (1968). *Die Elementararbeit in einem Kontinuum und die Zuordnung von Spannungs- und Verzerrungstensoren: Zugl.: Zürich, Techn. Hochsch., Diss.* Basel: Birkhäuser.
- MERKLEIN, M., H. HAGENAH und M. COJUTTI (2009). „Investigations on Three-Roll Bending of Plain Tubular Components“. In: *Key Engineering Materials* 410-411, S. 325–334.

- MIERCZAK, L., D. C. JILES und G. FANTONI (2011). „A New Method for Evaluation of Mechanical Stress Using the Reciprocal Amplitude of Magnetic Barkhausen Noise“. In: *IEEE Transactions on Magnetics* 47.2, S. 459–465. ISSN: 0018-9464.
- MURATA, M. und Y. AOKI (1996). „Analysis of circular tube bending by MOS bending method“. In: *Advanced Technology of Plasticity Proceedings of the 5th International Conference on Technology of Plasticity*, S. 505–508.
- MURATA, M., N. OHASHI und H. SUZUKI (1989). „New flexible penetration bending of a tube. (1st Report, A study of MOS bending method)“. In: *TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS Series C* 55.517, S. 2488–2492. ISSN: 0387-5024.
- NESLUŠAN, M., F. BAHLEDA, K. TROJAN, M. PITOŇÁK und K. ZGÚTOVÁ (2020). „Barkhausen noise emission in over-stressed steel wires“. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 513, S. 167134. ISSN: 03048853.
- NEUGEBAUER, R., W.-G. DROSSEL und P. BLAU (2001). „3D-Freiformbiegen von Profilen“. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 96.11-12, S. 611–615. ISSN: 0947-0085.
- NEUGEBAUER, R., W.-G. DROSSEL und U. LORENZ (2001). „Konzeption einer parallelkinematischen Biegemaschine zum 3-D-Freiformbiegen von Profilen“. In: *wt Werkstattstechnik online* 91.10, S. 608–614. ISSN: 1436-4980.
- NEUGEBAUER, R. (2006). *Parallelkinematische Maschinen: Entwurf, Konstruktion, Anwendung*. Berlin und Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-540-20991-1.
- POPOV, V. L. (2009). *Kontaktmechanik und Reibung*. Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-540-88836-9.
- RIEPOLD, M., B. ARIAN, J. ROZO VASQUEZ, W. HOMBERG, F. WALTHER und A. TRÄCHTLER (2021). „Model approaches for closed-loop property control for flow forming“. In: *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering* 3, S. 100057. ISSN: 26669129.
- ROZO VASQUEZ, J., B. ARIAN, L. KERSTING, W. HOMBERG, A. TRÄCHTLER und F. WALTHER (2023). „Qualification of Barkhausen noise and eddy current based sensors for online monitoring of strain-induced α' -martensite formation during flow forming“. In: *Lectures*. AMA Service GmbH, Von-Münchhausen-Str. 49, 31515 Wunstorf, Germany, S. 197–198.
- SANTA-AHO, S., A. LAITINEN, A. SORSA und M. VIPPOLA (2019). „Barkhausen Noise Probes and Modelling: A Review“. In: *Journal of Nondestructive Evaluation* 38.4. ISSN: 0195-9298.
- SCANDOLA, L., M. K. WERNER, D. MAIER und W. VOLK (2023). „Optimization of the Calibration Process in Freeform Bending Regarding Robustness and Experimental Effort“. In: *Production at the Leading Edge of Technology*. Springer International Publishing, S. 170–178. ISBN: 978-3-031-18317-1.
- SCANDOLA, L., D. MAIER, M. KONRAD WERNER, C. HARTMANN und W. VOLK (2022). „Automatic Extraction and Conversion of the Bending Line from Parametric and Discrete Data for the Free-Form Bending Process“. In: *NUMISHEET 2022*. Hrsg. von K. INAL, J. LEVESQUE, M. WORSWICK und C. BUTCHER. The Minerals, Metals & Materials Series. Cham: Springer International Publishing, S. 813–826. ISBN: 978-3-031-06211-7.

