

Linda Borchmann

**Regelung des Werkstoffflusses  
zur Erhöhung der Bauteilqualität  
beim Rotationszugbiegen**





**Linda Borchmann**

**Regelung des Werkstoffflusses  
zur Erhöhung der Bauteilqualität  
beim Rotationszugbiegen**

**Forschungsberichte des Lehrstuhls für Umformtechnik**

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel (Hrsg.)**

**BAND 14**

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der  
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte Daten sind im Internet  
abrufbar über: <http://dnb.dnb.de>

## Impressum

**Druck und Bindung:**  
UniPrint, Universität Siegen

Gedruckt auf alterungsbeständigem holz- und säurefreiem Papier

Siegen 2021: *universi* – Universitätsverlag Siegen  
[www.universi.uni-siegen.de](http://www.universi.uni-siegen.de)

ISBN 978-3-96182-109-9

ISSN 2191-0030

[doi.org/10.25819/ubsi/10022](https://doi.org/10.25819/ubsi/10022)

Die Publikation erscheint unter der  
Creative Commons Lizenz CC-BY-SA



# Regelung des Werkstoffflusses zur Erhöhung der Bauteilqualität beim Rotationszugbiegen

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors  
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von  
Linda Borchmann, M.Eng.

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät  
der Universität Siegen  
Siegen 2021

Betreuer und erster Gutachter

Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel  
Universität Siegen

Zweiter Gutachter

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk  
Technische Universität München

Tag der mündlichen Prüfung

27. September 2021



## Vorwort

Diese Arbeit basiert auf Untersuchungen, die ich während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Umformtechnik (UTS) der Universität Siegen durchgeführt habe.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer und ersten Gutachter Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel, der mich 2016 an seinem Lehrstuhl einstellte und mir im Anschluss an meine Industrietätigkeit als Konstrukteurin im Kaltwalzwerksbau die Chance gab Ideen in dem Bereich der Forschung und Entwicklung wissenschaftlich umzusetzen. Ausdrücklich bedanken möchte ich mich für die konstruktive Unterstützung, die kollegiale Arbeitsatmosphäre und die eingeräumten wissenschaftlichen Freiräume, die diese Arbeit erst ermöglichten.

Sehr herzlich bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk für seine hilfreichen Anregungen und die seines Teams am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen. Ich bedanke mich für das große Interesse an meiner Arbeit, den Austausch bei Konferenzbesuchen und persönlichen Treffen in Siegen und München sowie die Übernahme des Zweitgutachtens.

Für die gute und freundschaftliche Zusammenarbeit bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern und Kollegen des Lehrstuhls UTS, insbesondere bei Dr.-Ing. Rainer Steinheimer, die mich mit fachlichen Diskussionen und über die Arbeit hinausgehend unterstützt haben. Weiterhin möchte ich den Studenten danken, die im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten einen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben.

Nicht zuletzt danke ich meinem Mann Lukas, meinen Eltern und meinem Bruder, die mich während meines gesamten Ausbildungswegs unterstützt und somit maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Hemer, im September 2021

Linda Borchmann



# Kurzfassung

Das Rotationszugbiegen ist ein Profilbiegeverfahren, welches vorzugsweise bei geringen Wanddicken und kleinen Biegeradien verwendet wird. Durch Druckspannungen am Innenbogen können Falten verursacht werden. Die Verfahrensgrenze Faltenbildung ist eine Instabilität, die aufgrund der Vielfalt der Einflüsse nur begrenzt kalkulierbar ist. Bisher wird der Biegeprozess durch Einstellversuche erfahrener Maschinenbediener faltenfrei gestaltet. Bei Korrekturen zum Verhindern von Falten besteht die Gefahr, dass der Prozess zur Rissbildung geführt wird. In dieser Arbeit wird eine wissensbasierte Methode vorgestellt, welche die Faltenbildung während des Biegeprozesses selbstständig verhindert. Die Umsetzung erfolgt mittels eines Fuzzy-Reglers, der Parameter zur Faltenvermeidung korrigiert und dabei die Gefahr der Rissbildung beachtet. Gegenmaßnahmen zur Verhinderung der Falten werden so viel wie nötig und so wenig wie möglich eingeleitet. In-situ-Messsysteme erfassen die erste Falte in ihrer Entstehung. Ein Zustellen des Gegenhalters in Richtung des Rohres und eine Reduzierung der Vorschubgeschwindigkeit der Transporteinheit wirken den Falten entgegen und dienen als Aktoren. Erfahrungswissen wurde bei der Entwicklung der Regelung integriert. Das abgeleitete Prozessmodell kann neben dem System einer Regelung auf andere Problemlösungssysteme, wie z. B. Case-based reasoning-Systeme, übertragen werden. In praktischen Biegeversuchen zur Erprobung des Reglers wurden faltenfreie Rohrbögen hergestellt. Der in die Maschine integrierte und dauerhaft aktivierte Regler reagiert auf Schwankungen bspw. bei Werkstoff- und Chargenwechseln sowie Variation der Wanddicke. Durch den Einsatz des Reglers können zeit- und kostenintensive Einstellversuche entfallen, wodurch die Ausschussquote verringert wird. Die gezielte Prozessführung ermöglicht es, unnötig hohe Werkzeugkräfte zu vermeiden, was zu reduziertem Werkzeugverschleiß führt.

**Schlagerworte:** Rotationszugbiegen, In-situ-Messsysteme, Faltenbildung, Rissbildung, Prozessregelung, Erfahrungswissen, Rüstprozess, Faltenglätter, Fuzzy-Logik.



# Abstract

Rotary draw bending is a forming process used for bending tubular profiles with small wall thicknesses and small bending radii. Wrinkling as a process boundary is an instability that can only be calculated to a limited extent due to the variety of influences. Until now, only experienced machine operators designed the bending process to be wrinkle-free by carrying out adjustment trials. If corrections are made to prevent wrinkles, there is a risk that the process will lead to cracking. In this work, a knowledge-based method is presented that automatically prevents wrinkling during the bending process. A fuzzy controller was implemented that allows dosed parameter corrections to prevent wrinkles while considering the risk of cracking. Countermeasures to prevent the wrinkles are introduced as much as necessary and as little as possible. In-situ measurement systems detect the first wrinkle as it forms. Both moving the pressure die towards the tube and reducing the feed rate of the transport unit counteract the wrinkles and serve as actuators of the controller. Experience-based knowledge was integrated in the development of the control system. The derived process model can be applied to other problem solving systems, such as case-based reasoning systems, in addition to the system of a closed-loop control. In practical bending tests to prove the controller, wrinkle-free tube bends were produced. The controller, which is integrated into the machine and permanently activated, reacts to fluctuations caused, for example, by material and batch changes as well as variations in wall thicknesses. The use of the controller can eliminate time-consuming and cost-intensive adjustment trials, thus reducing the reject rate. The targeted process control makes it possible to avoid unnecessarily high tool forces, which leads to reduced tool wear.

**Keywords:** Rotary draw bending, in-situ measurement systems, wrinkle formation, crack formation, process control, experience knowledge, setup process, wiper die, fuzzy logic.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik und Forschung</b>	<b>3</b>
2.1	Rotationszugbiegen von Rohren . . . . .	3
2.1.1	Prozess- und Werkzeugbeschreibung . . . . .	4
2.1.2	Achsen einer Rotationszugbiegemaschine . . . . .	7
2.1.3	Geometrische Definition des Biegebauteils . . . . .	7
2.1.4	Qualitätsmerkmale und Verfahrensgrenzen . . . . .	10
2.1.5	Berechnungsgrundlagen und Prozessauslegung . . . . .	13
2.2	Analytische Betrachtungen und FE-Simulationen zur Faltenvorhersage . . .	19
2.2.1	Berechnung der bei Falteneintritt wirkenden kritischen Druckspannung . . . . .	19
2.2.2	FE-Simulationen zur Faltenvorhersage bei der Umformung von Rohren . . . . .	21
2.3	Faltenmessung in der Umformtechnik . . . . .	23
2.4	Prozessregelung in der Umformtechnik . . . . .	24
2.5	Fuzzy-Regelung . . . . .	27
2.5.1	Fuzzy-Mengen und Fuzzy-Logik . . . . .	28
2.5.2	Aufbau eines Max-Min-Reglers . . . . .	31
2.5.3	Hinweise zur Auslegung eines Fuzzy-Reglers . . . . .	34
2.6	Schlussfolgerungen aus dem Stand der Forschung . . . . .	35
<b>3</b>	<b>Motivation, Zielsetzung und Vorgehensweise</b>	<b>37</b>
<b>4</b>	<b>Sensitivitätsanalyse prozessrelevanter Einflussparameter der Faltenbildung</b>	<b>43</b>
4.1	Einfluss der Werkzeugkräfte und Achsenwege . . . . .	44
4.1.1	Vorgehen zur Bewertung der Risswahrscheinlichkeit und der Faltenbildung . . . . .	44
4.1.2	Praktische Biegeversuche unter Variation der Werkzeugkräfte und Achsenwege . . . . .	46
4.1.3	CBR-Systeme - Case-based reasoning . . . . .	54
4.2	Einfluss der Steifigkeiten der Maschinenachsen . . . . .	56
4.2.1	Werkzeug- und Achsensteifigkeit . . . . .	57
4.2.2	Modellaufbau der Finite-Elemente-Simulationen des Rotationszugbiegeprozesses . . . . .	58
4.2.3	Versuchsergebnisse und Diskussion zur Untersuchung der Achsensteifigkeiten . . . . .	61

4.3	Einfluss der Faltenglättergeometrie . . . . .	64
4.3.1	Faltenglätterverschleiß . . . . .	65
4.3.2	Biegeversuche mit gekürzten Faltenglättern . . . . .	66
4.4	Einfluss der Druckspannung auf das Ausbeulverhalten . . . . .	68
4.4.1	Einfluss der durch den Transport überlagerten Druckspannungen auf die Faltenbildung beim RZB . . . . .	68
4.4.2	Einfluss der Rohrwanddicke auf das Ausbeulverhalten bei Druckbe- aufschlagung . . . . .	71
4.4.3	Einfluss des Werkzeugspiels auf das Ausbeulverhalten bei Druckbe- aufschlagung . . . . .	76
<b>5</b>	<b>FE-Simulationsmodell zur Faltenvorhersage</b>	<b>81</b>
5.1	Zugversuche und Werkstoffkennwerte . . . . .	81
5.2	Bestimmung der Reibungskoeffizienten der Rotationszugbiegewerkzeuge . .	82
5.3	Bestimmung der Maschinennachgiebigkeit . . . . .	85
<b>6</b>	<b>Methoden zur In-situ-Messung der Faltenbildung</b>	<b>89</b>
6.1	Taktile Faltencharakterisierung während des Biegens . . . . .	89
6.2	Faltencharakterisierung während des Biegens mittels Rohrkontur- und Kraftmessung . . . . .	92
6.2.1	Versuchsaufbau mit Integration externer Messsysteme . . . . .	92
6.2.2	Durchführung praktischer Biegeversuche . . . . .	94
6.2.3	Ergebnisse der Rohrkonturmessungen . . . . .	95
6.2.4	Ergebnisse der Kraftmessungen . . . . .	98
<b>7</b>	<b>Regelungsmethode zur Faltenkorrektur</b>	<b>107</b>
7.1	Vorgehen für den Reglerentwurf . . . . .	107
7.2	Formulierung der Eingangs-Fuzzy-Sets . . . . .	108
7.2.1	Faltenhöhe . . . . .	108
7.2.2	Änderung der Dorn-Längskraft . . . . .	111
7.2.3	Änderung der Faltenglätternormalkraft . . . . .	114
7.3	Formulierung der Ausgangs-Fuzzy-Sets . . . . .	117
7.3.1	Gegenhalterzustellung . . . . .	117
7.3.2	Änderung der Transportgeschwindigkeit . . . . .	119
7.4	Formulierung der Produktionsregeln und Prüfen der Regler-Kennfelder . .	121
7.5	Programmierung des Fuzzy-Reglers . . . . .	124
7.5.1	Verwendung numerischer Variablen und numerischer Integration . .	125
7.5.2	Aufzeichnung relevanter Daten . . . . .	128
7.5.3	Begrenzungen der Ausgangsgrößen . . . . .	128
7.6	Methode und Ablaufplan zur Faltenkorrektur . . . . .	128
<b>8</b>	<b>Einbindung und Erprobung der Regelungsmethode</b>	<b>131</b>
8.1	Werkzeugaufbau und Sensoranordnung . . . . .	131
8.1.1	Ausgangspositionen der Werkzeuge . . . . .	132
8.1.2	Ermittlung der Faltenhöhe mittels Laser-Liniensensor . . . . .	134
8.2	Programmentwicklung zur rechnergestützten Versuchsdurchführung . . . .	135

---

8.3	Versuchsergebnisse . . . . .	137
8.3.1	Iterativer Einstellprozess . . . . .	139
8.3.2	Rohrbögen mit einem Wanddickenfaktor von $W = 40$ . . . . .	141
8.3.3	Einzelbetrachtung der Eingangsgrößen . . . . .	142
8.3.4	Rohrbögen mit einem Wanddickenfaktor von $W = 50$ . . . . .	146
8.3.5	Rohrbögen mit einem Wanddickenfaktor von $W = 20$ . . . . .	148
8.3.6	Mehrfachbiegungen und Werkstoffvariation . . . . .	151
8.4	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse . . . . .	154
8.5	Verbesserungspotential in der praktischen Anwendung . . . . .	156
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>157</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>161</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>171</b>
A.1	FE-Simulation des Reglerverhaltens . . . . .	171
A.2	Produktionsregeln des Fuzzy-Reglers . . . . .	173
A.3	Auswertung der Faltenhistorie und der Kraftänderungen zur Bestimmung der Grenzen der Fuzzy-Mengen . . . . .	176
A.4	Reibungskoeffizienten der Werkzeuge . . . . .	178
A.5	Beschleunigungsmessungen an der TN 120 . . . . .	179
A.6	Bestimmung des Neigungswinkels für den Vergleich von Biegebauteilen mit- tels Faltenbewertungsfaktor . . . . .	181



# Nomenklatur

Nachfolgend sind die wichtigsten, in dieser Arbeit vorkommenden Schreibweisen, Abkürzungen und Formelzeichen zusammengestellt. Weitere Bezeichnungen bzw. Abweichungen von dieser Aufstellung werden im Text erläutert.

## Schreibweisen

CARL MUSTERMANN GMBH

Personen-, Firmen-, Verbands- und Organisationsnamen werden im Text durch Kapitälchen hervorgehoben.

*Namen*

Die kursive Schriftform kennzeichnet Eigennamen, wie z.B. Produktnamen.

SWIFT (1952)

Quellenverweise erfolgen durch die Angabe des Nachnamens des erstgenannten Autors bzw. Herausgebers in Großbuchstaben gefolgt von der Angabe des Erscheinungsjahres in runden Klammern. Gibt es mehrere Bücher des gleichen Autors in einem Jahr wird ein freigewählter Suffix hinzugefügt. Die Mitarbeit weiterer Autoren wird durch den Zusatz „et al.“ ausgedrückt. Sind nur zwei Autoren beteiligt, werden diese mit dem Zeichen „&“ getrennt. Sind die Autoren/Herausgeber namentlich unbekannt, steht die veröffentlichende Körperschaft oder Zeitschrift als Ersatz.

(2.4)

Gleichungen werden im Fließtext mit der Nummer des erscheinenden Kapitels und einer aufsteigenden Nummerierung, getrennt durch einen Punkt, gekennzeichnet.

## Formelzeichen - Lateinische Buchstaben

Zeichen	Bezeichnung	Einheit
$a$	Fußpunkt der Dreiecksfunktion, Funktionswert	[mm],[kN/°],[ - ]
$a'$	Fußpunkt der Trapezfunktion, Funktionswert	[mm],[kN/°],[ - ]
$A$	Fuzzy-Menge	-
$A_{ji}$	linguistischer Term der Eingangsgröße $i$ für Regel $j$	-
$A_R$	Rohrquerschnittsfläche	mm <sup>2</sup>
$A_S$	Swift-Konstante	N/mm <sup>2</sup>
$A_{Wkz}$	projizierte Werkzeugfläche	mm <sup>2</sup>
$\Delta A_i$	Differenzfläche zwischen der Soll- und Ist-Kontur zwischen zwei Knoten	mm <sup>2</sup>
$b$	Spitze der Dreiecksfunktion, Funktionswert	[mm],[kN/°],[ - ]
$b'$	oberer Eckpunkt der Trapezfunktion, Funktionswert	[mm],[kN/°],[ - ]
$b_R$	Breite des Flächenabschnittes der Rohrquerschnittsfläche	mm
$B$	Biegefaktor	-
$B_j$	linguistischer Term der Ausgangsgröße $y$ für Regel $j$	-
$B_S$	Swift-Konstante	-
$c$	Fußpunkt der Dreiecksfunktion, Funktionswert	[mm],[kN/°],[ - ]
$c'$	oberer Eckpunkt der Trapezfunktion, Funktionswert	[mm],[kN/°],[ - ]
$c_M$	Steifigkeit der Maschinenachse	kN/mm
$c_{Wkz}$	Werkzeugsteifigkeit	kN/mm
$C$	Fuzzy-Menge	-
$C_S$	Swift-Konstante	-
$d$	Stützstelle einer Funktion	[mm],[kN/°],[ - ]
$d'$	Fußpunkt der Trapezfunktion, Funktionswert	[mm],[kN/°],[ - ]
$d_i(t)$	Störgrößen	-
$D$	Rohraußendurchmesser	mm
$e$	Stützstelle einer Funktion	[mm],[kN/°],[ - ]
$e_i(t)$	Regelabweichung	-
$E$	Elastizitätsmodul	N/mm <sup>2</sup>
$E_{nT}[f(y)]$	Integrationsfehler bei Verwendung der zusammengesetzten Trapezregel	[mm],[kN/°],[ - ]
$E_S$	Sekantenmodul	N/mm <sup>2</sup>
$f_h$	Faltenhöhe	mm
$f_{s,o}$	senkrechter Abstand oberhalb der Referenzgeraden	mm
$f_{s,u}$	senkrechter Abstand unterhalb der Referenzgeraden	mm
$f_{v,Gh}$	Geschwindigkeitsfaktor des Gegenhalters	-
$f_{v,Tr}$	Geschwindigkeitsfaktor der Transporteinheit	-
$F_D$	Dorn-Längskraft	kN

Zeichen	Bezeichnung	Einheit
$F'_D$	Änderung der Dorn-Längskraft	kN/°
$F_{DG}$	Längskraft der Dornlieder	kN
$F_{DN}$	Dornnormalkraft	kN
$F_{Fg}$	Faltenglätter-Längskraft	kN
$F_{FgN}$	Faltenglättternormalkraft	kN
$F'_{FgN}$	Änderung der Faltenklättternormalkraft	kN/°
$F_{Gh}$	Gegenhalter-Längskraft	kN
$F_{GhN}$	Gegenhalternormalkraft	kN
$F_I$	aus dem ideellen Biegemoment resultierende Querkraft	kN
$F_{max}$	maximale Druckkraft, bevor eine plastische Verformung eintritt	kN
$F_{min}$	Mindest-Gegenhalternormalkraft	kN
$F_R$	Reibkraft	kN
$F_{Sp}$	Spannkraft	kN
$F_V$	Vorschubkraft	kN
$F_Z$	Zugkraft	kN
$G$	Fuzzy-Grundmenge	-
$G_H$	Geometriefaktor	-
$h$	äquidistante Schrittweite	mm
$H$	Profilhöhe	mm
$H_j$	Erfüllungsgrad der Regel j	-
$k_f$	Fließspannung	N/mm <sup>2</sup>
$k_{f,max}$	maximale Fließspannung	N/mm <sup>2</sup>
$k_R$	Korrekturfaktor für die kritische Druckspannung	-
$l$	Länge	mm
$l_0$	Ausgangslänge	mm
$\widehat{l}_{b,Rest}$	verbleibender Rohrweg	mm
$\widehat{l}_{b,Rohr}$	Bogenlänge der idealen Rohrmittellinie	mm
$l_{Gh}$	Verfahrweg des Gegenhalters	mm
$l_i$	Länge des geraden Profilabschnitts zwischen zwei Bögen	mm
$l_o$	Faserlänge oberhalb der neutralen Faser	mm
$l_{Wkz}$	Werkzeugabmaß	mm
$l_u$	Faserlänge unterhalb der neutralen Faser	mm
$l_{Tr}$	Verfahrweg der Transporteinheit	mm
$\Delta l$	Längenänderung	mm
$\Delta l_{Fg}$	Länge, um die der Faltenklätter gekürzt wurde	mm
$\Delta l_j$	Bogenabmaß/Bogenbreite	mm
$\Delta l_{Mh}$	Verlagerung der Maschinenachse am hinteren Gegenhalterende	mm
$\Delta l_{Mv}$	Verlagerung der Maschinenachse am vorderen Gegenhalterende	mm
$\Delta l_{Wkz}$	Verlagerung der Kontaktfläche des Werkzeugs	mm

Zeichen	Bezeichnung	Einheit
$L$	Stauchprobenlänge	mm
$\Delta L_i$	Abstand zweier Knotenpunkte	mm
$L_{Gh}$	Gegenhalterlänge	mm
$m$	Median	-
$M_B$	Biegemoment	Nm
$M_D$	Biegemomentenanteil des Dornes	Nm
$M_{DG}$	Biegemomentenanteil der Dornglieder	Nm
$M_{Fg}$	Biegemomentenanteil des Faltenglätters	Nm
$M_{Gh}$	Biegemomentenanteil des Gegenhalters	Nm
$M_I$	ideelles Biegemoment	Nm
$M_{I,max}$	maximales, ideelles Biegemoment	Nm
$M_V$	Biegemomentenanteil des Vorschubs (Transporteinheit)	Nm
$n_{ges}$	Summe aller Knotenpaare	-
$n_T$	Anzahl der Teilintervalle	-
$n$	Verfestigungsexponent	-
$N$	Summe aller Knotenpaare mit einem Neigungswinkel kleiner 0,1	-
$p$	Flächenpressung	N/mm <sup>2</sup>
$r$	Rohrradius	mm
$r_A$	Rohraußenradius	mm
$r_I$	Rohrinnenradius	mm
$R$	Biegeradius	mm
$R_a$	Mittenrauwert	µm
$R'$	Radius des Profilbogens unter Berücksichtigung der Verschiebung der neutralen Faser	mm
$R_a$	Außenradius des Bogens	mm
$R_i$	Innenradius des Bogens	mm
$R_j$	Produktionsregel	-
$R_m$	Zugfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>
$R_{p0,2}$	Streckgrenze	N/mm <sup>2</sup>
$R_S$	Radius der Spannbackenkavität	mm
$s$	Wanddicke	mm
$s_a$	Wanddicke am Außenbogen	mm
$s_i$	Wanddicke am Innenbogen	mm
$s_{Gh}$	Achsenposition des Gegenhalters, Fahrweg der Achse	mm
$\Delta s_{Gh}$	Gegenhalterzustellung	mm
$s_{Rohr}$	Rohrnachlauf	mm
$s(\Theta\beta)$	t-Conorm (auch s-Norm)	-
$t(\Theta\beta)$	t-Norm	-
$T$	Tangentenmodul	N/mm <sup>2</sup>
$T_K$	Knickmodul	N/mm <sup>2</sup>
$T_{nT}[f(y)]$	Integrationswert der zusammengesetzten Trapezregel für die Funktion f(y)	[mm],[kN/°],[,-]

Zeichen	Bezeichnung	Einheit
$u_i(t)$	Stellgrößen	-
$v$	Ziehgeschwindigkeit	mm/s
$v_{Gh}$	Verfahrgeschwindigkeit des Gegenhalters	mm/s
$v_{Rohr}$	Verfahrgeschwindigkeit des Rohres	mm/s
$v_{Tr}$	Verfahrgeschwindigkeit der Transporteinheit	mm/s
$w$	Wahrheitswertefunktion	-
$W$	Wanddickenfaktor	-
$x_1$	Eingangsgröße Faltenhöhe	mm
$x_2$	Eingangsgröße Änderung der Dorn-Längskraft	kN/°
$x_3$	Eingangsgröße Änderung der Falten-glätternormalkraft	kN/°
$x_{is}$	scharfer Eingangswert des i-ten Eingangs	-
$y$	Faserabstand zur neutralen Faser	mm
$y_1$	Ausgangsgröße Gegenhalterzustellung	mm
$y_2$	Ausgangsgröße Änderung der Transportgeschwindigkeit	-
$y_e$	Abstand zur neutralen Faser, bis zu dem eine rein elastische Umformung eintritt	mm
$y_i(t)$	Regelgrößen	-
$y_{m,i}(t)$	Messgrößen	-
$y_{rand}$	Randfaserabstand zur neutralen Faser	mm
$y_{sRes1}$	nach der Schwerpunkt-methode berechneter scharfer Wert für die Ausgangsgröße Gegenhalterzustellung	mm
$y_{sRes2}$	nach der Schwerpunkt-methode berechneter scharfer Wert für die Ausgangsgröße Änderung des Transportfaktors	-
$z$	Abstand zum Linienschwerpunkt	mm

## Formelzeichen - Griechische Buchstaben

Zeichen	Bezeichnung	Einheit
$\alpha$	Biegewinkel	°
$\hat{\alpha}$	Biegewinkel im Bogenmaß	rad
$\alpha_{aktuell}$	erreichter Biegewinkel	°
$\alpha_R$	Rückfederungswinkel	°
$\alpha_S$	Winkel zwischen dem Laser-Liniensensor und der Rohrlängsachse	°
$\hat{\alpha}_{Umax}$	maximaler Umschlingungswinkel der Dorn-glieder	rad
$\beta$	Element einer Menge	-
$\beta_D$	Dehnungsverhältnis	-
$\gamma$	Neigungswinkel des aufgezeichneten Profils	°
$\varepsilon$	Dehnung	-

Zeichen	Bezeichnung	Einheit
$\varepsilon_{gl}$	Gleichmaßdehnung	-
$\varepsilon_{grenz}$	Grenzdehnung	-
$\varepsilon_{max}$	Dehnung im Kraftmaximum	-
$\eta$	Verhältnis aus Elastizitäts-, Sekanten- und Tangentenmodul	-
$\eta_D$	Kraftübertragungsfaktor des Dornschaftes	-
$\eta_{DG}$	Kraftübertragungsfaktor der Dornlieder	-
$\eta_{Fg}$	Kraftübertragungsfaktor des Faltenglätters	-
$\eta_{Gh}$	Kraftübertragungsfaktor des Gegenhalters	-
$\eta_R$	Kraftübertragungsfaktor	-
$\Theta$	Element einer Menge	-
$\Theta_{ZM}$	Winkelgeschwindigkeit	$^\circ/s$
$\lambda$	Länge, um welche die Probe nach Entlastung gestaucht wurde	mm
$\mu(x)$	Zugehörigkeitsfunktion	-
$\mu_C(x)$	Zugehörigkeitsfunktion der Fuzzy-Menge C	-
$\mu_A(x)$	Zugehörigkeitsfunktion der Fuzzy-Menge A	-
$\mu_{Bj}$	Ausgangs-Fuzzy-Menge der Regel j	-
$\mu_{B'j}$	abgeschnittene Ausgangs-Fuzzy-Menge der Regel j	-
$\mu_D$	Zugehörigkeitsfunktion der Eingangsgröße Änderung der Dorn-Längskraft	-
$\mu_{Fa}$	Zugehörigkeitsfunktion der Eingangsgröße Faltenhöhe	-
$\mu_{FN}$	Zugehörigkeitsfunktion der Eingangsgröße Änderung der Faltenglätternormalkraft	-
$\mu_{Gh}(y_1)$	Zugehörigkeitsfunktion der Ausgangsgröße Gegenhalterzustellung	-
$\mu_{res}(y)$	resultierende Ergebnis-Fuzzy-Menge aller Regeln	-
$\mu_{Tr}(y_2)$	Zugehörigkeitsfunktion der Ausgangsgröße Änderung der Transportgeschwindigkeit	-
$\mu_\Delta(x)$	Dreiecksfunktion	-
$\mu_\Pi(x)$	Trapezfunktion	-
$\mu_R$	Reibungskoeffizient	-
$\sigma$	Spannung	$N/mm^2$
$\sigma_{el}$	elastische Spannung	$N/mm^2$
$\sigma_{pl}$	plastische Spannung	$N/mm^2$
$\sigma_{Schapitz,el}$	kritische Druckspannung für den elastischen Bereich	$N/mm^2$
$\sigma_{Schapitz,el/pl}$	kritische Druckspannung für den elastisch-plastischen Bereich	$N/mm^2$
$\sigma_{Schapitz-Tet.}$	kritische Druckspannung für den elastisch-plastischen Bereich, Anpassung 1	$N/mm^2$
$\sigma_{kor.Schapitz-Tet.}$	kritische Druckspannung für den elastisch-plastischen Bereich, Anpassung 2	$N/mm^2$
$\zeta_i$	Neigungswinkel eines Knotenpaares	rad

Zeichen	Bezeichnung	Einheit
$\nu$	Querkontraktionszahl	-
$\varphi_1$	Hauptumformgrad	-
$\varphi_{1,\max}$	maximaler Hauptumformgrad	-
$\varphi_2$	Nebenumformgrad	-
$\varphi_V$	Vergleichsumformgrad	-
$\omega$	Formziffer zur Bestimmung der Mindestlänge für Ausbeulungen	-
$\Omega$	Faltenbewertungsfaktor	-

## Abkürzungen

Zeichen	Bedeutung
CAD	computer-aided design, rechnerunterstütztes Konstruieren
CBR	Case-based reasoning
Dp.-Nr.	Datenpunkt-Nummer
E-Modul	Elastizitätsmodul
FEM	Finite-Elemente-Methode
GH	Gegenhalter
HMI	Human-Machine-Interface, Schnittstelle Mensch-Maschine
MES	Messwerterfassungssystem
OFAT	One factor at a time, Einzelvariation eines Parameters
RZB	Rotationszugbiegen
TR	Transporteinheit
TSK	Takagi-Suego-Kang-Regler
Ventilst.	Ventilstellung



# 1 Einleitung

Die Vision des Lehrstuhls für Umformtechnik der Universität Siegen besteht darin, „jederzeit und überall abrufbare Fertigungstechniken für kundenindividuelle Produkte“ zu realisieren. Die vorgestellte Arbeit bringt uns in Bezug auf robuste Fertigungsprozesse, die sich individuellen Produktvarianten und Einflusschwankungen anpassen, diesem Ziel einen Schritt näher.

Die steigende Forderung nach Variantenvielfalt in der Fertigungstechnik bedingt nach RAUTER et al. (2018) zunehmend kleiner werdende Losgrößen. Geringe Losgrößen erfordern eine niedrige Ausschussquote zur Schonung von Ressourcen und zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit. Flexible Fertigungsverfahren ermöglichen die Individualisierung von Produkten. Weiterhin nehmen nach PRINZ et al. (2017) die Möglichkeiten für den Kunden zu, auf digitalem Weg unmittelbar in Fertigungsabläufe smarter Prozesse einzugreifen. Aufgrund der Vielfalt der Produkte steigen nach KUHNHEN & ENGEL (2018) die Anzahl an Werkzeugwechseln und Einstellprozessen. Korrekturen an Werkzeugkräften und Achsenwegen erfolgen noch heute in der Regel manuell nach der Herstellung eines Ausschussteils. Die Anzahl und Dauer der iterativen Einstellversuche ist von der Erfahrung der Maschinenbediener abhängig, vgl. DE CARVALHO et al. (2018).

Benötigt werden robuste Fertigungsprozesse, die sich selbstständig an wechselnde Varianten anpassen können. In der Umformtechnik arbeiten Prozesse nach KUHNHEN & ENGEL (2018) sowie ALLWOOD et al. (2016) unter Unsicherheiten aufgrund von Schwankungen und unvollständigem Prozessverständnis. Diese Unsicherheit führt zu einer Verschlechterung der Produkteigenschaften gegenüber den Kundenspezifikationen, die nach ALLWOOD et al. (2016) durch den Einsatz von Regelkreisen reduziert werden kann. Um die Möglichkeiten der Vorhersage nicht nur globaler, sondern auch lokaler Produkteigenschaften komplexer Teile zu verbessern, müssen nach TEKKAYA et al. (2015) die Messmethoden verbessert werden.

Das Rotationszugbiegen (RZB) ist ein Profilbiegeverfahren, welches vorzugsweise bei geringen Wanddicken und kleinen Biegeradien eingesetzt wird. Es findet Anwendung in der Automobilindustrie sowie in der Bau-, Sanitär- und Luftfahrtindustrie. Zum Vergleich von Biegeaufgaben wird der Biegefaktor als Quotient des Biegehalbmessers bezogen auf die Profilhöhe verwendet. Zum Vergleich von Halbzeugen bei unterschiedlichen Abmessungen dient der Wanddickenfaktor als Quotient der Profilhöhe in Biegerichtung bezogen auf die Wanddicke. Mit geeigneter Werkzeug- und Maschinenteknik sind Biegeverhältnisse kleiner als 1 darstellbar, vgl. BURKHARD & ALBRECHT (2009). Die Grenzen des Verfahrens liegen in der Rissbildung auf der Bogenaußenseite und der Faltenbildung auf der Bogeninnenseite. Qualitätsbeeinflussende Merkmale sind beim Rotationszugbiegen u.a.

Geometrieabweichungen in den geraden Bereichen zwischen den Bögen, Abweichungen des Radius sowie nicht eingehaltene Vorgaben zum Biegeeinfall oder der Ovalität im Bogenbereich. Die Faltenbildung ist nach BORCHMANN et al. (2020-2) nur näherungsweise durch Berechnungen, wie FE-Simulationen, vorhersagbar. Berechnungen und praktische Versuche unterscheiden sich, da Instabilitäten im Gefüge sowie äußere Einflüsse aus den Bereichen Umgebung, Werkzeug und Maschine in der Modellbildung nicht vollständig erfasst werden. Bei Korrekturen zum Verhindern von Falten besteht nach BORCHMANN et al. (2019) die Gefahr, dass der Prozess zur Rissbildung geführt wird.

In dieser Arbeit wird eine wissensbasierte Methode anhand des Rotationszugbiegeprozesses vorgestellt, die durch einen integrierten Fuzzy-Regler eine selbstständige Verhinderung der Faltenbildung während des Prozesses ermöglicht. Der fest an der Maschine verbauete und dauerhaft aktivierte Regler reagiert auf Schwankungen bspw. bei Werkstoff- und Chargenwechseln sowie Variation der Wanddicke. Ein manuelles Eingreifen in den Prozess ist nicht erforderlich. In-situ-Messmethoden ermöglichen die kontinuierliche Erfassung der Rohrkontur und detektieren die erste Falte in ihrer Entstehung. Aktoren wirken der Faltenbildung entgegen. Anhand entwickelter Einstellregeln werden Stellgrößen für die Aktoren ermittelt und auf Prozessschwankungen abgestimmt. Der Regler ermöglicht die Anpassung der Stellgrößen an verschiedene Produktvarianten. Die Gegenmaßnahmen zur Verhinderung der Falten erfolgen so viel wie nötig und so wenig wie möglich, sodass unnötig hohe Werkzeugkräfte vermieden werden können, wodurch geringere Kontaktnormalspannungen vorliegen. Dadurch können die Rissgefahr und der Werkzeugverschleiß reduziert werden.

Die Rissbildung kann durch den Vergleich der berechneten Dehnungen mit einer Grenzformänderungskurve abgeschätzt werden. Ab wann eine Konturveränderung zu einer Falte führt, ist hingegen aufgrund der Vielzahl an Einflüssen nicht ausreichend genau berechenbar. Weiterhin ist die Abhängigkeit zwischen der Faltenbildung und den Stellgrößen nicht linear. Dadurch entspricht die Regelbasis keinem linearen Gleichungssystem der klassischen Logik. Für die mathematische Beschreibung unscharfer, nichtlinearer Abhängigkeiten entwickelten Wissenschaftler wie ZADEH (1988) die Fuzzy-Logik mit Zugehörigkeitsfunktionen für unscharfe Mengen. Dadurch ist es in Verbindung mit einer Regelbasis möglich, den menschlichen Entscheidungsprozess zu simulieren. Ziel der Methode ist die Reduzierung der Einstellzeiten sowie die Vermeidung von Ausschuss.

# 2 Stand der Technik und Forschung

Neben der Einordnung und Beschreibung des Rotationszugbiegens werden in dem folgenden Kapitel die Grenzen der Faltenvorhersage und die Möglichkeiten der In-situ-Faltenmessung in der Umformtechnik dargestellt. Zum Stand der Prozessregelungen in der Umformtechnik ist die Recherche verschiedener Reglertypen aufgeführt. Anschließend wird der Schwerpunkt auf den Aufbau und den aktuellen Einsatz von Fuzzy-Reglern gelegt.

## 2.1 Rotationszugbiegen von Rohren

Das Biegen wird nach DIN 8580 den Fertigungsverfahren der Umformtechnik untergeordnet und kann nach DIN 8586 in Biegeumformen mit geradliniger Werkzeugbewegung und Biegeumformen mit drehender Werkzeugbewegung eingeteilt werden, vgl. Abbildung 2.1.

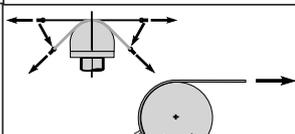
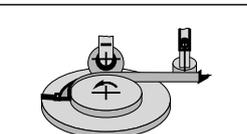
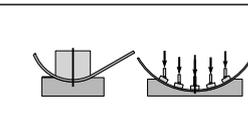
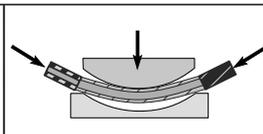
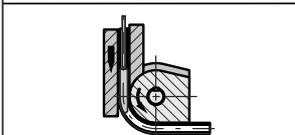
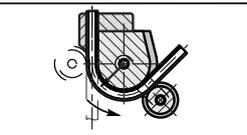
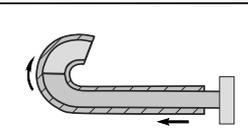
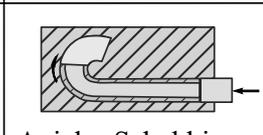
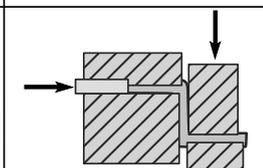
	drehende Werkzeugbewegung		geradlinige Werkzeugbewegung	
Formgebundene Kontur	 Streckbiegen	 Rundbiegen	 Gesenkbiegen	 Biegen unter Innendruck
	 Rotationszugbiegen	 Klassisches Rohrbiegen	 Hamburger Verfahren	 Axiales Schubbiegen in ein Gesenk
			 Scherbiegen	

Abbildung 2.1: Einteilung der formgebundenen Biegeverfahren nach VDI 3430 und HERMES (2012).

Das Rotationszugbiegen ist nach FRANZ (1988), LANGE (1990), GILLANDER (1994) und SACHS & VOEGLI (1996) ein gebräuchliches Biegeumformverfahren mit drehender Werkzeugbewegung. Um die Kraft in das Halbzeug einzuleiten, ist entsprechend der VDI 3430 sowie HINKEL (2013) ein Biegemoment mit überlagerter Längskraft erforderlich. Der Verlauf des Biegemomentes ist in Abbildung 2.2 schematisch dargestellt.

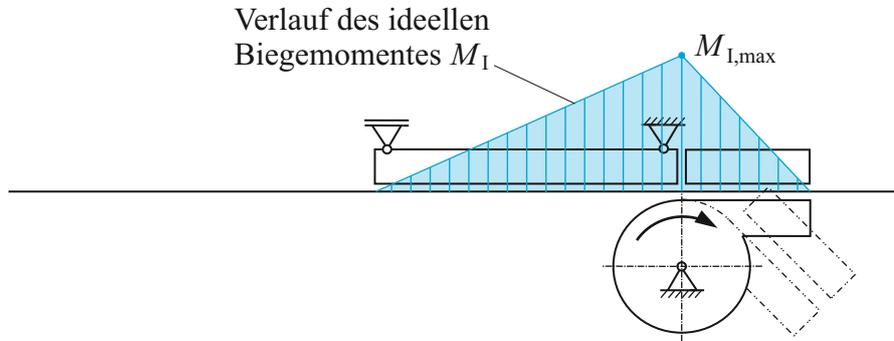


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des Biegemomentenverlaufs beim Rotationszugbiegen.

Das Verfahren zählt zu den werkzeuggebundenen Umformverfahren, da das Halbzeug in der Kavität eines Werkzeugs geführt und ausgeformt wird. Die Kavität entspricht der Negativform des Halbzeugquerschnittes. Zu den gängigsten Halbzeugen des Rotationszugbiegens gehören Voll- und Hohlprofile, insbesondere Rundrohre.

### 2.1.1 Prozess- und Werkzeugbeschreibung

Für die Umformung sind die Werkzeuge Biegeform (1), Spannbacken (2, 2.1) und Gegenhalter (3) für die Biegung notwendig, vgl. Abbildung 2.3. Die Vorschubeinheit (6) wird meist zur Positionierung des Halbzeugs genutzt. Biegedorn (4) und Faltenglätter (5) werden bei anspruchsvollen Biegeaufgaben eingesetzt. Die Werkzeugkonturen richten sich nach der Geometrie des Halbzeugs und der Idealgeometrie des Bauteils.

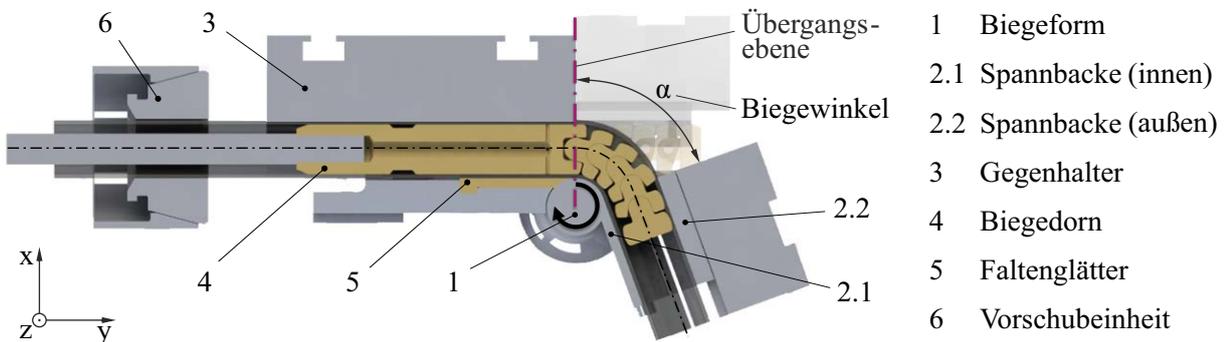


Abbildung 2.3: Werkzeuganordnung beim Rotationszugbiegen.

Durch seine Formgebundenheit wird das Rotationszugbiegen nach STAHL (2002) zum Biegen von dünnwandigen Rohren mit engen Biegeradien eingesetzt. Hiermit sind nach HOFFMANN et al. (2012) sowie BURKHARD & ALBRECHT (2009) durch die Führung des Rohres in den formangepassten Werkzeugen Biegeradien kleiner als  $1xD$  möglich. Für jeden Biegeradius wird eine eigene Biegeform und für jede Rohrgeometrie ein eigener Werkzeugsatz benötigt. Der Biegewinkel  $\alpha$  kann für jede Biegeaufgabe stufenlos eingestellt werden. Die zwei an den Bogen angrenzenden geraden Profilabschnitte spannen die Biegeebene auf. In Abbildung 2.3 entspricht die  $xy$ -Ebene der Biegeebene. Das Spannfutter der Vorschubeinheit kann das Profil um seine Längsachse drehen. Dadurch können Bauteile mit Bögen in verschiedenen Biegeebenen hergestellt werden. Zwei aufeinanderfolgende Bögen ohne dazwischen liegenden geraden Profilabschnitt können mit Formspannbacken realisiert werden. Die Kavität der Formspannbacken entspricht dem ersten Bogen. Der zweite Bogen kann direkt angrenzend gefertigt werden.

Für die Biegung wird nach HINKEL (2013) das Rohr mit der inneren (2.1) und äußeren (2.2) Spannbacke geklemmt, um die Rotation von der Maschine auf das Rohr zu übertragen. Die Spannkkräfte für die ausreichende Haltekraft des Rohres in Rohrlängsrichtung und die hieraus resultierende Oberflächengestaltung der Spannbacken werden aus Standardwerken entnommen, vgl. FRANZ (1988), GILLANDERS (1994) und MILLER (2003). In Abbildung 2.4 sind die Werkzeuge in montiertem und demontiertem Zustand dargestellt.