- SCHUSTER, S., L. DERTINGER, D. DAPPRICH und J. GIBMEIER (2018). „Application of magnetic Barkhausen noise for residual stress analysis – Consideration of the microstructure“. In: *Materials Testing* 60.6, S. 545–552. ISSN: 0025-5300.
- SEIDEL, M. (2020). *Schleifbrand und dessen Prüfung: Leitfaden für die Praxis*. München: Hanser, Carl. ISBN: 9783446463349.
- SHIMOSAKA, K., T. BERGS, D. SCHRAKNEPPER, S. MÜNSTERMANN und M. MEURER (2021). „In-situ Evaluation of Surface Integrity Modifications by means of Barkhausen Noise Measurement“. In: *Procedia CIRP* 102, S. 465–470. ISSN: 22128271.
- SIEGERT, K., Hrsg. (2015). *Blechumformung: [Verfahren, Werkzeuge und Maschinen]*. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN: 9783540024880.
- SIMONETTO, E., A. GHIOTTI und S. BRUSCHI (2017). „Dynamic detection of tubes wrinkling in three roll push bending“. In: *Procedia Engineering* 207, S. 2316–2321. ISSN: 18777058.
- STAHL, D. (2002). „Rundbiegen von Stahlrohrprofilen: Ein Beitrag zur Rückfederungs- und Ovalisierungsprognose unter Anwendung künstlicher neuronaler Netze“. Dissertation. Universität Siegen.
- STAHL, J. (2021). „Residual stresses induced by shear cutting“. Dissertation. Technische Universität München.
- STAUPENDAHL, D. (2021). „3D Profile Bending with Five Controlled Degrees of Freedom“. Dissertation. Technische Universität Dortmund.
- STEBNER, S., L. KONG, D. MAIER, A. ISMAIL, M. DÖLZ, B. LOHMANN, W. VOLK und S. MÜNSTERMANN (2023). „A Soft sensor for Inline-Prediction of Residual Stresses based on Barkhausen Noise Measurements for Freeform Bending with Movable Die“. In: *Electromagnetic Measurements for Non-Destructive Metal Monitoring at Micro and Macro Scale*, (submitted).
- STEBNER, S. C., D. MAIER, A. ISMAIL, S. BALYAN, M. DÖLZ, B. LOHMANN, W. VOLK und S. MÜNSTERMANN (2021). „A System Identification and Implementation of a Soft Sensor for Freeform Bending“. In: *Materials* 14.16, S. 4549.
- STOER, J., F. L. BAUER und R. BULIRSCH (2005-). [Duplikat] *Numerische Mathematik: Eine Einführung - unter Berücksichtigung von Vorlesungen von F.L. Bauer*. [Verschiedene Auflagen]. Berlin: Springer. ISBN: 3-540-21395-3.
- TEKKAYA, A. E. und S. CHATTI (2019). „Bending (Tubes, Profiles)“. In: *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 131–140.
- THEINER, W. A. und P. DEIMEL (1987). „Non-destructive testing of welds with the 3MA-analyzer“. In: *Nuclear Engineering and Design* 102.3, S. 257–264. ISSN: 00295493.
- TIETZE, M. (2015). „Von der klassischen Härtemessung im Labor zur Lösung komplexer Aufgaben im Feld–Möglichkeiten und Grenzen des UCI-Verfahrens“. In: *Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (Jahrestagung)*. Salzburg.
- TSCHUNCKY, R. (2011). „Sensor- und geräteunabhängige Kalibrierung elektromagnetischer zerstörungsfreier Prüfverfahren zur praxisorientierten Werkstoffcharakterisierung“. Dissertation. Universität des Saarlandes.