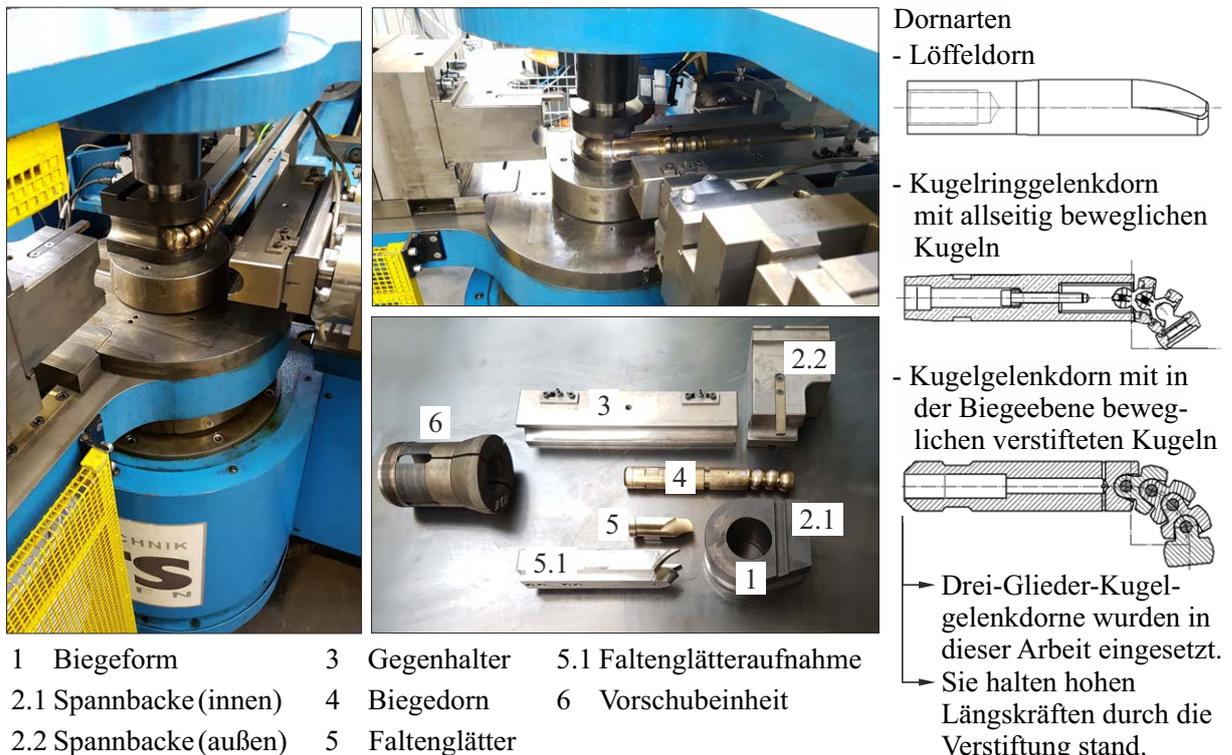


Abbildung 2.4: An der Biegemaschine montierte Werkzeuge für das Rotationszugbiegen sowie demontierter Werkzeugsatz.

Das Biegemoment wird durch die Abstützung des Rohres am Gegenhalter (3) aufgebracht. Neben dieser Hauptfunktion kann der Gegenhalter die Wanddickenausdünnung und Querschnittsdeformation des Rohres durch Bewegung in Längsrichtung des Rohres beeinflussen. Beim Mitlaufen des Gegenhalters wird die Relativbewegung zwischen Gegenhalter und Rohr größtenteils verringert, wodurch Reibkräfte am Außenbogen in Längsrichtung weitgehend entfallen. Durch das Nachschieben des Gegenhalters wird aktiv Material aus dem noch nicht gebogenen Rohrabschnitt in die Umformzone geschoben. Nach Untersuchungen von BORCHMANN et al. (2019) werden damit die Längsdehnung am Außenbogen und die Gefahr, dass Einschnürungen oder Risse auftreten, verringert.

Die Vorschubeinheit (6), welche das Rohr meist an dessen Ende spannt, kann nach BORCHMANN et al. (2019) ebenfalls der Wanddickenreduktion am Außenbogen durch Mitlaufen bzw. Nachschieben entgegen wirken. Beim aktiven Nachschieben besteht das Risiko, dass die resultierende Druckspannung zum Knicken des Rohres bei großer ungestützter Rohrlänge führt.

Der Biegedorn (4) bewirkt die Abstützung der Innenwand des Außenbogens und mindert damit nach HASSAN (2017) und FANG et al. (2013) die Querschnittsdeformation im Bogen. Die Dornart wird durch die Einordnung der Biegeaufgabe in dem Biegediagramm ausgewählt, siehe Abbildung 2.4 und 2.7. Durch das Nachschieben des Gegenhalters (3) oder der Vorschubeinheit (6) entstehen Druckspannungen am Innenbogen, die zur Ausbildung von Falten senkrecht zur Rohrlängsachse führen können. Um dem entgegen zu wirken, kann ein Faltenglätter (5) zusätzlich zum Biegedorn verwendet werden. Der Faltenglätter liegt an der Kavität der Biegeform an und reduziert den Freiraum am Übergangsbereich zur Biegeform, in dem sich sonst Falten ausbilden können. Falten können trotz Einsatz eines Faltenglätters entstehen. Dabei erfährt die Rohrwand zunächst aufgrund der Druckspannungen eine Aufdickung, bis sie nach HOFFMANN et al. (2012) und SCHAPITZ (1963) instabil wird und ausbeult. Nach ENGEL & MATHES (2013) und YANG et al. (2009) steigt mit zunehmendem Abstand zwischen Faltenglätter und Biegedorn die Faltenhöhe an. Eine Erhöhung der Gegenhalterquerkraft führt nahe der Übergangsebene zu einer Kraftübertragung über den Biegedorn und das Rohr senkrecht zur Rohrachse auf den Faltenglätter. Der Faltenglätter nimmt diese Kraft auf und stellt sie den auf den Innenbogen wirkenden Druckspannungen entgegen. Diese Umfangsdruckspannungen und der dadurch verringerte Freiraum wirken nach ENGEL et al. (2013) und BORCHMANN et al. (2019) der Bildung von Falten entgegen.

Nach ENGEL & MATHES (2013) sowie YANG et al. (2010) hat die Reibung zwischen Rohr und Faltenglätter einen großen Einfluss auf den Werkstofffluss am Innenbogen und damit auf die Faltenbildung. Ein allgemeines Kriterium für die Faltenbildung an Rohren ist bisher nicht bekannt. VDI 3431 und KUHNHEN (2016) zeigen eine Methode zur Quantifizierung von Falten an Rohrbögen. SCHAPITZ (1963) untersuchte das Ausbeulverhalten von Kreiszyinderschalen unter Druckspannungen und postulierte eine kritische Druckspannung als Grenzwert. Laut seinen Untersuchungsergebnissen streuen praktische Versuche zur Validierung der Berechnungsformeln sehr stark, da schon die „geringste Vorbeule genügt“, um das Rohr aus dem „vorkritischen Zustand in den ausgebeulten“ Zustand zu überführen.

## 2.1.2 Achsen einer Rotationszugbiegemaschine

Die Umformung wird beim Rotationszugbiegen durch die gleichzeitige Bewegung der Werkzeuge ermöglicht. Die VDI 3430 und 3432 beinhalten die benötigten Maschinenachsen, vgl. Abbildung 2.5.

Achsen-Nr.	Maschinenachse	Funktion der Achse
1	y-Achse	(Profil-)Vorschubachse
2	c-Achse	Biegeachse
3	p-Achse	Spannachse
4	g-Achse	Gegenhalterzustellung
5	v-Achse	Gegenhaltervorschub
6	x-Achse	Querverstellung
7	z-Achse	Höhenverstellung
8	d-Achse	Dornachse
9	s-Achse	Spannzange
10	b-Achse	Profildrehachse

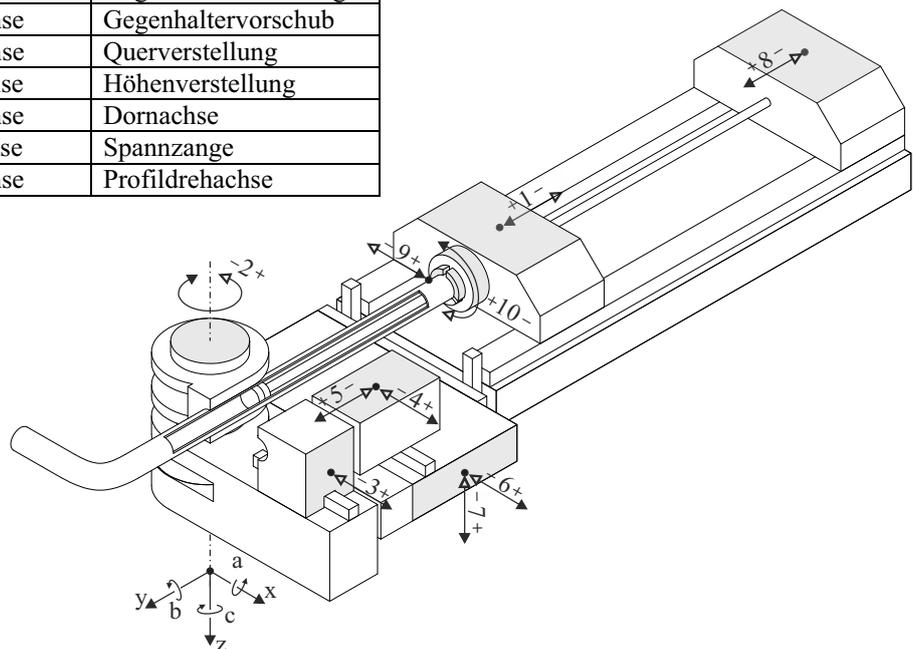


Abbildung 2.5: Maschinenachsen mit den grundlegenden Werkzeugelementen beim Rotationszugbiegen nach VDI 3432.

Die d-Achse hat die Aufgabe, den Dorn in Längsrichtung des Rohrs (y-Richtung) zu positionieren. In y-Richtung kann das Rohr mit Hilfe der Vorschubachse positioniert werden. Die g-Achse hat die Aufgabe, den Gegenhalter quer zur Rohrlängsachse zuzustellen. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt dort, wo die Biegeachse (c-Achse) die xy-Ebene schneidet. Die xy-Ebene liegt dabei auf der Höhe der Profil-Schwerpunktachse in der untersten Biegeebene. Zur deutlicheren Darstellung ist der Koordinatenursprung in Abbildung 2.5 in z-Richtung verschoben angeordnet. Der Maschinennullpunkt kann vom Koordinatenursprung abweichen.

## 2.1.3 Geometrische Definition des Biegebauteils

Die Lage der Schwerpunktschwerachse des gebogenen Profils wird nach VDI 3430 durch den Biegeradius  $R$  charakterisiert, vgl. Abbildung 2.6.

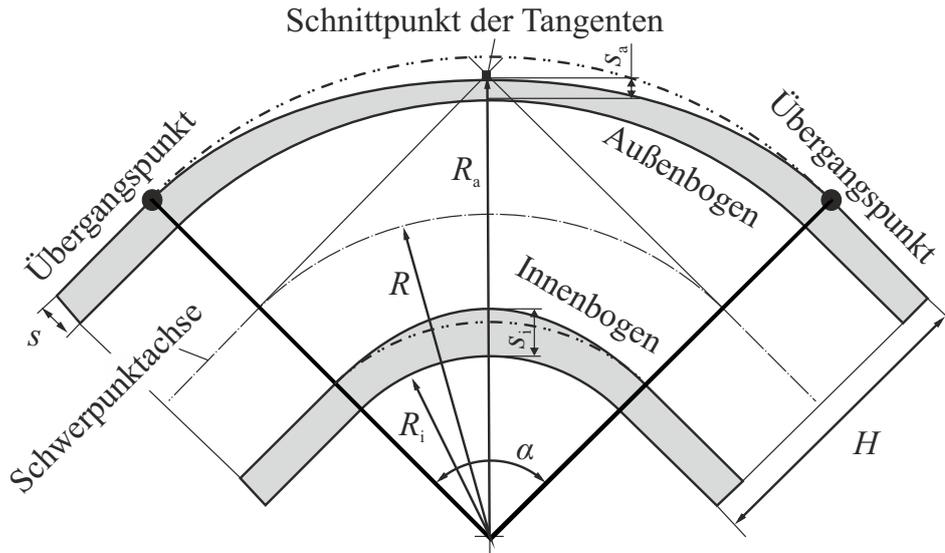


Abbildung 2.6: Begriffe am Biegebogen nach VDI 3430.

Die Wanddicke  $s$ , die Profilhöhe  $H$  und der Biegehalbmesser  $R$  sind ebenfalls charakteristische Größen des Halbzugs und des Profilbogens. Bei Rundrohren entspricht die Profilhöhe  $H$  dem Rohraußendurchmesser. Der Übergang vom Rohrbogen zu den geraden Rohrab schnitten wird durch die Übergangspunkte markiert. Durch die Dehnung am Außenbogen reduziert sich die Wanddicke, während die Stauchung am Innenbogen zu einer Aufdickung führt. Je geringer die Ausgangswanddicke  $s$  ist, desto stärker treten diese Effekte laut HOFFMANN (2012) auf.

Zum Vergleich von Biegeaufgaben verwendet man nach VDI 3430 für die Halbzugbeschreibung den Wanddickenfaktor  $W$  als Quotient aus der Profilhöhe  $H$  in Biegerichtung und der Wanddicke  $s$ .

$$W = \frac{H}{s} \quad (2.1)$$

Zur Beschreibung der Biegeaufgabe verwendet man den Biegefaktor  $B$  als Quotient aus dem Biegehalbmesser  $R$  und der Profilhöhe  $H$ .

$$B = \frac{R}{H} \quad (2.2)$$

Durch die dimensionslosen Kennzahlen Biege- und Wanddickenfaktor können Biegeaufgaben gegenübergestellt und auf ihre Machbarkeit geprüft werden. Anspruchsvolle Biegeaufgaben liegen im Bereich großer Wanddickenfaktoren und kleiner Biegefaktoren. Die Prozessfenster, die sich durch die Auswahl einer Dornart ergeben, sind in Abbildung 2.7 dargestellt.

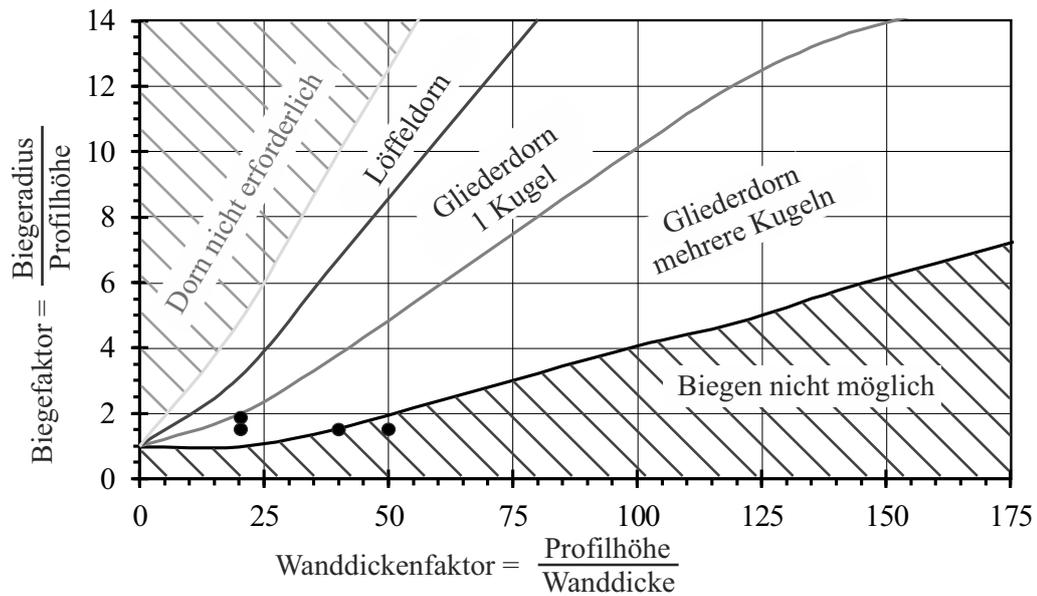


Abbildung 2.7: Biegediagramm nach ENGEL et al. (2011), FLEHMIG et al. (2001), WEBER (1998) und OEHLER (1971). Die eingetragenen Biegeaufgaben entsprechen Profilhöhen von 40 mm, Wanddicken von 2 mm, 1 mm und 0,8 mm sowie Biegeradien von 60 mm und 75 mm und werden in Abschnitt 4.1 und 6.2 untersucht.

Über die Biegelinien wird nach VDI 3430 die Geometrie eines Bauteils definiert. Dabei setzt sich nach WEBER (1998) ein Bauteil aus Biegebögen und geraden Profilabschnitten zusammen, deren Schwerpunktlinien tangential stetig aneinander gesetzt werden, vgl. Abbildung 2.8. Ein Bogen und zwei angrenzende gerade Abschnitte bilden eine Biegeebene. Liegen mehrere Biegeebenen vor, werden die Winkel zwischen ihnen angegeben. In der zugehörigen Biegetabelle sind die Koordinaten der Biegelinie sowie die Radien der Biegebögen angegeben. Die Koordinaten beziehen sich auf die theoretischen Schnittpunkte der Schwerpunktlinien und sind radienunabhängig.

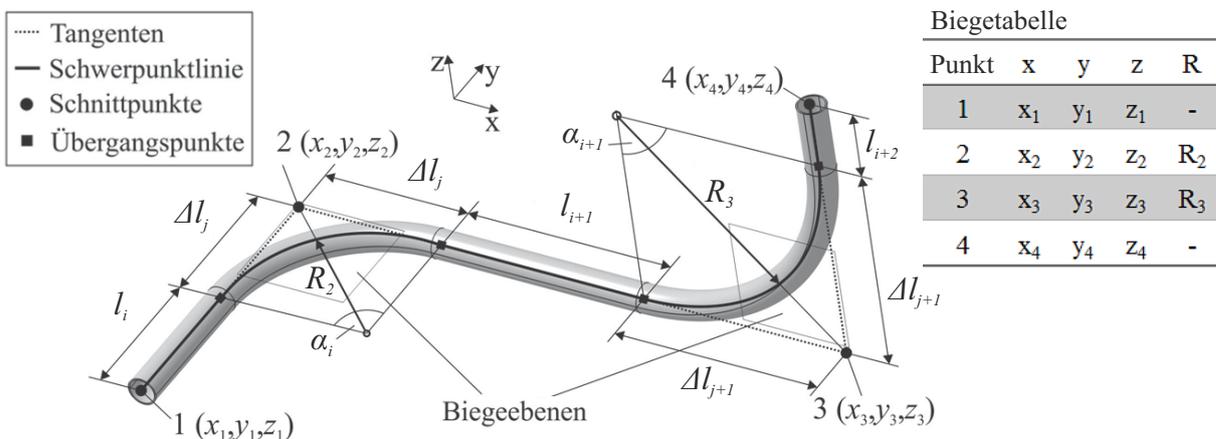


Abbildung 2.8: Biegeisometrie eines mehrfach gebogenen Profils nach VDI 3430.

Die Darstellung von Bauteilen mittels Biegelinie und -tabelle schafft eine Vergleichbarkeit von Biegeaufgaben unabhängig vom Herstellungsverfahren. Für die Herstellung an der Biegemaschine wird die Biegetabelle in Achsenwege der Maschinenachsen (Unterabschnitt 2.1.2) umgerechnet.

### 2.1.4 Qualitätsmerkmale und Verfahrensgrenzen

Biegebauteile unterscheiden sich hinsichtlich der Idealgeometrie der Konstruktion und des tatsächlichen Verlaufs der Biegegeometrie. Die Ursache liegt in den fertigungsbedingten Übergangsbereichen. Einsatzgebiet und Anwendungsfall bestimmen die zulässigen Abweichungen, um die Funktion und Montierbarkeit zu gewährleisten. KUHNHEN (2016) definiert 21 Qualitätsmerkmale für Biegebauteile.

Zu den wichtigsten Qualitätsmerkmalen gehören nach VDI 3430

- die Querschnittsdeformation, zu der sowohl die Aufdickung und Ausdünnung der Wanddicke als auch die Ovalisierung und Deformationen der gesamten Querschnittsform zählen,
- der Einfall am Außenbogen, der das Abflachen des Außenbogens bis zur Kollabierung beschreibt und
- die Rückfederung, bei der der elastische Anteil der Umformung eine Auffederung und damit eine Maßabweichung des Biegeradius und des Biegewinkels verursacht.

Die Verfahrensgrenzen beim Rotationszugbiegen zeigen sich nach OEHLER (1971) und FLEHMING et al. (2001) durch Risse am Außenbogen und Falten am Innenbogen.

#### Verfahrensgrenze Rissbildung am Außenbogen

Der Riss am Außenbogen führt zum Prozessabbruch und Bauteilausschuss. Zur Bewertung der Risswahrscheinlichkeit wird die Dehnung der Randfaser am Außenbogen herangezogen. Dabei sollte als erste Abschätzung die Grenzdehnung  $\varepsilon_{\text{grenz}}$ , vorgegeben durch den Biegefaktor, kleiner als die Gleichmaßdehnung  $\varepsilon_{\text{gl}}$  des Werkstoffs des Profilhalbzeuges sein.

$$\varepsilon_{\text{grenz}} = \frac{H}{R} \cdot \frac{1}{2} \leq \varepsilon_{\text{gl}} \quad (2.3)$$

Abbildung 2.9 zeigt die Risseintrittsgrenze abhängig von dem Biegefaktor und der Gleichmaßdehnung. Die Gleichung 2.3 dient nach ENGEL & HINKEL (2011) lediglich als erste Abschätzung des Risses. Die Gleichung gilt für Biegungen mit einem in Rohrlängsrichtung stehenden Gegenhalter. Es wird angenommen, dass die Dehnung am Außenbogen in Längsrichtung wirkt, ohne dass eine Dehnung in Umfangsrichtung einsetzt (ebene Formänderung  $\varphi_2 = 0$ ).

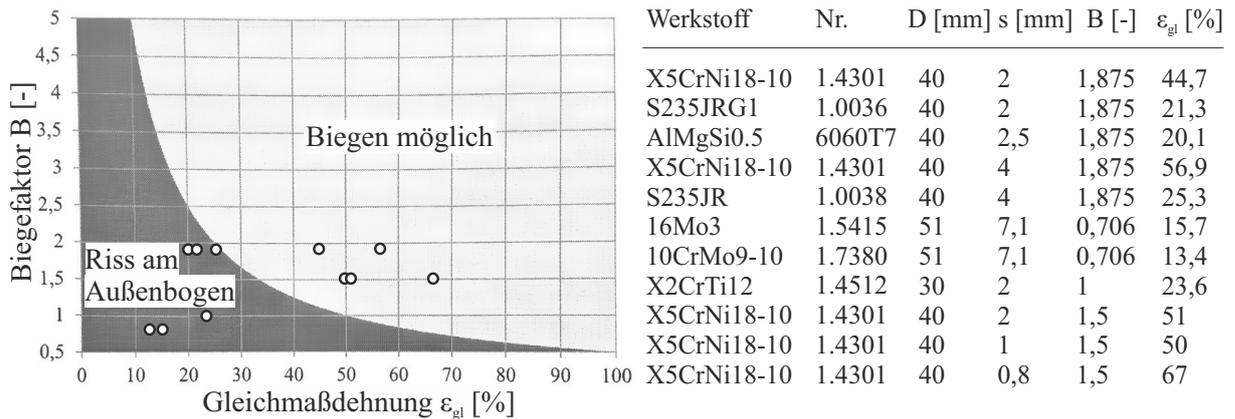


Abbildung 2.9: Risseintrittsgrenze beim Rotationszugbiegen nach ENGEL & HINKEL (2011) mit Eintragungen von Biegebauteilen, die durch das Rotationszugbiegen hergestellt wurden.

Bei den im kritischen Bereich von Abbildung 2.9 eingetragenen Biegeversuchen setzte eine Stauchung in Umfangsrichtung ein, die der Rissbildung entgegen wirkte. Dies ist bei einem mitfahrenden oder nachschiebenden Gegenhalter der Fall, siehe Unterabschnitt 2.1.5. Die Streckung in Längsrichtung verursachte eine Wandausdünnung am Außenbogen, die durch ein Nachfließen des Werkstoffs aus der Umfangsrichtung nicht zu einer Einschnürung geführt hat, siehe HASSAN (2017). Zur Prozessauslegung gegenüber der Rissbildung kann der Werkstofffluss in Umfangsrichtung anhand des Dehnungspfades berücksichtigt werden, siehe Unterabschnitt 4.1.1.

### Verfahrensgrenze Faltenbildung am Innenbogen

Biegeprozesse sind im Vorfeld sicher gegen Rissbildung auslegbar. Die Prozessauslegung gegen Faltenbildung stellt sich ungleich schwieriger dar, weil eine Reihe von Einflussfaktoren für dieses Fehlerbild verantwortlich ist, vgl. Abbildung 2.10. Die Einflüsse lassen sich nach ENGEL & MATHES (2013) in die Bereiche Halbzeug, Werkzeug und Maschine sowie Prozessregelung einteilen.

Die Werkzeugpositionierung des Faltenglätters und des Gegenhalters sind von Bedeutung, da die sich im Prozess einstellende Kraftübertragung (zwischen Gegenhalter, Rohr und Faltenglätter) maßgeblich die Faltenhöhe beeinflusst. Aufbiegungen des Werkzeuges und der Maschine können faltenverursachende Größen sein, daher ist die Steifigkeit eines jeden Werkzeuges und jeder Maschinenachse von großer Bedeutung. Kommt es zu Verlagerungen an Werkzeugen oder Maschinenachsen, können Werkzeuge in ihren Prozessparametern, wie Kontaktkräften und Zustellungen, nachgestellt werden und einer Aufbiegung entgegenwirken.

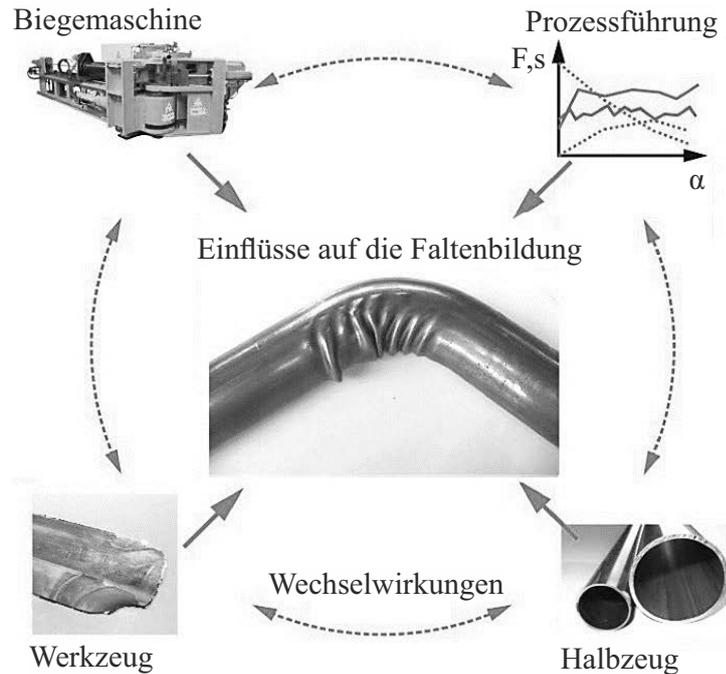


Abbildung 2.10: Haupteinflussgrößen auf die Faltenbildung beim RZB nach ENGEL & MATHES (2013).

Falten sind nach VDI 3431 wellenförmige Abweichungen der Profilkontur von der idealen Kontur. Die Faltenbildung am Innenbogen wird mit Hilfe des Bewertungsfaktors  $\Omega$  nach Gleichung 2.4 und Abbildung 2.11 a) quantifiziert.  $\Delta A_i$  ist die Differenzfläche zwischen der Soll- und Ist-Kontur zwischen zwei Knoten. Der Abstand der Knoten ist  $\Delta L_i$ . Knoten können Punkte aus dem Oberflächenscan eines Biegebauteils oder Knotenpunkte aus dem Netz eines FE-simulierten Biegebauteils sein. Es werden immer zwei aufeinander folgende Knoten miteinander verglichen.

$$\Omega = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=1}^{n_{\text{ges}}} \left| \frac{\Delta A_i}{H_i \cdot \Delta L_i} \cdot \sin \varsigma_i \right| \cdot n_i \quad (2.4)$$

$$\text{mit } \begin{cases} n_i = 1, \varsigma_i \geq 0,1 \\ n_i = 0, \varsigma_i < 0,1 \end{cases} \quad \text{und} \quad N = \sum_{i=1}^{n_{\text{ges}}} n_i \quad (2.5)$$

Der Faktor wird nach KUNHLEN (2016) für Knotenpaare berechnet, deren Neigungswinkel  $\varsigma_i$  größer als 0,1 rad ist. Diese Grenze wurde entsprechend dem maximalen Neigungswinkel eines faltenfreien Rohrbogens, siehe Anhang A.6, festgelegt. Auf diese Weise kann der Einfluss der Länge der Bauteilschenkel eliminiert werden. Wenn der Faltenbewertungsfaktor in jedem Oberflächenknoten bestimmt wird, gibt es in den geraden Seitenbereichen viele Punktepaare, die keine Faltenkontur aufweisen. Je mehr Punktepaare keine Faltenkontur aufweisen, desto kleiner wird der Bewertungsfaktor. Die Länge der Seitenstücke hängt von der FE-Simulation und in praktischen Tests von der Abtastung des Rohrbogens ab.

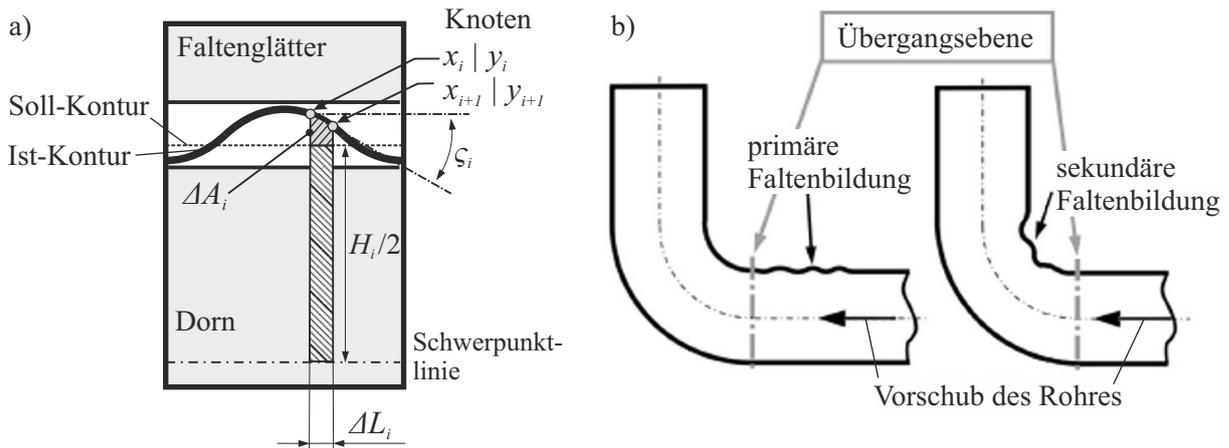


Abbildung 2.11: a) Quantifizierung der Faltenbildung nach KUHNHEN (2016) und BORCHMANN et al. (2020-2). b) Primäre Falten vor der Übergangsebene und sekundäre Falten hinter der Übergangsebene eines gebogenen Profils nach ENGEL & MATHES (2013).

Um Rohrbögen unabhängig von ihrer vermessenen Länge bewerten zu können, wurde die Einschränkung des Neigungswinkels in Gleichung 2.4 berücksichtigt.  $n_{\text{ges}}$  ist die Summe aller Knotenpaare, während  $N$  die Summe der Knotenpaare mit  $\zeta_i \geq 0,1$  ist. Weiterhin kann dadurch der Einfluss des Messrauschens eliminiert werden. Ein Nachteil dieser Einschränkung ist, dass Falten mit großer Wellenlänge im Bereich ihrer Extremstellen nicht erfasst werden, da die Steigung zwischen den Knoten dort kleiner als 0,1 rad ist.

Nach ENGEL & MATHES (2013) und VDI 3431 unterscheidet man zwischen Primärfalten und Sekundärfalten, siehe Abbildung 2.11 b). Sekundäre Falten treten im Bogenbereich des Profils auf. Sie können aufgrund einer zu geringen Spannkraft entstehen, sodass das Profil zwischen den Spannbacken durchrutscht. Zu kleine Dornglieder bedingen eine zu geringe Abstützung der Innenwand und können nach ENGEL & MATHES (2013) Sekundärfalten verursachen. Eine zu große Vorschubkraft am Biegeanfang kann ein Abheben des Profils von der Biegeform verursachen und ebenfalls zu Falten im Bogenbereich führen. Primäre Falten treten im geraden Bereich des Profils vor der Übergangsebene auf. Sie können durch eine zu geringe Gegenhalternormalkraft oder durch eine zu große Vorschubkraft entstehen. Weiterhin können eine ungeeignete Positionierung oder ein fortgeschrittener Verschleiß des Faltenglätters Primärfalten verursachen, siehe Abschnitt 4.3. Sowohl primäre Falten im geraden Profilbereich, als auch sekundäre Falten im Bereich des Bogens werden in dem Faltenbewertungsfaktor berücksichtigt.

### 2.1.5 Berechnungsgrundlagen und Prozessauslegung

Zur Auslegung des Rotationszugbiegeprozesses wird das erforderliche Biegemoment um die Biegeachse berechnet und daraus werden die benötigten Werkzeugkräfte nach HINKEL (2013) abgeleitet. Das ideale Biegemoment wird für die Umformung des Profils ungeachtet der Reibung benötigt. Zur Berechnung des ideellen Biegemomentes werden

die Spannungen und Dehnungen im Biegebogen benötigt und nach KHODAYARI (1994), ENGEL et al. (2008) und VDI 3430 näherungsweise für einen Rohrquerschnitt berechnet, vgl. Abbildung 2.12.

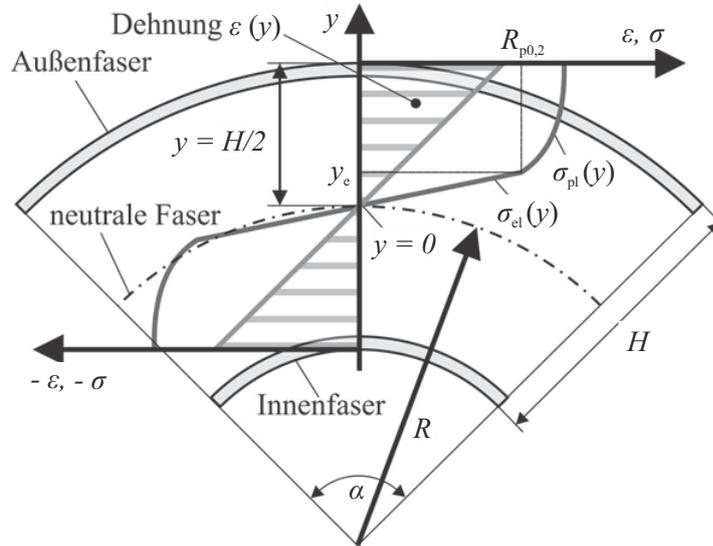


Abbildung 2.12: Darstellung der Spannungen und Dehnungen bei einem idealen Rohrbogen nach KERSTEN (2013).

Während der Dehnungsverlauf linear ist, gleicht der Spannungsverlauf dem eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms. Die Variable  $y_e$  stellt den Abstand zur spannungs- und dehnungsneutralen Faser dar, bis zu dem eine rein elastische Umformung eintritt. Bei Fasern außerhalb dieses Bereiches stellt sich eine plastische Umformung ein. Am Außenbogen liegen die größten Dehnungen in Längsrichtung vor. In der Realität stellt sich eine Ausdünnung der Wanddicke ein. Am Innenbogen treten in Umfangsrichtung Dehnungen mit positivem Vorzeichen auf. Beträgsmäßig größere Dehnungen mit negativem Vorzeichen entstehen in Längsrichtung. Die Wanddicke wird größer. Sowohl die spannungs- als auch die dehnungsneutrale Faser verlagern sich nach HASSAN (2017) aufgrund des Werkstoffflusses nach innen. Sie unterscheiden sich von der symmetrischen Rohrmittellinie. Abbildung 2.12 zeigt einen idealen Rohrbogen entsprechend der Annahmen für die im Folgenden beschriebenen Berechnungen.

Die Berechnungen der Spannungen und Dehnungen erfolgen vereinfacht entsprechend dem Formelwerk der VDI 3430 sowie nach KHODAYARI (1994) und ENGEL et al. (2008). Es werden ein linear elastisch-plastisches, homogenes und isotropes Werkstoffverhalten, sowie ein einachsiger Spannungszustand mit Spannungen angenommen, die ausschließlich in Profillängsrichtung wirken. Eine Verschiebung der spannungs- und der dehnungsneutralen Faser nach HASSAN (2017) wird vernachlässigt. Sie werden als Näherung mit der symmetrischen Rohrmittellinie gleichgesetzt. Die Verläufe im Zug- und Druckbereich sind daher betragsmäßig gleich mit umgekehrtem Vorzeichen, vgl. Abbildung 2.12. Die Definition der Dehnung nach Gleichung 2.6 wird auf die Bogengeometrie übertragen.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2.6)$$

Die Ausgangslänge  $l_0$  ist die Bogenlänge der dehnungsneutralen Faser und bildet das Produkt aus Biegeradius  $R$  und Biegewinkel  $\alpha$  im Bogenmaß.

$$l_0 = R \cdot \hat{\alpha} \quad (2.7)$$

Die Länge einer Faser ober- oder unterhalb der dehnungsneutralen Faser kann in Abhängigkeit von dem Abstand  $y$  wie folgt berechnet werden, wobei die Abstände oberhalb einen positiven und unterhalb einen negativen Betrag haben.

$$l_o = (R + y_{\text{rand}}) \cdot \hat{\alpha} \quad \text{und} \quad l_u = (R - y_{\text{rand}}) \cdot \hat{\alpha} \quad (2.8)$$

Zusammengeführt kann die Dehnung in der Faser nach Gleichung 2.9 in Abhängigkeit des Abstandes  $y$  und des Biegeradius  $R$  berechnet werden.

$$\varepsilon(y_{\text{rand}}) = \frac{y_{\text{rand}}}{R} \quad (2.9)$$

Der lineare Dehnungsverlauf ist in Abbildung 2.12 gezeigt. Am Außenbogen entspricht die Dehnung einer Streckung in Längsrichtung. Am Innenbogen nimmt die Dehnung negative Werte an und entspricht einer Stauchung in Längsrichtung. Nach diesem Modell sind Dehnung und Umformgrad unabhängig von dem Biegewinkel  $\alpha$ .

Zur Berechnung des Vergleichsumformgrades wird nach ENGEL et al. (2008) und HINKEL (2013) die Annahme getroffen, dass die Dehnung einaxial in Längsrichtung verläuft. Der Vergleichsumformgrad des Biegebauteils wird mit Gleichung 2.10 berechnet.

$$\varphi_V = \ln(\varepsilon + 1) = \ln\left(\frac{y}{R} + 1\right) \quad (2.10)$$

Die Berechnung der Spannungen beim Umformvorgang des elastisch-plastischen Biegens von Profilen erfolgt näherungsweise auf Basis der Berechnungen nach KHODAYARI (1994) und ENGEL et al. (2008). Dabei wird nur die in tangentialer Richtung wirkende Spannung berücksichtigt und kann nach Gleichung 2.11 entsprechend der Fließkurvenapproximation nach SWIFT (1952) berechnet werden.

$$\sigma(\varepsilon) = k_f = A_S \cdot [B_S + \ln(\varepsilon + 1)]^{C_S} \quad (2.11)$$

Abbildung 2.12 zeigt den Spannungsverlauf beim Biegen. Da der Werkstoff erst nach Überschreiten der Streckgrenze  $R_{p0,2}$  plastifiziert, wird zwischen elastischen und plastischen Spannungsanteilen unterschieden. Der elastische Spannungsanteil kann nach Gleichung 2.12 berechnet werden. Gleichung 2.12 gilt, wenn der Abstand  $y$  senkrecht zur spannungsneutralen Faser, kleiner ist als der Abstand  $y_e$  ab dem die Plastifizierung einsetzt.

$$\sigma_{\text{el}}(y) = E \cdot \frac{y}{R} \quad \text{für} \quad y \leq y_e = R_{p0,2} \cdot \frac{R}{E} \quad (2.12)$$

Der plastische Spannungsanteil kann nach Gleichung 2.13 berechnet werden.

$$\sigma_{\text{pl}}(y) = k_f = A_S \cdot [B_S + \ln\left(\frac{y}{R} + 1\right)]^{C_S} \quad \text{für} \quad y > y_e \quad (2.13)$$

### Biegemomentenberechnung eines Rohrbogens

Nach ZÜNKLER (1965), KHODAYARI (1994) und ENGEL et al. (2008) kann das ideale Biegemoment  $M_I$ , welches für die Umformung des Halbzeuges benötigt wird, nach Gleichung 2.14 mit einer Funktion der Spannung  $\sigma$  in Abhängigkeit der Fläche  $A_R$  berechnet werden.

$$M_I = \int_{A_R} \sigma(y) \cdot y \cdot dA_R \quad (2.14)$$

Aus Gleichung 2.10 und Gleichung 2.14 kann nach HINKEL (2013) das Biegemoment für ein Rundrohr nach Gleichung 2.15 unter folgenden Annahmen berechnet werden.

Da nach ENGEL et al. (2008) der elastische Biegemomentenanteil bei Biege Faktoren  $B < 2$  kleiner als 1% ist, wird in Gleichung 2.15 ausschließlich der plastische Biegemomentenanteil berechnet. Zur Abbildung des Werkstoffverhaltens wird die Fließkurvenapproximation nach SWIFT (1952) angewandt. Die Rohrquerschnittsfläche mit einem Innenradius  $r_I$  und einem Außenradius  $r_A$  wird in zwei Abschnitte  $0 \leq y \leq r_I$  und  $r_I \leq y \leq r_A$  und damit in zwei Integrale eingeteilt, vgl. Abbildung 2.13. Es wird angenommen, dass die Zugspannungen am Außenbogen betragsmäßig gleich den Druckspannungen am Innenbogen sind.

$$M_I = 4 \cdot \left[ \int_0^{r_I} A_S \cdot \left[ B_S + \ln\left(\frac{y}{R} + 1\right) \right]^{C_S} \cdot y \cdot \left( \sqrt{r_A^2 - y^2} - \sqrt{r_I^2 - y^2} \right) \cdot dy + \int_{r_I}^{r_A} A_S \cdot \left[ B_S + \ln\left(\frac{y}{R} + 1\right) \right]^{C_S} \cdot y \cdot \sqrt{r_A^2 - y^2} \cdot dy \right] \quad (2.15)$$

Der Gegenhalter muss die aus dem ideellen Biegemoment resultierende Kraft aufnehmen. Die dazu erforderliche Gegenhalternormalkraft kann nach HINKEL (2013) mittels Gleichung 2.16 näherungsweise berechnet werden. Der Kraftangriffspunkt wird nach ENGEL et al. (2008) bei einem Drittel der Gegenhalterlänge angenommen.