- UNTERBERG, M., J. STANKE, D. TRAUTH und T. BERGS (2021). „A time series classification approach to non-destructive hardness testing using magnetic Barkhausen noise emission“. In: *Production Engineering* 15.3-4, S. 509–517. ISSN: 0944-6524.
- V. BREITENBACH, G. (2008). „Methode zur Analyse, Bewertung und Optimierung der Prozesskette Profilieren längsnahtgeschweißter Rohre für das Innenhochdruck-Umformen“. Dissertation. Technische Universität Darmstadt.
- VATTER, P. (2015). „Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente methode“. Dissertation. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
- VITZTHUM, S., M. EDER, C. HARTMANN und W. VOLK (2018). „Investigation on strain dependent elastic behavior for accurate springback analysis“. In: *Journal of Physics: Conference Series* 1063, S. 012118. ISSN: 1742-6588.
- VOLK, W., I. GILCH, A. NÜRNBERGER, S. PRAUSER und J. STAHL (2021). „Gezielte Nutzung umformtechnisch induzierter Eigenspannungen in metallischen Bauteilen“. In: *Forschung im Ingenieurwesen* 85.3, S. 703–707. ISSN: 0015-7899.
- VOLK, W., P. GROCHE, A. BROSIUS, A. GHIOTTI, B. L. KINSEY, M. LIEWALD, L. MADEJ, J. MIN und J. YANAGIMOTO (2019). „Models and modelling for process limits in metal forming“. In: *CIRP Annals* 68.2, S. 775–798. ISSN: 00078506.
- WEI, W., H. WANG, H. XIONG, X. CHENG, J. TAO und X. GUO (2020). „Research on influencing factors and laws of free-bending forming limit of tube“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 106.3, S. 1421–1430.
- WEISS, S. und B. BUCHMAYR (2006). „Methodik zur strukturierten Analyse eines Kaltprofilierprozesses am Beispiel der Herstellung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren“. In: *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 151.9, S. 337–343. ISSN: 0005-8912.
- WEISS, P. (1907). *L'hypothèse du champ moléculaire et la propriété ferromagnétique*.
- WERNER, M. K., D. MAIER, L. SCANDOLA und W. VOLK (2021). „Motion profile calculation for freeform bending with moveable die based on tool parameters“. In: *ESAFORM 2021*.
- WITHERS, P. J. und H. BHADSHIA (2001a). „Residual stress. Part 1 – Measurement techniques“. In: *Materials Science and Technology* 17.4, S. 355–365. ISSN: 0267-0836.
- (2001b). „Residual stress. Part 2 – Nature and origins“. In: *Materials Science and Technology* 17.4, S. 366–375. ISSN: 0267-0836.
- WOLTER, B., Y. GABI und C. CONRAD (2019). „Nondestructive Testing with 3MA—An Overview of Principles and Applications“. In: *Applied Sciences* 9.6, S. 1068.
- DA-XIN, E., H. HUA-HUI, L. XIAO-YI und N. RU-XIN (2009). „Spring-back deformation in tube bending“. In: *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 16.2, S. 177–183. ISSN: 16744799.
- YANG, Q., C. LIU, C. CHENG, X. GUO, J. TAO und Z. MA (2023). „Effect mechanism of torsion on flat oval profile free bending“. In: *International Journal of Mechanical Sciences* 250, S. 108308. ISSN: 00207403.

- YASHAN, A. (2005). „Fertigung und Erprobung eines Mikro-Wirbelstromsensors zur Abstandsmessung“. Dissertation. Universität Hannover.
- ZÖSCH, A. und M. SEIDEL (2020). „Industrielle Verfahren zur Schleifbrandprüfung“. In: *HTM Journal of Heat Treatment and Materials* 75.5, S. 18–26. ISSN: 1867-2493.

Normenverzeichnis

- DIN 50159-1 (2022-06). *Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach dem UCI-Verfahren: Teil 1: Prüfverfahren - Teil 1: Prüfverfahren.*
- DIN 50159-2 (2022-06). *Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach dem UCI-Verfahren - Teil 2: Prüfung und Kalibrierung der Härteprüfgeräte.*
- DIN 8580 (2022-12). *Fertigungsverfahren: Begriffe, Einteilung.*
- DIN 8586 (2003-09). *Fertigungsverfahren Biegeumformen: Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht.*
- DIN EN 10217-1 (2019-08). *Geschweißte Stahlrohre für Druckbeanspruchungen – Technische Lieferbedingungen – Teil 1: Elektrisch geschweißte und unterpulvergeschweißte Rohre aus unlegierten Stählen mit festgelegten Eigenschaften bei Raumtemperatur.*
- DIN EN ISO 6892-1 (2020-06). *Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur.*
- VDI 3430 (2014-06). *Rotationszugbiegen von Profilen.*
- VDI 3431 (2016-08). *Biegen von Profilen - Prüfhinweise für Profilbiegebauteile.*