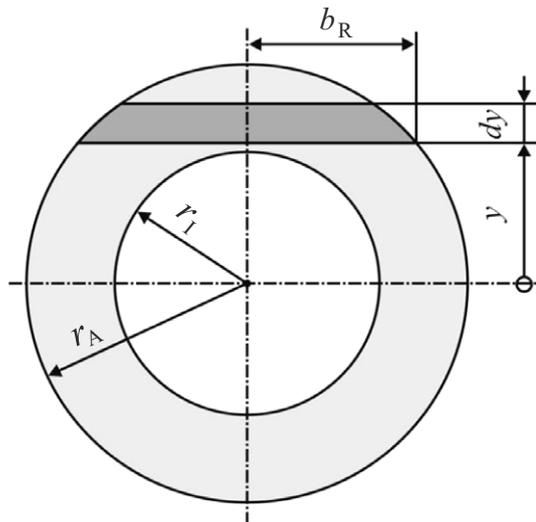


Abbildung 2.13: Geometrische Beschreibung eines Rohrquerschnittes nach HINKEL (2013).

$$F_{\text{GhN}} \geq F_1 \quad \text{mit} \quad F_1 = \frac{3 \cdot M_1}{L_{\text{Gh}}} \quad (2.16)$$

Liegt die Gegenhalternormalkraft über der Kraft  $F_1$ , resultierend aus dem ideellen Biegemoment, wird eine Kraft von dem Gegenhalter über das Rohr auf den Dorn und den Faltenglätter übertragen. Die Normalkräfte an dem Dorn  $F_{\text{DN}}$  und dem Faltenglätter  $F_{\text{FgN}}$  können nach Gleichung 2.17 berechnet werden.

$$F_{\text{DN}} = F_{\text{FgN}} = F_{\text{GhN}} - F_1 \quad (2.17)$$

Die nach Gleichung 2.17 berechnete Normalkraft erzeugt aufgrund der Reibung zwischen den Werkzeugen ein zusätzliches Biegemoment an der Biegeachse. Dieses prozessabhängige Biegemoment kann nach HINKEL (2013) aus den Biegemomentanteilen der Werkzeuge Gegenhalter, Dorn, Faltenglätter und Vorschub berechnet werden. Da es sich um halbschalenförmige Kontaktflächen zwischen den Werkzeugen handelt, müssen anstelle von Reibungskoeffizienten in praktischen Reibversuchen ermittelte Kraftübertragungsfaktoren eingesetzt werden. Die Hebelarme der Längskräfte ergeben sich aus der Position  $z$  des Linienschwerpunktes, berechnet mit dem Spannbackenradius  $R_s$ , siehe Abbildung 2.14.

Die Biegemomentanteile für den Gegenhalter  $M_{\text{Gh}}$ , den Faltenglätter  $M_{\text{Fg}}$ , die Vorschubeinheit  $M_{\text{V}}$  und den Dornschaft  $M_{\text{D}}$  können nach Gleichung 2.18 bis 2.21 berechnet werden. Die Gleichung 2.18 gilt für einen feststehenden Gegenhalter. Bei einem im Prozess nachschiebendem Gegenhalter kehrt sich das Vorzeichen der Längskraft  $F_{\text{Gh}}$  um. Wird der Gegenhalter im Prozess mitfahrend eingestellt, sodass keine Relativgeschwindigkeit zwischen dem Rohr und dem Gegenhalter besteht, kann der Anteil des Gegenhalterreibmomentes vernachlässigt werden. Der Biegemomentenanteil  $M_{\text{V}}$  ist bei nachschiebendem Vorschub negativ und bei ziehendem Vorschub positiv.

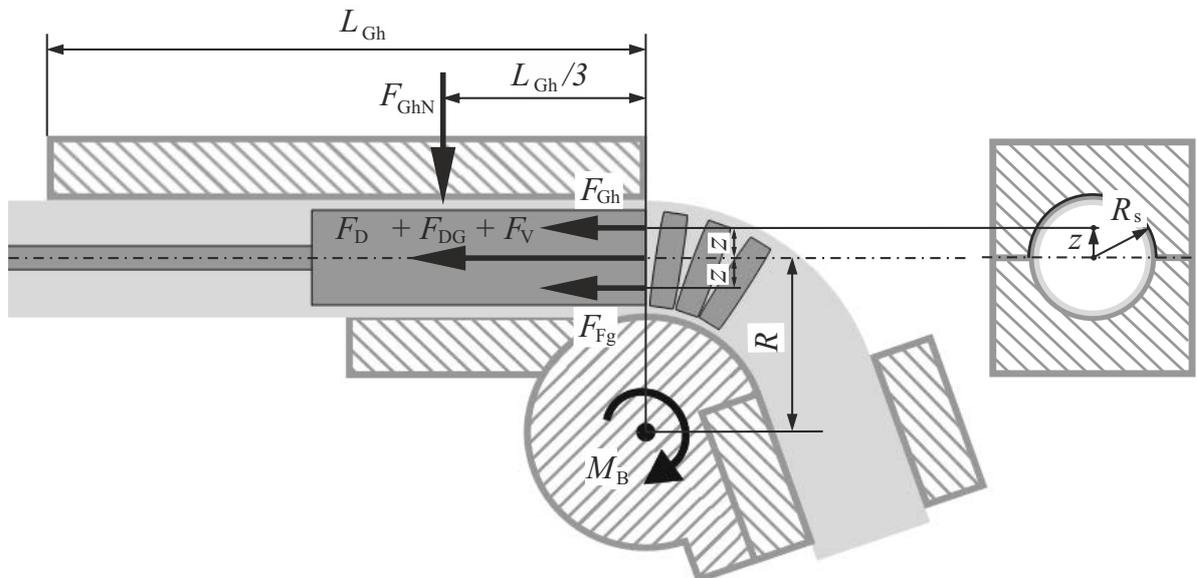


Abbildung 2.14: Durch Reibung erzeugte Längskräfte und Kraftangriffspunkte nach HINKEL (2013).

$$M_{\text{Gh}} = F_{\text{Gh}} \cdot (R + z) = \eta_{\text{Gh}} \cdot F_{\text{GhN}} \cdot (R + z) \quad (2.18)$$

$$M_{\text{Fg}} = F_{\text{Fg}} \cdot (R - z) = \eta_{\text{Fg}} \cdot F_{\text{FgN}} \cdot (R - z) \quad (2.19)$$

$$M_{\text{V}} = F_{\text{V}} \cdot R \quad (2.20)$$

$$M_{\text{D}} = F_{\text{D}} \cdot R = 2 \cdot \eta_{\text{D}} \cdot F_{\text{DN}} \cdot R \quad (2.21)$$

Beim Einsatz eines Gliederdorns befinden sich die Dornglieder im Bereich des Bogens. Die Längskraft, die von den Dorngliedern auf das Rohr übertragen wird, kann nach GROSS et al. (2008) anhand der Seilreibung nach EULER-EYTELWEIN berechnet werden und ist abhängig von dem Umschlingungswinkel der Dornglieder  $\hat{\alpha}_{\text{Umax}}$ , der Zugkraft an den Dorngliedern und dem Kraftübertragungsfaktor  $\eta_{\text{DG}}$ . Nach HINKEL (2013) resultiert die Zugkraft an den Dorngliedern aus den in Gleichung 2.18 bis 2.21 berechneten Biegemomentanteilen.

Die Längskraft der Dornglieder kann nach Gleichung 2.22 berechnet werden.

$$F_{\text{DG}} = 2 \cdot \frac{M_{\text{I}} + M_{\text{Gh}} + M_{\text{Fg}} + M_{\text{V}} + M_{\text{D}}}{R} \cdot (e^{(\eta_{\text{DG}} \cdot \hat{\alpha}_{\text{Umax}})} - 1) \quad (2.22)$$

$$\text{mit } \hat{\alpha}_{\text{Umax}} = \frac{L_{\text{DG}} \cdot n_{\text{DG}}}{R} \quad (2.23)$$

Mit der Länge des Hebelarms der Längskraft  $F_{\text{DG}}$  berechnet sich der Biegemomentanteil  $M_{\text{DG}}$  nach Gleichung 2.24.

$$M_{\text{DG}} = F_{\text{DG}} \cdot R = 2 \cdot (M_{\text{I}} + M_{\text{Gh}} + M_{\text{Fg}} + M_{\text{V}} + M_{\text{D}}) \cdot (e^{(\eta_{\text{DG}} \cdot \hat{\alpha}_{\text{Umax}})} - 1) \quad (2.24)$$

Das Gesamtbiegemoment für die Umformung eines rotationszuggebogenen Rundrohres kann nach HINKEL (2013) aus der Summe des ideellen Biegemomentes und der aus der Reibung resultierenden Biegemomentanteile nach Gleichung 2.25 berechnet werden.

$$M_{\text{B}} = M_{\text{I}} + M_{\text{Gh}} + M_{\text{Fg}} + M_{\text{V}} + M_{\text{D}} + M_{\text{DG}} \quad (2.25)$$

## Rückfederung und Eigenspannungen

Nachdem eine Biegung abgeschlossen ist, werden die Werkzeuge aufgeföhren und das Biegebauteil entlastet. Elastische Formänderungsanteile werden abgebaut. Der Biegeradius wird nach KERSTEN (2013) bei der Rückfederung des Biegebauteils größer und der Biegewinkel wird kleiner. Nach SPUR et al. (1983) und VDI 3430 überlagert sich bei Entlastung des Biegebauteils die elastische Rückfederungsspannung. Es wird angenommen, dass ein rein elastisches Rückstellmoment wirkt, das dem für die elastische Umformung benötigten Biegemoment entspricht. Nach BAUER & KHODAYARI (1992) kann der Rückfederungswinkel ab einem Biegewinkel von 7° linear approximiert werden. Der Rückfederungswinkel ist in diesem Bereich proportional zum Biegewinkel und kann näherungsweise mit Gleichung 2.26 berechnet werden. Nach der Rückfederung verbleibt eine Restspannung, die der Eigenspannung des Biegebauteils entspricht.

$$\alpha_{\text{R}} \approx 3 \cdot \frac{R_{\text{p0,2}}}{E} \cdot \frac{R}{H} \cdot \alpha \quad (2.26)$$

## 2.2 Analytische Betrachtungen und FE-Simulationen zur Faltenvorhersage

Die Faltenbildung ist eine Folge des Überschreitens einer kritischen Druckspannung. Eine mit Druck beaufschlagte Rohrwand erfährt zunächst eine Aufdickung und wird bei Erreichen einer kritischen Druckspannung nach HOFFMANN et al. (2012) und SCHAPITZ (1963) instabil. Diese Instabilität zeigt sich in Form einer Ausbeulung der Rohrwand. Beim Rotationszugbiegen wird die Faltenbildung daher von Druckspannungen am Innenbogen nach Aufdickung der Rohrwand verursacht. Bei kleinen Biegefaktoren und großen Wanddickenfaktoren liegt ein großes Faltenrisiko vor.

Nach DÜSING (1994) und SCHAPITZ (1963) wurde das Ausbeulverhalten von Kreiszyklinderschalen wissenschaftlich besonders im Bauwesen und im Flugzeugbau untersucht. Im Folgenden wird die Möglichkeit der Faltenvorhersage anhand der Beultheorie für Kreiszyklinderschalen nach SCHAPITZ (1963) beschrieben. Zudem wird der aktuelle Stand der Technik und Forschung zur Vorhersage von Falten mittels FE-Simulationen beschrieben.

### 2.2.1 Berechnung der bei Falteneintritt wirkenden kritischen Druckspannung

Nach SCHAPITZ (1963) gibt es für den einfachsten Fall des elastischen Stabilitätsproblems zwei Ansätze zur Berechnung der kritischen Druckspannung eines Rohres. Die kritische Druckspannung entspricht der maximalen Spannung, die in Längsrichtung auf ein Rohr wirken kann, ohne dass ein rotationssymmetrisches Ausbeulen und damit Faltenbildung eintritt. Gleichung 2.27 gilt für den rein elastischen Bereich der Umformung am Rohr. Sie kann nach SCHAPITZ (1963) sowohl über die Berechnung des Deformationsverhaltens des Rohres mittels einer Differentialgleichung zur Ermittlung der Längskraft als auch über den Energieansatz durch Betrachtung der Energieänderung aufgrund der Umformung hergeleitet werden. Da in praktischen Versuchen niedrigere kritische Druckspannungen erreicht wurden, wird von SEIDE et al. (1960) der Korrekturfaktor  $k_R$  empfohlen. Die kritische Druckspannung, ab der theoretisch ein Ausbeulen der Rohrwand ausgelöst wird, ist nach Gleichung 2.27 abhängig von dem Wanddickenfaktor und dem Elastizitätsmodul.

$$\sigma_{\text{Schapitz,el}} = \frac{k_R \cdot 2}{W} \cdot E \leq R_{p0,2} \quad (2.27)$$

$$\text{mit } k_R = 0,605 \cdot [1 - 0,902 \cdot (1 - e^{-\frac{1}{16}\sqrt{\frac{W}{2}}})] \quad (2.28)$$

Die Länge der Probe  $L$  darf eine Mindestlänge nicht unterschreiten, da sich nur dann nach KROMM (1942) genügend Wellen in Längsrichtung ausbreiten können. Gleichung 2.29 zeigt das zu erfüllende Kriterium für die Rohrgeometrie bzgl. der Formziffer  $\omega$  [-].

$$\omega = \frac{12 \cdot (1 - \nu^2)}{\pi^4} \cdot \frac{L^4}{r^2 \cdot s^2} \geq 1 \quad (2.29)$$

Mit dem Außenradius  $r$  und der Wanddicke  $s$  der Probe kann die Mindestlänge für Metalle mit einer Querkontraktionszahl von  $\nu = 0,3$  näherungsweise berechnet werden.

$$L \geq 1,7282 \cdot \sqrt{s \cdot r} \quad (2.30)$$

Gleichung 2.31 gilt für den elastisch-plastischen Bereich und wurde von SCHAPITZ (1963) als Erweiterung der Gleichung 2.27 aufgestellt. Das plastische Verformungsverhalten des Werkstoffs wird durch den Faktor  $\eta$  nach GERARD (1956) und mittels einer linearen Approximation der Fließkurve anhand des Sekanten- und Tangentenmoduls beschrieben.

$$\sigma_{\text{Schapitz,el/pl}} = \frac{k_R \cdot 2}{W} \cdot \eta \cdot E \quad (2.31)$$

$$\text{mit } \eta = \frac{\sqrt{E_S \cdot T}}{E} \quad (2.32)$$

Die Gerade zwischen Nullpunkt und erreichter Umformung in einem Spannungs-Dehnungsdiagramm wird durch den Sekantenmodul  $E_S$  nach Gleichung 2.33 beschrieben. Bei der größten Umformung erreicht die Spannung das Fließkurvenmaximum  $k_{f,max}$  und die Dehnung  $\varepsilon_{max}$ .

$$E_S = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.33)$$

Wird der plastische Umformbereich linear approximiert, bildet der Tangentenmodul die Steigung der Fließkurve nach Gleichung 2.34 und Abbildung 2.15. Die Gleichmaßdehnung  $\varepsilon_{gl}$  ist nach DIN EN ISO 6892-1 die plastische Dehnung bei Kraftmaximum und wird aus der Differenz der Dehnung bei Kraftmaximum  $\varepsilon_{max}$  und dem elastischen Anteil  $\varepsilon_{el}$  berechnet. Der Tangentenmodul ist von der Streckgrenze  $R_{p0,2}$ , der Zugfestigkeit  $R_m$  und der Dehnung  $\varepsilon_{max}$  abhängig.

$$T = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{(1 + \varepsilon_{max}) \cdot R_m - R_{p0,2}}{\varepsilon_{max} - \frac{R_{p0,2}}{E}} \quad (2.34)$$

Die maximale Fließspannung  $k_{f,max}$  kann nach Gleichung 2.35 berechnet werden.

$$k_{f,max} = R_{p0,2} + \left(\varepsilon_{max} - \frac{R_{p0,2}}{E}\right) \cdot T \quad (2.35)$$

Da durch den Korrekturfaktor  $\eta$  die Druckspannungen stark herabgesenkt werden, wird eine weitere Anpassung der Schapitz-Gleichung für den unelastischen (TETMAJER-) Bereich vorgeschlagen. Der Elastizitätsmodul und der Faktor  $\eta$  werden dabei durch den Knickmodul  $T_K$  ersetzt und die Druckspannungswerte bzgl. des plastischen Ausbeulens weniger stark reduziert, vgl. SCHULTE & MATHES (2018). Man unterscheidet die Hinzunahme oder das Entfallen des Korrekturfaktors  $k_R$ , siehe Gleichung 2.36 und 2.37.

$$\sigma_{\text{Schapitz-Tet.}} = \frac{2}{W} \cdot T_K \quad (2.36)$$

$$\sigma_{\text{kor.Schapitz-Tet.}} = \frac{k_R \cdot 2}{W} \cdot T_K \quad (2.37)$$

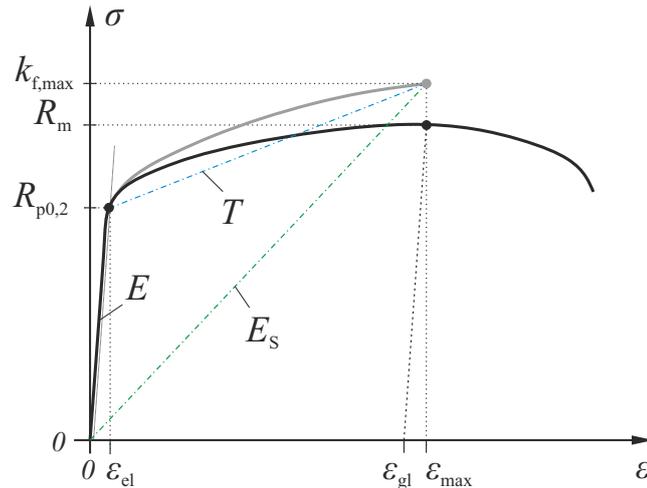


Abbildung 2.15: Schematische Darstellung eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms mit Elastizitäts- ( $E$ ), Sekanten- ( $E_s$ ) und Tangentenmodul ( $T$ ) sowie der elastischen Dehnung  $\epsilon_{el}$ , der plastischen Dehnung (Gleichmaßdehnung)  $\epsilon_{gl}$  und der Dehnung im Kraftmaximum  $\epsilon_{max}$ .

Der Knickmodul setzt sich nach GROTE et al. (2014), wie folgt, aus dem Elastizitätsmodul und dem Tangentenmodul zusammen.

$$T_K = \frac{4 \cdot T \cdot E}{(\sqrt{T} + \sqrt{E})^2} \quad (2.38)$$

Nach SCHAPITZ (1963) ist bei der beschriebenen Berechnung der beulkritischen Druckspannung zu beachten, dass es sich um Näherungsrechnungen unter Annahme idealer Randbedingungen handelt. Die analytische Bestimmung des Falteneintritts ist ohne empirische Ermittlung von punktuell gültigen Korrekturfaktoren noch nicht möglich. Praktische Versuche zur Validierung der existierenden Berechnungsformeln streuen nach SCHAPITZ (1963) und DÜSING (1994) sehr stark, da schon die geringste Vorbeule ausreicht, um das Rohr aus dem „vorkritischen Zustand in den ausgebeulten Zustand“ zu überführen. FE-Simulationen machen eine erste Abschätzung der Faltenbildung möglich.

### 2.2.2 FE-Simulationen zur Faltenvorhersage bei der Umformung von Rohren

Um die Falten vorhersagen zu können, entwickelten LIU et al. (2015) ein FE-Modell für das Biegen dünnwandiger Rohre. Hierbei werden bewusst Inhomogenitäten im Werkstück simuliert. Die Simulationsergebnisse bezüglich der Faltenbildung sind sensitiv gegenüber diesen Eingaben. Um die Wahrscheinlichkeit einer Faltenbildung zu berechnen, untersuchten ZHANG et al. (2011) Titanrohre (CP-Ti) mit großen Durchmessern und kleinen Wandstärken. NAN et al. (2015) nutzen eine Kombination aus der expliziten Finite-Elemente-Methode (FE-Methode), anfänglichen Inhomogenitäten und der Energieerhaltung. LI et al. (2019) konstruierten ein Vorhersagekonzept für die Faltenbildung

beim Rotationszugbiegen von Titan- und Aluminiumrohren. Sie führten geometrische Mikroimperfektionen und anisotrope/asymmetrische Eigenschaften ein und nutzten einen expliziten FE-Algorithmus. Eine stark vereinfachte Bestimmung der Wahrscheinlichkeit der Faltenbildung liefert STRANO (2005), der eine Software zur schnelleren Auslegung von Biegeprozessen entwickelt hat. Der Einfluss von Parametervariationen beim Biegen von Rohren mit Außendurchmessern von 20 mm aus den Werkstoffen 1Cr18Ni9Ti (AISI 304) und 5A06 (Aluminium) wurde von CHEN et al. (2013) in FE-Simulationen untersucht. Zu den Ergebnissen gehört, dass der Abstand zwischen Gegenhalter und Rohr nicht größer als 0,2 mm gewählt werden sollte. Die Faltenbildung steigt mit der Geschwindigkeit der Transporteinheit und sinkt mit steigendem Biegefaktor. Die Verringerung des Materialnachschiebs durch den Transport verringert die maximale Faltenhöhe. LIEWALD et al. (2011) entwickeln eine Methode zur automatisierten Erkennung von Seitenwandfalten mittels Finite-Elemente-Analyse an tiefgezogenen Karosserieteilen. Die genannten Untersuchungen bilden die Realität näherungsweise ab und zeigen, dass Schwankungen, denen ein Umformprozess unterworfen ist, einen negativen Einfluss auf die Qualität des Bauteils haben. Sowohl geometrische als auch werkstoffliche Imperfektionen sowie die Krafteinleitung beeinflussen nach HOFFMANN et al. (2012) und SCHAPITZ (1963) ganz wesentlich die Umformung und das Versagensverhalten.

Die Abweichungen der Faltenergebnisse von FE-Simulationen resultieren u.a. aus der Modellierung idealer Werkzeuggeometrien, welche die realen Kontaktbedingungen nicht abbilden. Zur Untersuchung der Faltenausprägungen unabhängig von Werkzeugkontakten wurden am Lehrstuhl FE-Simulationen in Form von Stauchversuchen durchgeführt, vgl. Abbildung 2.16.

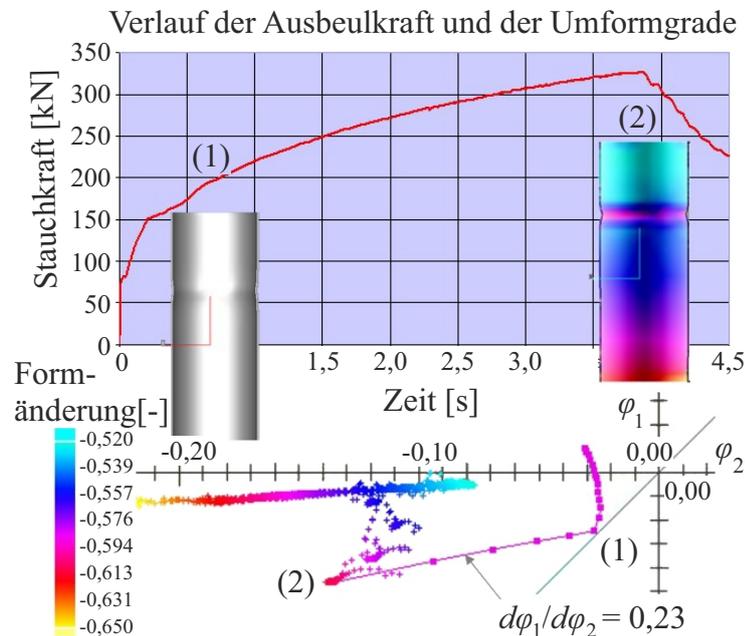


Abbildung 2.16: Zwei Stadien des Ausbeulverhaltens eines Rohres unter Druckspannung - (1) Stadium der Aufdickung, (2) Stadium der Ausbeulung.

Bei den FE-Simulationen lassen sich zwei Stadien der Faltenentstehung am Rohr feststellen. Der Hauptumformgrad  $\varphi_1$  (Formänderung in Umfangsrichtung) und der Nebenumformgrad  $\varphi_2$  (Formänderung in Längsrichtung) steigen in Stadium 1 annähernd linear bei steigender Druckkraft im Rohr an. Die Wanddicke des Rohres nimmt zu. Wird das zweite Stadium erreicht, kommt es zur Ausbeulung des Rohres und die Druckkraft auf das Rohr nimmt ab. Die Faltenbildung am Rohr lässt sich daher in das Stadium der Aufdickung und das Stadium der Ausbeulung einteilen.

Die Faltenbildung beim Rotationszugbiegen wird durch Druckspannungen am Innenbogen erst nach Aufdickung der Rohrwand verursacht. Die Grenze zwischen Aufdickung und Ausbeulung der Rohrwand hängt nach HOFFMANN et al. (2012), SCHAPITZ (1963) und BORCHMANN et al. (2020-2) von Einflussgrößen wie Gefügeinhomogenitäten, Verfestigungsprozessen, Steifigkeiten, Reibungsänderungen und Wanddickenänderungen ab. Da keine ausreichenden Kenntnisse über den Größenverlauf und den Einfluss dieser Variablen vorliegen, weichen die Berechnungsergebnisse für die Faltenbildung von praktischen Versuchen ab. Die präzise Vorhersage der auftretenden Faltenbildung ist nach LI et al. (2019) eine der grundlegendsten und schwierigsten Fragen, um eine fehlerfreie Umformung zu gewährleisten.

## 2.3 Faltenmessung in der Umformtechnik

Falten werden an umgeformten Bauteilen vermessen, um sie quantifizieren und die Bauteile vergleichen zu können. In der Umformtechnik gibt es verschiedene Messsysteme, die die Falten bzw. eine Materialflussänderung während des Prozesses direkt oder indirekt messen. Während des Rotationsbiegeprozesses können nach SIMONETTO et al. (2017) Gyroskopsensoren genutzt werden, deren Messdaten ein Indikator für die Ausprägung von Falten sein können, siehe Abbildung 2.17.

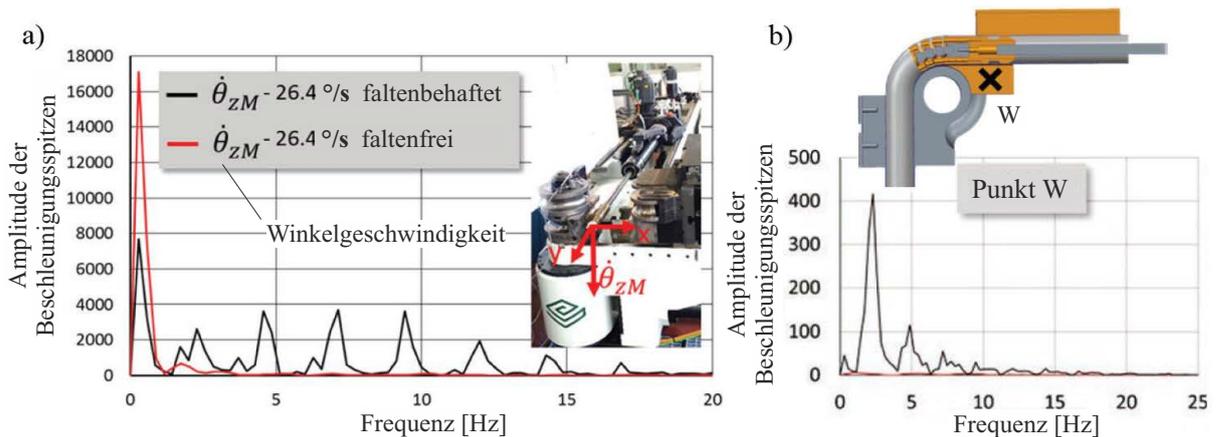


Abbildung 2.17: Frequenzspektrum der Winkelgeschwindigkeit a) am Dorn und b) am Faltenglätter eines faltenfreien (rote Markierung) und eines faltenbehafteten (schwarze Markierung) Rohrbogens nach SIMONETTO et al. (2017).

Durch die Auswertung der Frequenzen, welche aus den Messdaten ermittelt wurden, können Falten identifiziert werden. In der Untersuchung stellte sich heraus, dass der Biegedorn auf Falten besonders empfindlich reagiert. Dieses Ergebnis wird in Abbildung 2.17 a) dargestellt. Jedem Frequenzpeak kann eine Falte zugeordnet werden. Die Frequenzen am Faltenglätter lassen auch auf die Faltenbildung am gefertigten Rohrbogen schließen, aber die Ausschläge sind schwächer als die des Biegedorns, vgl. Abbildung 2.17 b). Eigene Rotationszugbiegeversuche mit dem Einsatz von Beschleunigungssensoren (Modell-Nr. 356A16) der Firma PCB PIEZOTRONICS EUROPE, Hückelhoven führten nicht zu faltensignifikanten Messverläufen, siehe Anhang A.5. Die Sensoren waren an der Faltenglätteraufnahme befestigt. Die Vermutung liegt nah, dass die Schwingungsänderungen, hervorgerufen durch die Falten, zu klein waren, um mit den Beschleunigungssensoren dargestellt zu werden. Die Vibrationen der hydraulischen Biegemaschine dominierten. Trotz Filter unterschiedlicher Frequenzen waren keine faltensignifikanten Verlaufsänderungen erkennbar.

Beim Tiefziehen werden ebenfalls Messgrößen während des Umformprozesses aufgezeichnet, wie z. B. die optische Messung des Materialflusses nach MÜLLER et al. (2018). Über den Stofffluss können Rückschlüsse auf Risse und Falten gezogen werden. LIEWALD et al. (2015) führen Faltenanalysen für den Tiefziehprozess durch und ermöglichen es mit Hilfe neuer Faltenrenzkurven, das Auftreten von Falten in jedem Bereich des geformten Blechteils bis hin zur endgültigen Faltenbildung zu erkennen. GRIESBACH (2000) nutzt eine direkte Messung der Materialbewegung beim Tiefziehen mittels Rollenkugelsensoren. Dabei werden die Stoffflussrichtung, die Stoffflussgeschwindigkeit und die vom Material zurückgelegte Strecke aufgezeichnet. Die In-situ-Stoffflussmessung wird zur Analyse und Führung der Tiefziehvorgänge genutzt. FISCHER et al. (2018) untersuchen den Ansatz, die Messung möglicher Einflussfaktoren, wie z.B. die chargenweise Variation der Materialeigenschaften, mit einer Regelung zu vereinen, um die nicht messbaren Einflüsse zu eliminieren. Die Messung der Materialeigenschaften in praktischen Versuchen erfolgt mit einem auf Wirbelströmen basierenden Messsystem, während die für eine rückgekoppelte Regelung erforderliche Messung mit einem optischen System erfolgt.

ALBERT & BIEHL (2009) zeigen einen Anwendungsfall der Dünnschichtsensorik beim Tiefziehen. Dabei wird die 6  $\mu\text{m}$  dicke piezoresistive Schicht mit einem coulombschen Reibbeiwert von 0,2 und einer Härte im Bereich von 20 GPa bis 40 GPa auf das polierte Werkzeug aufgebracht. Es steht in direktem Kontakt mit dem umzuformenden Werkstück, daher wird eine Verschleißschicht (Dicke 3  $\mu\text{m}$ ) aufgebracht. Die Dünnschichtsensoren finden nach ALBERT & BIEHL (2009) auch Anwendung beim Innenhochdruckumformen zur Vermeidung der Faltenbildung.

## 2.4 Prozessregelung in der Umformtechnik

Bei umformtechnischen Produkten können nach TEKKAYA et al. (2015) neben der Herstellung von Produktgeometrien auch mechanische und physikalische Eigenschaften eingestellt werden. Nach ALLWOOD et al. (2016) können Verschlechterungen der Produkteigenschaften

genschaften, ausgelöst von Parametervariationen und unvollständigem Prozessverständnis, durch den Einsatz von Regelkreisen reduziert werden.

Eine Regelung beim Innenhochdruckumformen und dem Tiefziehen beschreiben ALBERT & BIEHL (2009). Hierzu werden Dünnschichtsensoren in das Umformwerkzeug integriert, welche die Änderung des elektrischen Widerstands und damit den Verlauf des Kontaktdrucks erfassen. Der Prozess soll online überwacht und geregelt werden. Über die geregelte Prozessführung lassen sich schwankende Prozessparameter ausgleichen und Ausschussteile reduzieren. Dies ermöglicht eine wirtschaftliche Herstellung komplexer Bauteilgeometrien. BLAICH (2012) nutzt neuartige Sensoren zur Zargenspannungsmessung beim Tiefziehen, um lokale Effekte der abschnittsweise wirkenden Rückhaltekräfte auf die örtliche Bauteilqualität herauszuarbeiten. Das Rückhaltesystem kann damit insbesondere in geeignete Flanschabschnitte zur gezielten Beeinflussung der örtlichen Bauteilqualität und zur Optimierung der darin wirkenden Rückhaltekräfte unterteilt werden. BEHRENS et al. (2005) erstellen einen Regelkreis zur Steuerung des Werkstoffflusses, bestehend aus einem optischen Sensor, einem Tiefziehwerkzeug mit elastischem Niederhalter, einem Fuzzy-Regler und einer Tiefziehpresse mit Mehrpunktziehkissen. Der fuzzygesteuerte Werkstofffluss wirkt dabei wirkungsvoll durch Änderung der Niederhalterkraft den Störungen entgegen.

Eine prozesssichere Parametereinstellung bei unterschiedlichen Werkzeugkonturen des Innenhochdruckumformens entwickelt ENGEL (1995). Er stellt dazu eine Prozessregelung mit Hilfe der Fuzzy-Logik auf. Die Fuzzy-Regelung hat dabei den Vorteil, einen Regler unverändert an unterschiedlichen Werkzeugen, bei unterschiedlichen Reibbedingungen und unterschiedlichen Halbzeugen erfolgreich einzusetzen. MAIER (2017) untersucht neue Konzepte zur Inline-Prozessüberwachung innerhalb von Nachfolgewerkzeugen in einem Presswerk. Das Messsystem muss dabei zugänglich, robust und wartungsarm sein.

Die Regelung des Werkstoffflusses bei Blechumformprozessen zur Verbesserung der Produktqualität wird von MERKLEIN et al. (2018) und LÖFFLER et al. (2019) untersucht. Dabei wird herausgestellt, dass lokale Anpassungen der tribologischen Bedingungen den größten Einfluss auf den Werkstofffluss und damit auf die geometrische Genauigkeit der gefertigten Bauteile haben. HAGENAH et al. (2010) entwickeln eine Prozessregelung auf Basis eines künstlichen neuronalen Netzes, welches die zum Anlernen erforderlichen Informationen aus FE-Simulationen erhält. Nach der Anlernphase zeichnet sich die Prozessregelung durch ihre schnelle Reaktion aus, da die zeitintensiven FE-Simulationen vom Regelvorgang entkoppelt werden. HARTMANN et al. (2018) messen im Rahmen der Massivumformung Kontrollpunkte zwischen Matrize und Werkstück, um die Matrize direkt an die gewünschte Teileform anpassen zu können. Daraus wird eine datengesteuerte Strategie zum Ausgleich deterministischer Abweichungen abgeleitet. HARTMANN et al. (2019) entwickeln ein Konzept zur Ableitung von Werkzeugwegen für die Herstellung von Blechteilen aus einem digitalen Komponentenmodell unter Verwendung von künstlichen neuronalen Netzwerken. Damit soll eine automatisierte Teilefertigung in der inkrementellen Blechfreiformanwendung ermöglicht werden. HANSEN et al. (2019) liefern die Grundlagen einer Prozessregelung für die Serienproduktion von Karosseriebauteilen. Genutzt wird ein kamerabasiertes System zur Messung des Werkstoffflusses sowie der Zusammenhang zwischen

den Messwerten und unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften und Prozessparametern. BUSE (2017) untersucht die Schallemissionsanalyse zur Online-Prozessüberwachung von Umformprozessen, um das Bauteilversagen aufgrund von Rissbildung direkt während der Umformung detektieren zu können. BÄCKER et al. (2015) nutzt einen Optimierungsansatz mittels *COBYLA-Algorithmus* (Constrained Optimization By Linear Approximations), um eine Prozessregelung bei der Stegblechumformung zu realisieren. Der Innendruck und die Blechhaltekraft sind dabei die steuerbaren Parameter. Hiermit sollen das Knicken der Stege und Reißen im Bereich der Stegenden verhindert werden.

VOLK et al. (2019) beschreibt die Kontrolle von Eigenspannungen, um Bauteileigenschaften zu beeinflussen. Geplant ist, die Eigenspannungen des Bauteils in verschiedenen Herstellungsverfahren bewusst einzustellen, um die Qualität des Endbauteils zu verbessern. DOEGE & MENZ (2000) entwickeln eine Richtmaschinenregelung für die Blechumformung. Mit Hilfe eines analytischen Umformmodells werden die Eigenspannungen und die Eigenbiegung des Bleches berechnet, sodass eine automatische Einstellung der Rollen realisiert wird.

STAHL (2002) nutzt die Methode der künstlichen neuronalen Netze, um den Biegeprozess beim Rundbiegen von Rohren zu verbessern. Die Rückfederung kann während des Biegens berechnet und die Ovalisierung bereits vor der Biegung kalkuliert werden. Die aus praktischen Biegeversuchen ermittelten Messwerte dienen als Eingabe zum Anlernen des Systems. Von großer Bedeutung ist es, die signifikanten Merkmale herauszustellen, um die größtmögliche Prognosegüte zu erhalten. KHODAYARI (1994) erweitert das Rundbiegen ohne Dorn um eine automatische Kompensation der Rückfederung. Er nutzt die Biegebalkentheorie sowie eine Kraft- und Momentenmessung, um das Maß der Rückfederung prozessbegleitend zu berechnen und zu kompensieren. SELVAGGIO et al. (2009) kompensieren Schwankungen der Profileigenschaften und des Profilquerschnitts beim Dreiwalzenbiegen durch eine Prozessregelung mittels eines Neuro-Fuzzy-Systems.

GRÜBER & HIRT (2016) entwickeln eine Prozessregelung für den Walzenrichtprozess und nutzen FE-Simulationen zur Definition von Regelkurven, die einen Zusammenhang zwischen Messgröße und Walzenzustellung herstellen. JENKOUK et al. (2012) erarbeiten einen neuen Simulationsansatz für das Ringwalzen, bei dem Sensorwerte aus der Maschinensteuerung in die FE-Simulation in Echtzeit eingelesen werden, sodass sich in situ verändernde Werkzeugkräfte und Achsenwege in der Simulation anpassen. Dies führt zu realitätsnahen Ergebnissen.

Die Prozessregelungen wurden auf ihre Einsetzbarkeit zur Verhinderung von Falten beim Rotationszugbiegen geprüft. Beispielsweise stellt KHODAYARI (1994) eine Berechnung der Rückfederung aus einer prozessbegleitenden Kraft- und Momentenmessung auf, während für die Faltenbildung kein geeigneter theoretischer Ansatz existiert, s. Abschnitt 2.2. STAHL (2002) nutzt künstliche neuronale Netze, in die kein Erfahrungswissen und vorhandenes Prozessverständnis als Regelbasis einfließen. Nach einem Vergleich der Prozessregelungen wird die Fuzzy-Regelung zur Verhinderung von Falten beim Rotationszugbiegen ausgewählt.

## 2.5 Fuzzy-Regelung

Die *Computational Intelligence* (Rechnerunterstützte Intelligenz) als Gebiet der Künstlichen Intelligenz basiert u.a. auf Algorithmen der Fuzzy-Logik. Eine Regelung mittels Fuzzy-Logik verarbeitet nach ENGEL (1995) unscharfe Größen, die im Umformprozess gemessen werden. Von außen betrachtet weist der Regler dabei keine „Unschärfe“ auf. Die für Fuzzy-Systeme inhärente Unschärfe tritt lediglich bei der Zuordnung der Eingangsgrößen zu den unscharfen Mengen auf.

Auf Regelwerken basierende Expertensysteme lassen sich durch Fuzzy-Regelungen in automatisierte Systeme einbinden. Komplexe Regler können nach VDI 3550-2 aufgrund der großen Flexibilität konzipiert werden. Auch nichtlineare Regler sind nach KRUSE et al. (2015) in Form von Fuzzy-Reglern umsetzbar.

In der Umformtechnik löst die Veränderung von Werkzeugkräften und Achsenwegen nach LI et al. (2019) eine nichtlineare Änderung des Werkstoffflusses im Biegebauteil aus. Hier ist die klassische Mengenlehre laut KRUSE et al. (2015) nicht anwendbar. Der Aufwand, ein nichtlineares Regelungsproblem zu lösen, kann nach LEE & KOPP (2001) mit Hilfe der Fuzzy-Logik deutlich reduziert werden. Nach ALLWOOD et al. (2016) und MELZER et al. (2015) gibt es eine weit verbreitete Verwendung statistischer Modelle, bspw. Fuzzy-Controller oder genetischer Algorithmen (Optimierungs-Algorithmen), um die nichtlineare Variation von Arbeitspunkten zu erfassen.

ALEYASIN (2017) befasst sich mit der Entwicklung einer Kombination aus Fuzzy-Inferenz-Systemen und neuronalen Netzen, die als adaptives Netzwerk-Fuzzy-Inferenzsystem (ANFIS) bezeichnet wird, um Grenzformänderungsdiagramme zu bestimmen. Die Wissensdatenbank wird aus praktischen Versuchsergebnissen und Ergebnissen von Finite-Elemente-Simulationen gewonnen. LI et al. (2007) verwenden einen adaptiven Simulationsansatz mit einem Fuzzy-Logik-Regelalgorithmus zur Ermittlung eines geeigneten Belastungspfad beim Innenhochdruckumformen. NA et al. (2006) schätzen das Einfallmoment bei Rohrbögen aufgrund von Wandverdünnungsfehlern durch eine Fuzzy-Modellidentifikation ab. Ein subtraktives Clustering-Verfahren wird als Grundlage für einen schnellen und robusten Algorithmus zur Identifizierung des Fuzzy-Modells verwendet. Das Fuzzy-Modell wird mit Hilfe eines vorbereiteten Datensatzes trainiert und mit Hilfe eines anderen Datensatzes verifiziert. BEHRENS et al. (2005) entwickeln ein Konzept für eine Regelung des Materialflusses im Tiefziehprozess auf der Basis eines Fuzzy-Reglers. Der Tiefziehprozess wird durch verschiedene Größen wie chargenabhängige Materialwerte, Maschinenparameter sowie Schwankungen der Umformwerkzeuge beeinflusst. Durch eine kontinuierliche Prozessüberwachung und Prozessregelung kann die Prozessstabilität verbessert werden. RAY et al. (2004) beschreiben die Optimierung des Umform-Lastpfades eines Rohr-Hydroforming-Prozesses unter Verwendung eines Fuzzy-Logik-Regelalgorithmus, der das Versagen des Rohres aufgrund zu hoher induzierter Dehnungen während des Umformprozesses vermeidet. Nach KAHLERT (1994) wird bei der Erstellung eines Fuzzy-Regelungssystems in folgenden Schritten vorgegangen. Es erfolgt die Wahl der Messgrößen und daraus abgeleitete Größen, wie z.B. Ableitungen oder Änderungen, als Eingangsgrößen sowie die Stellgröße als Ausgangsgröße. Anschließend werden die Wertebereiche der Ein- und Ausgangsgrößen

festgelegt und die Zugehörigkeitsfunktionen definiert. Es folgt das Aufstellen der Regelbasis, das Erzeugen einer „scharfen“ Ausgangsgröße sowie das Testen des Regelkreises mit iterativer Anpassung.

### 2.5.1 Fuzzy-Mengen und Fuzzy-Logik

In der Mengenlehre gibt es eine scharfe, zweiwertige Zuordnung von Elementen zu einer Menge. Im Gegensatz dazu kann die Zugehörigkeit von Elementen zu einer Fuzzy-Menge graduell sein. Einheitsintervalle vom Wert 0 bis zum Wert 1 drücken die Zugehörigkeit aus. Jedem Element wird nach KRUSE et al. (2015) ein Wert aus dem Einheitsintervall zugeordnet. Die Betrachtung als Fuzzy-Menge erlaubt einen Toleranzbereich im Vergleich zur klassischen Mengenlehre. Im Folgenden werden die Fuzzy-Mengen nach KRUSE et al. (2015), SCHULZ & GRAF (2013) sowie THOMAS (2009) beschrieben.

#### Zugehörigkeitsfunktionen

Die Zugehörigkeitsfunktion  $\mu(x)$  ordnet dem Element  $x$  einen Zugehörigkeitsgrad einer Fuzzy-Menge  $\mu$  zu. Eine Fuzzy-Menge  $\mu$  besteht aus Elementen mit ihren entsprechenden Zugehörigkeitsgraden, sodass Gleichung 2.39 gilt.

$$\mu = \{(x_1, \mu(x_1)), \dots, (x_i, \mu(x_i)), \dots, (x_n, \mu(x_n))\} \quad (2.39)$$

Der Betrag des Zugehörigkeitsgrades ergibt sich aus der Zugehörigkeitsfunktion durch Einsetzen eines Elements  $x$ . Der Zugehörigkeitsgrad unterscheidet sich dabei von der Wahrscheinlichkeitstheorie. Die Wahrscheinlichkeitstheorie behandelt die Unsicherheit, ob ein Ereignis eintritt. Die Fuzzy-Menge liefert eine Aussage darüber, inwiefern eine Eigenschaft vorhanden ist.

Fuzzy-Mengen werden unscharf modelliert, wie z.B. „ungefähr 8“ oder „sehr schnell“. Sie sollten konvex sein. Die Menge sollte bis zu einem bestimmten Wert monoton steigen und ab diesem Wert monoton fallen. Die Dreiecks- und die Trapezfunktion werden nach KRUSE et al. (2015) aufgrund ihrer einfachen mathematischen Beschreibung bevorzugt als Zugehörigkeitsfunktionen verwendet. Die Dreiecksfunktion wird durch die Werte nach Gleichung 2.40 und Abbildung 2.18 berechnet. Die Trapezfunktion wird mit Gleichung 2.41 beschrieben. Als glatte Funktion kann die Glockenfunktion verwendet werden, die durch den Median charakterisiert ist.

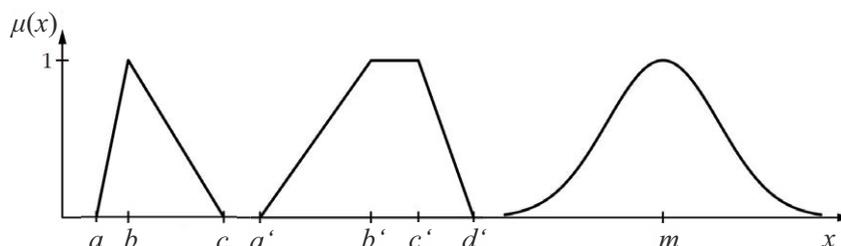


Abbildung 2.18: Dreiecksfunktion (links), Trapezfunktion (mittig) und Glockenkurve (rechts), die nach KRUSE et al. (2015) als Fuzzy-Mengen verwendet werden können.

$$\mu_{\Lambda}(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & \text{falls } a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{falls } b \leq x \leq c \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.40)$$

$$\mu_{\Pi}(x) = \begin{cases} \frac{x-a'}{b'-a'}, & \text{falls } a' \leq x \leq b' \\ 1, & \text{falls } b' \leq x \leq c' \\ \frac{d'-x}{d'-c'}, & \text{falls } c' \leq x \leq d' \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.41)$$

### Operationen für Fuzzy-Mengen

Die Operatoren der Schnittmenge, der Vereinigungsmenge und der Komplementärmenge sind aus der Mengenlehre bekannt. Nach SCHULZ & GRAF (2013) lassen sich die Operationen auch auf Fuzzy-Mengen anwenden, um die Zugehörigkeitsfunktionen zu verknüpfen. Zwei Fuzzy-Mengen  $A$  und  $C$  gehören zur Grundmenge  $G$ . Die Zugehörigkeitsfunktion für  $A$  ist definiert als  $\mu_A(x)$  und für  $C$  als  $\mu_C(x)$ . Die Schnittmenge von  $A$  und  $C$  lautet nach Gleichung 2.42:

$$A \cap C = \{x, \mu_{A \cap C}(x) \mid x \in G\} \quad (2.42)$$

$\mu_{A \cap C}$  ist die Zugehörigkeitsfunktion der Schnittmenge und resultiert nach Gleichung 2.43 aus der Verknüpfung der Zugehörigkeitsfunktionen der Einzelmengen mittels des Minimum-Operators (MIN-Operator). Der MIN-Operator bezieht sich auf die UND-Verknüpfung beider Mengen.

$$\mu_{A \cap C}(x) = \mu_A(x) \cap \mu_C(x) := \text{MIN}(\mu_A(x), \mu_C(x)) \quad (2.43)$$

Die Vereinigungsmenge von  $A$  und  $C$  ist nach Gleichung 2.44 definiert.

$$A \cup C = \{x, \mu_{A \cup C}(x) \mid x \in G\}. \quad (2.44)$$

Die Zugehörigkeitsfunktion der Vereinigungsmenge  $\mu_{A \cup C}$  wird durch den Maximum-Operator (MAX-Operator) definiert.

$$\mu_{A \cup C}(x) = \mu_A(x) \cup \mu_C(x) := \text{MAX}(\mu_A(x), \mu_C(x)) \quad (2.45)$$

Der MIN- und der MAX-Operator werden in der Inferenz von Fuzzy-Regelungen angewandt.

### Fuzzy-Logik

Die Fuzzy-Logik beinhaltet nach ZADEH et al. (1988) Methoden zum unscharfen Schließen bzw. Schlussfolgern. Das scharfe Schließen stellt einen Grenzfall der Fuzzy-Logik dar. KRUSE et al. (2015) entsprechend sind die folgenden Verknüpfungen besonders wichtig.

- UND (Konjunktion); mathematisches Symbol:  $\wedge$
- ODER (Disjunktion); mathematisches Symbol:  $\vee$
- NICHT (Negation); mathematisches Symbol:  $\neg$
- IMPLIZIERT (Implikation/ Schlussfolgerung); mathematisches Symbol:  $\rightarrow$

Für die Fuzzy-Logik lassen sich aus Verknüpfungen Wahrheitswertefunktionen ermitteln. Diese besitzen die Formen:

- $w \wedge (\Theta, \beta) = \min\{\Theta, \beta\}$  (Konjunktion)
- $w \vee (\Theta, \beta) = \max\{\Theta, \beta\}$  (Disjunktion)
- $w \neg(\Theta) = 1 - \Theta$  (Negation)
- $w \rightarrow (\Theta, \beta) = \min\{1 - \Theta + \beta; 1\}$  (Łukasiewicz-Implikation) oder
- $w \rightarrow (\Theta, \beta) = \{1 \text{ falls } \Theta \leq \beta; \beta \text{ sonst}\}$  (Gödel-Implikation)

Der Wahrheitswert für die klassische Logik ist nach KRUSE et al. (2015) entweder 1 (wahre Aussage) oder 0 (falsche Aussage). Die zugehörigen Wahrheitswertefunktionen werden t-Normen und t-Conormen (auch s-Normen) genannt und müssen bestimmte Eigenschaften erfüllen. Für die Konjunktion wird nach KRUSE et al. (2015) meist die t-Norm „Minimum“ verwendet.

$$t(\Theta, \beta) = \min\{\Theta, \beta\} \quad (2.46)$$

Die t-Norm und die t-Conorm müssen die Kommutativität, die Assoziativität und die Monotonie erfüllen. Für die t-Norm gilt zusätzlich, dass sich der Wahrheitswert einer Aussage nicht ändern darf, wenn eine weitere wahre Aussage konjunktiv hinzukommt. Bei der t-Conorm darf sich der Wahrheitswert einer Aussage nicht ändern, wenn eine falsche Aussage disjunktiv hinzugefügt wird. Die Disjunktion wird nach KRUSE et al. (2015) meist mit der t-Conorm „Maximum“ abgebildet.

$$s(\Theta, \beta) = \max\{\Theta, \beta\} \quad (2.47)$$

Weitere t-Normen und t-Conormen können für die Fuzzy-Logik angewandt werden. Die aufgeführten Wahrheitswertefunktionen wurden zur Erarbeitung der Inhalte von Kapitel 7 verwendet.

### Linguistische Variablen und Terme

Haupteinsatzgebiete der Fuzzy-Logik sind nach ENGEL (1995) die Entscheidungsfindung und die Regelungstechnik. Nach KRUSE et al. (2015) sind Fuzzy-Systeme in der Lage, den menschlichen Entscheidungsprozess mit linguistischen Variablen und Termen nachzubilden. Linguistische Variablen sind nach SCHULZ & GRAF (2013) Wörter aus der natürlichen Sprache, wie beispielsweise „Geschwindigkeit“. Die linguistischen Terme beschreiben nach ZADEH (1988) und THOMAS (2009) die linguistischen Variablen und können entsprechend *sehr klein*, *klein*, *groß* und *sehr groß* lauten. Eine Fuzzy-Menge setzt sich aus beiden Elementen zusammen, vgl. SCHULZ & GRAF (2013). Die Aussage „sehr große Geschwindigkeit“ stellt eine unscharfe Menge dar.

## 2.5.2 Aufbau eines Max-Min-Reglers

Fuzzy-Regelungen sind nach SCHULZ & GRAF (2013) und NAKAMURA et al. (1993) robust und technisch kostengünstig umsetzbar. Zu den Arten der Fuzzy-Regelungen gehören unter anderem der Takagi-Sugeno-Kang-Regler (TSK-Regler) und der logikbasierte Regler. Der nach KRUSE et al. (2015) am häufigsten eingesetzte Fuzzy-Regler ist der Mamdani-Regler, auch Max-Min-Regler genannt.

Der Max-Min-Regler besteht nach SCHULZ & GRAF (2013), SCHMIDT et al. (2010) und KRUSE et al. (2015) aus den folgenden Elementen.

1. Definition von Zugehörigkeitsfunktionen der Eingangsgrößen
  2. Fuzzifizierung
  3. Aufstellen der Regelbasis
  4. Inferenz
  5. Defuzzifizierung
1. Es liegen  $n$  scharfe Eingangsgrößen ( $x_{1s}, \dots, x_{ns}$ ) und ihre linguistischen Variablen vor, zu denen Eingangs-Fuzzy-Mengen entwickelt werden. Zugehörigkeitsfunktionen verknüpfen die scharfen Eingangsgrößen mit den Eingangs-Fuzzy-Mengen.
  2. Bei der Fuzzifizierung werden für die  $n$  scharfen Eingangsgrößen die Zugehörigkeitsgrade mittels der Zugehörigkeitsfunktionen der linguistischen Terme berechnet.
  3. Der Max-Min-Regler beruht auf einer Regelbasis, die aus einer endlichen Anzahl an Produktionsregeln besteht. In den Regeln ist die linguistische Beschreibung des zu regelnden Prozesses dokumentiert.
  4. Die Inferenz ist nach LACKES & SIEPERMANN (2018) ein Schlussfolgerungsmechanismus der Fuzzy-Logik, der auch als unscharfes Schließen bezeichnet wird. Aus den fuzzifizierten Eingangswerten wird anhand der Produktionsregeln zu jeder WENN-Bedingung eine DANN-Schlussfolgerung generiert. Die Schlussfolgerungen entsprechen Ausgangs-Fuzzy-Mengen, die miteinander vereinigt die Ergebnis-Fuzzy-Menge bilden. Im Folgenden wird die Ausführung des Max-Min-Inferenzschemas mit den zugehörigen Berechnungsvorschriften erläutert.

### Max-Min-Inferenzschema

Das Max-Min-Inferenzschema besteht nach SCHULZ & GRAF (2013) aus einem Regelsatz aus  $k$  Regeln mit je  $n$  UND-Verknüpfungen als Teilaussagen der Eingangswerte. Die Eingangswerte werden in den Aussagen der WENN-Bedingung berücksichtigt und durch die UND-Verknüpfung verbunden. Nehmen die Eingangswerte die charakteristischen Werte einer Regel an, wird diese als aktiv bezeichnet und die DANN-Bedingung kann geschlussfolgert werden.

$$\begin{aligned}
R_1: & \text{ WENN } x_1 = A_{11} \quad \text{UND...UND} \quad x_n = A_{1n}, \quad \text{DANN } y = B_1 \\
& \dots \\
R_j: & \text{ WENN } x_1 = A_{j1} \quad \text{UND...UND} \quad x_n = A_{jn}, \quad \text{DANN } y = B_j \\
& \dots \\
R_k: & \text{ WENN } x_1 = A_{k1} \quad \text{UND...UND} \quad x_n = A_{kn}, \quad \text{DANN } y = B_k
\end{aligned}$$

Dabei sind

$$\begin{aligned}
& R_1, \dots, R_j, \dots, R_k \text{ einzelne Regeln} \\
& \quad j \text{ Zählvariable der Regeln} \\
& \quad x_1, \dots, x_j, \dots, x_n \text{ Eingangsgrößen der Regeln} \\
& \quad i \text{ Zählvariable der Eingangsgrößen} \\
& A_{11}, \dots, A_{ji}, \dots, A_{kn} \text{ linguistische Terme der Eingangsgrößen } x_i \\
& \quad y \text{ Ausgangsgröße der Regel} \\
& B_1, \dots, B_j, \dots, B_k \text{ linguistische Terme der Ausgangsgröße } y.
\end{aligned}$$

Für jeden Eingang  $i$  liegt ein scharfer Eingangswert  $x_{is}$  vor. Alle scharfen Eingangswerte können in dem Vektor  $x_s = x_{1s}, x_{2s}, \dots, x_{ns}$  zusammengefasst werden. Das unscharfe Schließen für die scharfen Eingangswerte erfolgt durch die Bestimmung der Erfüllungsgrade  $H_j$  einer jeden Regel  $j$ .  $H_j$  beschreibt für die scharfen Eingangswerte  $x_{is}$  den minimalen Zugehörigkeitsgrad aller Eingangs-Fuzzy-Mengen einer aktiven Regel. Da die Teilaussagen der Eingangswerte UND-verknüpft sind, müssen die Zugehörigkeitsgrade mit dem MIN-Operator verbunden werden, vgl. Abbildung 2.19. Der Erfüllungsgrad ist definiert als

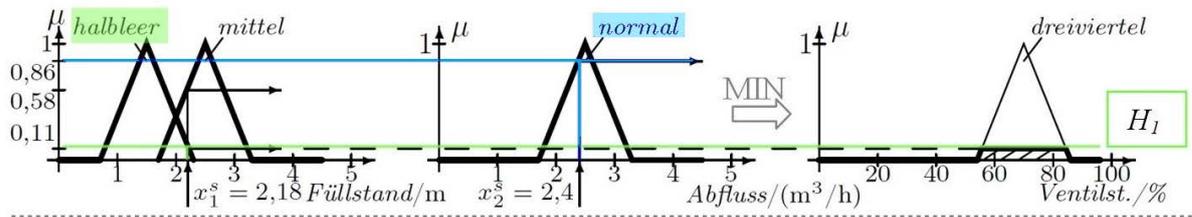
$$H_j = \text{MIN}(\mu_{A_{ji}}(x_{is})) \quad \text{mit } i = 1, \dots, n \quad (2.48)$$

und entspricht dem Zugehörigkeitsgrad der Eingangs-Fuzzy-Menge  $A_{ji}$  bei dem scharfen Eingangswert  $x_{is}$ . Für alle inaktiven Regeln ist der Erfüllungsgrad gleich Null. Der MAX-Operator wird nach Schmidt et al. 2010 angewandt, wenn mehrere Erfüllungsgrade (z.B.  $H_j$  und  $H_{j'}$  der Regeln  $j$  und  $j'$ ) einen Bezug zur gleichen Ausgangs-Fuzzy-Menge  $B_j = B_{j'}$  besitzen. Durch den MAX-Operator wird die ODER-Verknüpfung repräsentiert.

Die linguistischen Eingangsvariablen in Abbildung 2.19 sind „Füllstand“ und „Abfluss“ eines Flüssigkeitsbehälters, die linguistische Ausgangsvariable ist „Ventilstellung (Ventilst.)“. Pro Regel wird die Ausgangs-Fuzzy-Menge in Höhe des minimalen Zugehörigkeitsgrads der entsprechenden Eingangs-Fuzzy-Mengen abgeschnitten, was nach SCHULZ & GRAF (2013) den Erfüllungsgraden der Regeln  $H_1$  bzw.  $H_2$  entspricht.

Regel 1

WENN Füllstand = **halbleer** UND Abfluss = **normal** DANN Ventilst. = **dreiviertel**



Regel 2

WENN Füllstand = **mittel** UND Abfluss = **normal** DANN Ventilst. = **halb**

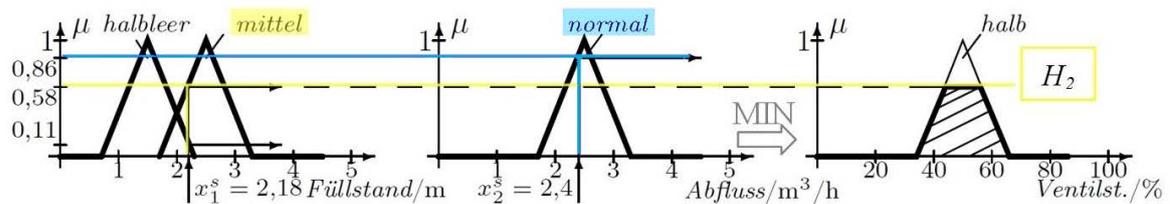


Abbildung 2.19: Verwendung des MIN-Operators auf die UND-verknüpften Eingangs-Fuzzy-Mengen am Beispiel einer Füllstandsregelung nach SCHULZ & GRAF (2013) (oben Beispiel-Regel 1, unten Beispiel-Regel 2).

Für jede aktive Regel  $j$  wird die entsprechende Ausgangs-Fuzzy-Menge  $\mu_{B_j}(y)$  ermittelt. In Höhe des Erfüllungsgrades  $H_j$  wird die Ausgangs-Fuzzy-Menge abgeschnitten oder „geköpft“, vgl. Abbildung 2.19. Die abgeschnittenen Ausgangs-Fuzzy-Mengen  $\mu_{B'_j}(y)$  sind definiert als

$$\mu_{B'_j} = \text{MIN}(H_j, \mu_{B_j}(y)) \tag{2.49}$$

Es folgt die Berechnung der resultierenden Ergebnis-Fuzzy-Menge  $\mu_{\text{Res}}(y)$ , die beispielhaft in Abbildung 2.20 dargestellt ist. Dazu müssen die abgeschnittenen Ausgangs-Fuzzy-Mengen aller Regeln durch den MAX-Operator vereinigt werden. Der MAX-Operator kann mit Gleichung 2.50 berechnet werden.

$$\mu_{\text{Res}}(y) = \text{MAX}(\mu_{B'_j}(y)) \quad j = 1, \dots, k \tag{2.50}$$

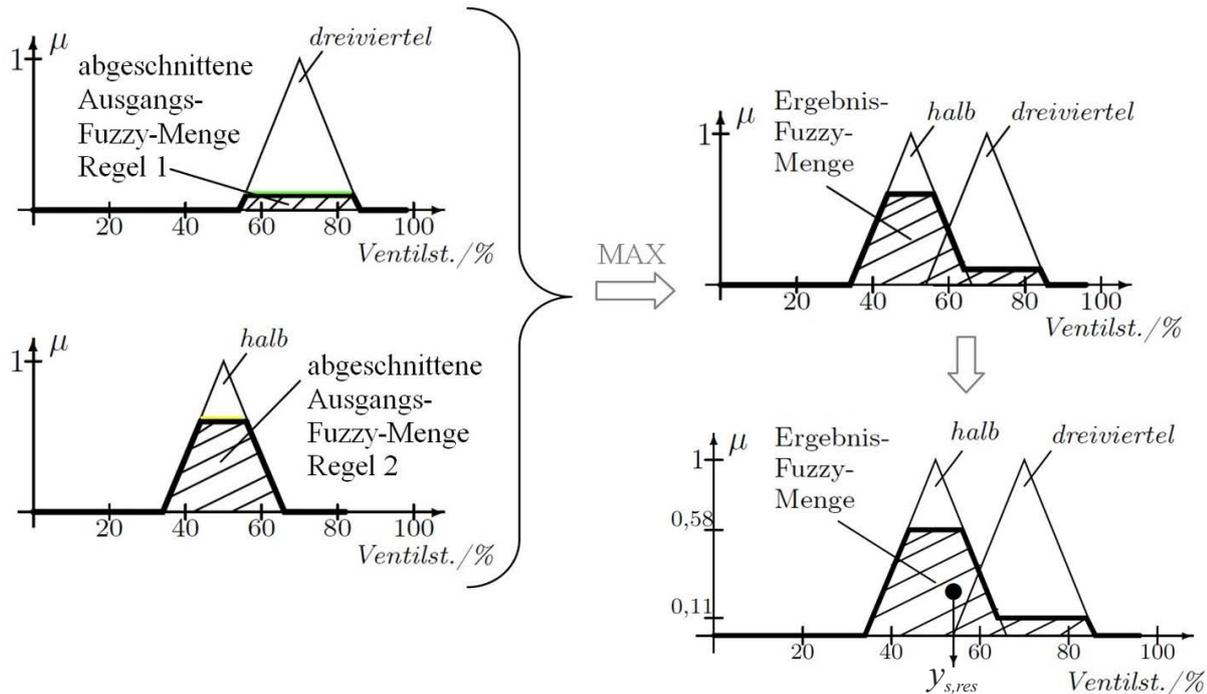


Abbildung 2.20: Verwendung des MAX-Operators zur Vereinigung der abgeschnittenen Ausgangs-Fuzzy-Mengen (links) zur Ergebnis-Fuzzy-Menge (rechts) am Beispiel einer Füllstandsregelung nach SCHULZ & GRAF (2013).

5. Die Defuzzifizierung weist die Eigenschaft auf, dass Regeln bei der Berechnung des scharfen Ausgangswertes  $y_{s,Res}$  unterschiedlich stark berücksichtigt werden. Methoden zur Defuzzifizierung sind das *Bisector-Verfahren*, der Mittelwert der Maxima, der kleinste Wert der Maxima und der größte Wert der Maxima. Die Schwerpunktmethode nach SCHULZ & GRAF (2013) wird in den meisten Fuzzy-Regelungen angewandt. Der Flächenschwerpunkt der Ergebnis-Fuzzy-Menge wird bestimmt, der dem scharfen Ausgangswert entspricht. Der Schwerpunkt einer beispielhaften Ergebnis-Fuzzy-Menge ist in Abbildung 2.20 dargestellt. Die Berechnungsvorschrift der Schwerpunktmethode wird nach VDI 3550 Blatt 2 in Gleichung 2.51 definiert.

$$y_{s,Res} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} y \cdot \mu_{Res}(y) \cdot dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \mu_{Res}(y) \cdot dy} \quad (2.51)$$

Die Berechnung der scharfen Ausgangswerte erfolgt bei einem Durchlauf des Fuzzy-Reglers. Ein scharfer Ausgangswert kann genutzt werden, um die zugehörige Stellgröße mit Daten zu versorgen. Ein Durchlauf gilt für einen Satz an scharfen Eingangswerten. Ändern sich die Eingangsdaten, erfolgt ein neuer Reglerdurchlauf.

### 2.5.3 Hinweise zur Auslegung eines Fuzzy-Reglers

Im Folgenden werden nach SCHMIDT et al. (2010), SCHULZ & GRAF (2013) sowie KRUSE et al. (2015) Sachverhalte aufgeführt, die für den Entwurf von Fuzzy-Reglern beachtet

werden sollten. Die Grundlage für Fuzzy-Regler sind geeignete Zugehörigkeitsfunktionen für die Eingangs- und Ausgangsgrößen. Diese sollten auf Plausibilitätskriterien bezüglich des zu regelnden Prozesses basieren, um kein unerwünschtes Systemverhalten hervorzurufen. Zugehörigkeitsfunktionen sind stets skeptisch zu bewerten, da die Festlegung der Funktionen teilweise auf dem persönlichen Empfinden des Auslegers beruht.

Dreiecks- und Trapezfunktionen sollten für eine möglichst einfache Bestimmung des Zugehörigkeitsgrades der Eingangs- und Ausgangswerte herangezogen werden. Jeder Eingangswert sollte mindestens einer Fuzzy-Menge zugeordnet werden können und einen Zugehörigkeitsgrad größer Null besitzen. Die linguistischen Variablen müssen den gesamten Wertebereich der Eingangssignale abdecken. Die Fuzzy-Mengen müssen sich überschneiden. Andernfalls können unerwünscht hohe Ausgangssignale berechnet werden, die zu Schäden an der Maschine führen können. Im Umkehrschluss muss auch das Ausgangssignal den Signalbereich der Eingangssignale abdecken.

Soll ein Regler im Arbeitsbereich empfindlich auf kleine Änderungen einer Eingangs- oder Ausgangsgröße reagieren, empfiehlt es sich die Fuzzy-Menge schmal zu gestalten. Werte, die weit vom Arbeitspunkt entfernt liegen, müssen stark nachgeregelt werden, sodass breite Fuzzy-Mengen zu empfehlen sind. Die Anzahl der Regeln steigt schnell mit der Anzahl an Fuzzy-Mengen. Die Regelbasis muss vollständig sein. Regeln, welche die gleiche Annahme haben (WENN-Bereich), jedoch unterschiedliche Schlussfolgerungen (DANN-Bereich) besitzen, sind nicht erlaubt.

## 2.6 Schlussfolgerungen aus dem Stand der Forschung

Mit der steigenden Nachfrage nach individualisierten Bauteilen steigen die Komplexität von Umformprozessen sowie die Anzahl der Einrichtungsvorgänge auf einer Umformmaschine. Um Biegeprozesse in den Gutteilbereich zu führen, sind derzeit Iterationsschleifen bei der Wahl der Werkzeugkräfte und Achsenwege nötig. Korrekturen können erst nach erfolgter Biegung sowie Bewertung des Biegebauteils vorgenommen werden. Die Iterationsschleifen sind abhängig von der Erfahrung der Maschinenbediener.

Da Biegeprozesse Schwankungen unterliegen, ist eine Vorauslegung der Prozessparameter nur bedingt möglich. Die Verfahrensgrenze Faltenbildung stellt eine Instabilität dar, die nur näherungsweise durch Berechnungen, wie bspw. FE-Simulationen, vorhergesagt werden kann. Die Berechnungsmodelle enthalten empirisch ermittelte Korrekturfaktoren oder manuell eingebrachte Inhomogenitäten, um die Berechnungsergebnisse an Ergebnisse praktischer Versuche anzupassen. Die Anpassungen müssen bei jeder Biegeaufgabe erneut durchgeführt werden.

Messsysteme, die Falten während des Umformprozesses erfassen, können eine gezielte Korrektur der Werkzeugkräfte und Achsenwege nach erfolgter Biegung ermöglichen. Direkte und indirekte Messmethoden werden in der Umformtechnik angewandt, um den Werkstofffluss und die Faltenbildung zu erfassen. Sie bergen das Potenzial, die Eingangsgrößen

einer Prozessregelung zu liefern, um Parameterkorrekturen bereits während der Umformung durchführen zu können.

Die Produktqualität kann durch den Einsatz von Regelkreisen verbessert und die Ausschussrate reduziert werden. In der Umformtechnik sind besonders bei Tiefziehprozessen Modelle der Prozessregelung zu finden. Beeinflusst werden nicht nur Produktgeometrien, sondern auch mechanische und physikalische Eigenschaften. Zum Einsatz kommen Regelungen auf Basis von analytischen Umformmodellen, künstlichen neuronalen Netzen oder auf Basis von mittels FE-Simulationen definierten Regelkurven. Zudem kommen Fuzzy-Regler zum Einsatz, die den Vorteil der Übertragbarkeit und Anpassungsfähigkeit auf variierende äußere Einflüsse haben. Die Regelung eines Prozesses mit einem Fuzzy-Regler bietet sich an, wenn die Erfahrung von Maschinenbedienern in linguistischen Variablen und Termen im Zusammenspiel mit der Regelbasis abgebildet werden soll. Dies ist beim Rotationszugbiegen ausgeprägt. Durch die Mitarbeit am Forschungsprojekt *Cyberbrüsten 4.0* (gefördert durch EFRE PRODUKTION.NRW) am Lehrstuhl wurde ein Case-based reasoning-System (CBR) erfolgreich an Rotationszugbiegemaschinen eingesetzt. CBR-Systeme enthalten Einstellempfehlungen erfahrener Maschinenbediener, siehe Unterabschnitt 4.1.3. Fuzzy-Regler ermöglichen im Gegensatz zu CBR-Systemen neben der Einbringung von Erfahrungen ein automatisches Nachregeln während des Biegeprozesses.

Beim Rotationszugbiegen reagiert die Faltenbildung sensibel auf Inhomogenitäten im Gefüge und äußere Einflüsse aus den Bereichen Umgebung, Halbzeug, Werkzeug und Maschine, deren Beträge z. T. unbekannt sind. Eine hinreichende Vorhersage für eine Faltenverhinderung ist derzeit nicht möglich. Eine Methode zur Messung des Werkstoffflusses während des Prozesses könnte den Zustand der Rohrkontur kontinuierlich erfassen. Werkzeugkräfte und Achsenwege, die den Falten entgegen wirken, könnten anhand eines Reglers bereits während der Umformung angepasst werden. Die Veränderung von Werkzeugkräften und Achsenwegen löst eine nichtlineare Änderung des Werkstoffflusses im Biegebau teil aus. Der Aufwand, ein nichtlineares Regelungsproblem zu lösen, kann mit Hilfe der Fuzzy-Logik deutlich reduziert werden. Somit wäre ein Fuzzy-Regelkreis für den Rotationszugbiegeprozess geeignet, der die Prozessparameter entsprechend der schwankenden Einflussfaktoren geregelt anpasst. Am Lehrstuhl existiert ein Erfahrungswissen über das Prozessverhalten, das in einen Fuzzy-Regler integriert werden kann. Die bisherige Methode der Parameterkorrektur nach erfolgter Biegung stößt an ihre Grenzen. Sie soll durch eine Korrektur während des Biegeprozesses abgelöst werden. Die Ausschussquote und die Einstellzeiten können reduziert werden. Neue Möglichkeiten der flexiblen, individuellen Sonder- und Einzelanfertigung können geschaffen werden.

### 3 Motivation, Zielsetzung und Vorgehensweise

Das Rotationszugbiegen ist ein Profilbiegeverfahren, welches vorzugsweise bei geringen Wanddicken und kleinen Biegeradien eingesetzt wird. Mit entsprechender Werkzeug- und Maschinenteknik sind nach BURKHARD & ALBRECHT (2009) Biegeverhältnisse kleiner als eins darstellbar. Grenzen des Verfahrens sind die Rissbildung am Außenbogen und die Faltenbildung am Innenbogen. Qualitätsbeeinflussende Merkmale beim Rotationszugbiegen bestehen in Geometrieabweichungen im Bereich der geraden Abschnitte zwischen den Bögen, Abweichungen von Radien und Biegewinkeln sowie nicht eingehaltenen Vorgaben zum Biegeeinfall am Bogen oder der Ovalität in der Biegezone. Die Rissbildung wird meist durch Vergleich der berechneten Dehnungen mit einer Grenzformänderungskurve vorhergesagt. Die Faltenbildung ist eine Instabilität, die durch die Geometrien und die Werkstoffeigenschaften des Halbzeugs und der Werkzeuge bestimmt wird. Schwingungen der Biegeachsen, Nachgiebigkeiten oder Positionierungsungenauigkeiten der Werkzeuge und Reibungsschwankungen sind zusätzliche Einflussgrößen. Die Faltenbildung ist aufgrund der Vielfalt der Einflüsse nur begrenzt kalkulierbar.

Maßnahmen zur Vermeidung der Faltenbildung erfolgen einerseits durch Änderungen der Werkzeugpositionen und andererseits durch Änderungen der Achsbewegungen. Diese Korrekturen erfolgen jeweils nach der Herstellung eines faltenbehafteten Bauteils. Dabei steht nicht fest, ob diese Instabilität lediglich einmalig auftrat oder einen systematischen Ursprung hatte. Bei Korrekturen zum Verhindern von Falten besteht die Gefahr, dass der Prozess durch die Einstell- und Korrekturmaßnahmen zur Rissbildung geführt wird. Insbesondere bei sehr anspruchsvollen Biegungen (kleine Radien, geringe Wanddicken) ist das Prozessfenster klein, in dem Gutteile produziert werden. Das Prozessfenster kann durch Betrachtung der Gegenhalternormalkraft veranschaulicht werden, siehe Abbildung 3.1. Es wird begrenzt durch die Faltenbildung auf der einen und die Rissbildung auf der anderen Seite.

Die nur begrenzt mögliche Vorhersage der Verfahrensgrenze sowie kleine Prozessfenster verlängern die Rüstzeiten. Die Dauer der Einstellvorgänge ist abhängig von den Erfahrungen der Maschinenbediener. Ein CBR-System kann das Erfahrungswissen nach BORCHMANN et al. (2019) speichern und aufbereitete Informationen zur Verfügung stellen. Dadurch kann neben der Rüstzeit der Anlernprozess zu schulender Mitarbeiter nach DE CARVALHO et al. (2018) und HOFFMANN et al. (2019) verkürzt werden. Eine Regelung, in die das Erfahrungswissen einfließen kann, birgt das Potenzial während des Biegevorgangs selbstständig nachzuregeln. Dadurch kann die Ausschussquote sowie die Rüstzeit verringert und der Anlernprozess auf ein Minimum reduziert werden.



Um eine Methode zur Regelung des Biegeprozesses zu entwickeln, müssen die Bestandteile, aus denen sich ein Regler zusammensetzt, bekannt sein. Abbildung 3.2 zeigt den Aufbau eines Reglers. Die Führungsgröße entspricht dem Soll-Wert, der durch den gewünschten, faltenfreien Zustand vorliegt. Zur Bewertung der Falten liegt der Faltenbewertungsfaktor nach KUHNHEN (2016) und VDI 3431 vor.

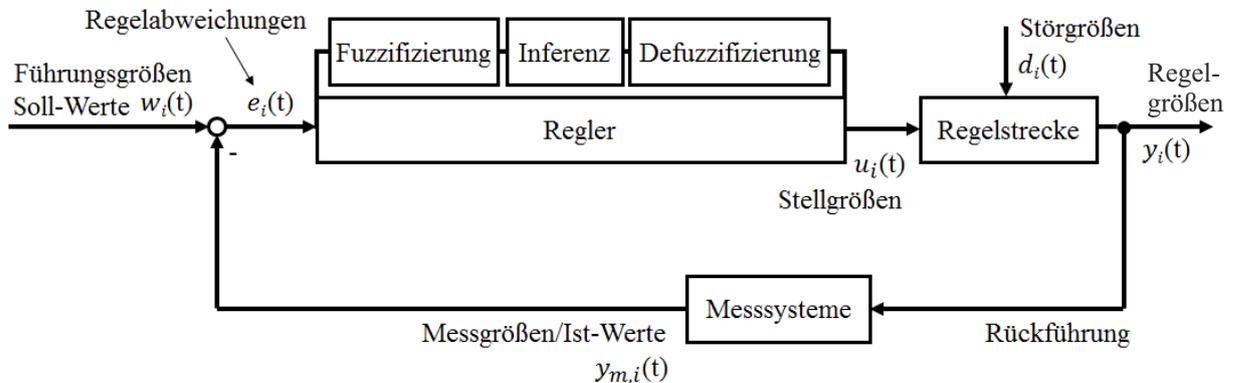


Abbildung 3.2: Blockschaltbild des Regelkreises, bestehend aus dem Biegeprozess als Regelstrecke, dem Fuzzy-Regler und einer negativen Rückkopplung der Regelgrößen, die mittels In-situ-Messsystemen erfasst werden.

Zur Berechnung der Regelabweichung als Differenz aus Soll-Wert und Ist-Wert ist eine Erfassung des Ist-Wertes während des Biegens nötig, die derzeit nicht vorhanden ist. Eine Reaktion auf einen Bauteilfehler oder eine Toleranzabweichung ist bisher erst für das nachfolgende Bauteil möglich. Ein Vergleich geeigneter Messsysteme für das Rotationszugbiegen unter Berücksichtigung ihrer Leistungsdaten und den Ergebnissen praktischer Experimente ist bisher nicht erfolgt. Zur In-situ-Messung von Falten sollen durch praktische Biegeversuche Messsysteme getestet und verglichen werden. Dabei werden konventionelle Rotationszugbiegewerkzeuge konstruktiv um die jeweilige Messfunktion erweitert.

Die Regelabweichung dient als Eingangsgröße für den Regler. Dieser ermittelt mit Hilfe von Produktionsregeln Stellgrößen, anhand derer der Biegeprozess angepasst werden kann. Dazu werden die Verläufe von Werkzeugkräften und Achsenwegen ausgewertet, die den Werkstofffluss am Innenbogen beeinflussen. Ein Prozessmodell wird entwickelt, bei dem die Versagensgrenze Faltenbildung der betrachteten Biegeaufgaben bei variierenden Prozessbedingungen ermittelt wird. Das Prozessmodell wird genutzt, um die Regeln für das Verhindern des Prozessversagens zu formulieren.

Die Produktionsregeln werden in eine Fuzzyregelung eingebunden, die während des Prozesses die zeitlichen Funktionen der Soll-Werte aktualisiert. Die Soll-Werte sind in der SPS der Biegemaschine tabellarisch hinterlegt. Die Regelung wird mit den Messsystemen gekoppelt, sodass Falten früh in ihrer Entstehung detektiert und Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können.

Die Fuzzy-Logik wird als Regelungsmethode angewandt, um aus der Kombination der verschiedenen Messgrößen konkrete Einstellparameter ableiten zu können. Das Problem der nichtlinearen Änderung des Werkstoffflusses im Biegebauteil kann nach LEE & KOPP

(2001) mit Hilfe der Fuzzy-Logik deutlich reduziert werden. Fuzzy-Regler werden in der Umformtechnik von ENGEL (1995), RAY et al. (2004), BEHRENS et al. (2005), NA et al. (2006), LI et al. (2007) und ALEYASIN (2017) erfolgreich angewendet. Die aus der Regelung generierten Änderungen der Werkzeugkräfte und Achsenwege werden an die Steuerung weitergegeben und an den Maschinenachsen umgesetzt. Die Einbindung in einen Fuzzy-Regler hat den Vorteil, auf individuelle Schwankungen jeder Biegung zu reagieren und die Methode auf andere Biegeaufgaben und andere Biegemaschinen übertragbar zu gestalten. Erfahrungen mit dem Biegeprozess können in die Entwicklung der Fuzzy-Mengen und Produktionsregeln einfließen. Die Anwendung der Fuzzy-Logik zur Erstellung der Regelbasis ist deshalb erforderlich, da aufgrund der Prozessschwankungen kein linearer Zusammenhang zwischen den Einstellparametern und der Bauteilqualität hergestellt werden kann. Die Fuzzy-Logik kann unscharfe, nichtlineare Abhängigkeiten mathematisch beschreiben. Der Fuzzy-Regler ist in der Lage, den Prozess in den Gutteilbereich (Faltenbewertungsfaktoren von  $\Omega = 0$ ) zu regeln, sofern der Bogen mit der Maschine versagensfrei herstellbar ist. Das Vorgehen insbesondere zur Extraktion der Produktionsregeln und zum Aufbau des Reglers erfolgt iterativ.

Das Erarbeiten der fehlenden Größen für den Aufbau eines Reglers zur Verhinderung der Faltenbildung bildet eine neue Methode, siehe Abbildung 3.3, um Qualitätsmerkmale während des Biegens zu erfassen, deren Abhängigkeit von den bekannten Prozessparametern herauszustellen und einen Regler zur Erreichung der bestmöglichen Bauteilqualität aufzubauen.

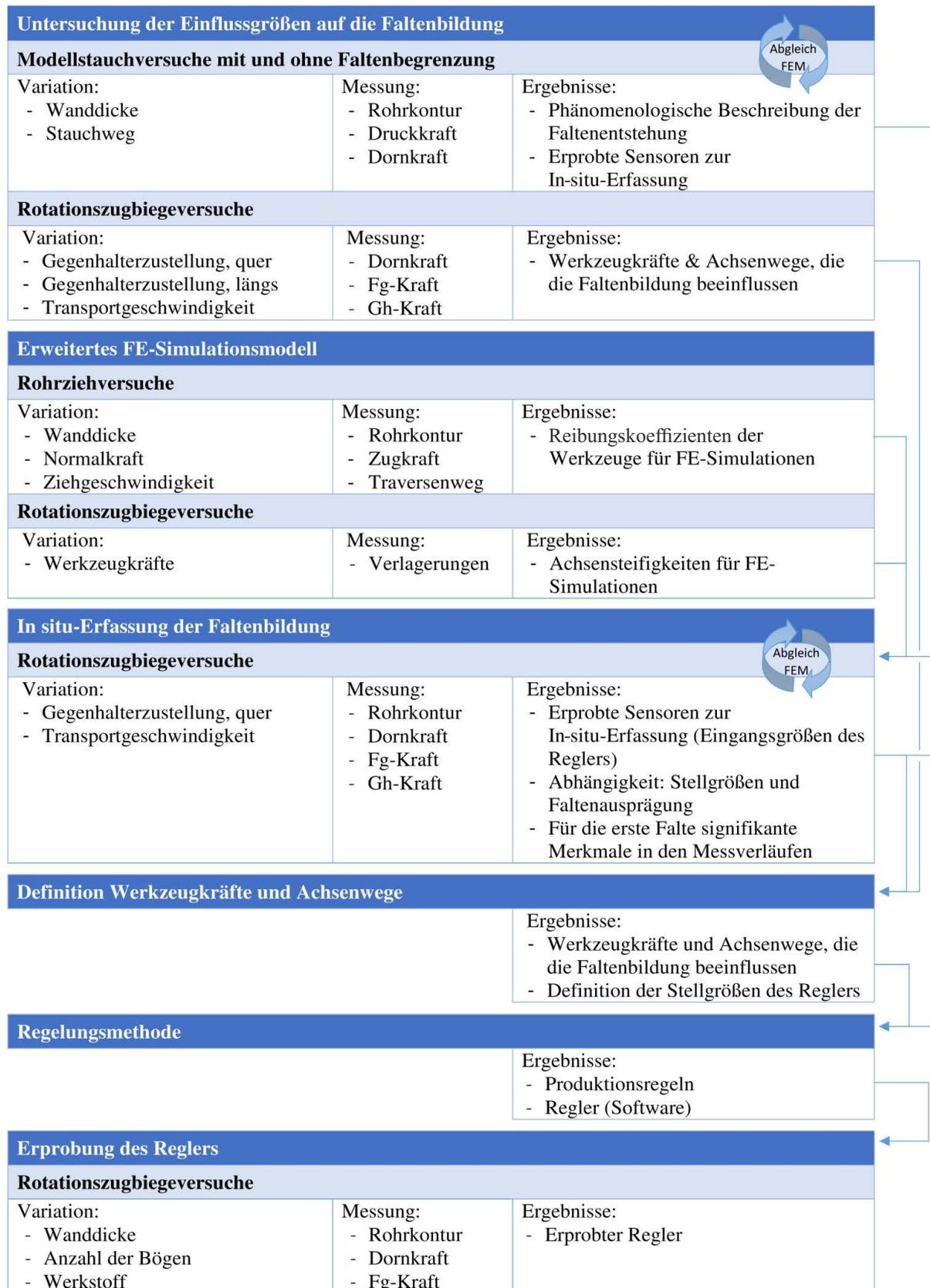


Abbildung 3.3: Vorgehensweise zur Entwicklung einer Prozessregelung für das Rotationszugbiegen.



## 4 Sensitivitätsanalyse prozessrelevanter Einflussparameter der Faltenbildung

Einflussparameter der Faltenbildung und deren Sensitivität wurden untersucht. Die Prozessparameter des Gegenhalters und der Transporteinheit wurden in praktischen Biegeversuchen variiert und ihr Einfluss auf die plastische Dehnung und die Faltenbildung ausgewertet. Die plastische Dehnung wurde durch den Umformgrad und das Dehnungsverhältnis quantifiziert. Die Faltenbildung wurde anhand des Faltenbewertungsfaktors nach KUNHEN (2016) und VDI 3431 verglichen. Die Zustellung des Gegenhalters in Querrichtung und die Transportgeschwindigkeit wurden als Aktoren für die Regelung identifiziert und in Abschnitt 6.2 in Berechnungen und praktischen Versuchen verschiedener Biegeaufgaben näher untersucht.

Die Steifigkeiten der Maschinenachsen wurden in FE-Simulationen untersucht und haben einen großen Einfluss auf die Faltenbildung. Daher wurde in Kapitel 5 ein FE-Simulationsmodell unter Berücksichtigung der an den Maschinenachsen gemessenen Steifigkeiten zur Faltenvorhersage entwickelt.

Die Geometrie des Faltenglätters ist an den Freiraum angepasst, der zwischen Rohr und Biegeform entsteht. Der Faltenglätter ermöglicht ein Verhindern von Falten, in dem er den Freiraum für die Ausbeulung der Rohrwand verringert. Seine Geometrie und Position hat einen Einfluss auf die Faltenbildung. Die dünn auslaufende Spitze des Faltenglätters unterliegt einem hohen Verschleißrisiko. Die Ergebnisse praktischer Biegeversuche ergaben, dass die Faltenglätterspitze bei der betrachteten Biegeaufgabe gekürzt und der Verschleiß reduziert werden konnte.

Gleichungen aus dem Stand der Technik, welche das Ausbeulverhalten einer Kreiszyinderschale beschreiben, beziehen sich auf Stauchversuche. Praktische Stauchversuche wurden durchgeführt und ihre Ergebnisse mit den Gleichungen nach SCHAPITZ (1963) verglichen. Die Gleichungen enthalten nicht alle Einflussgrößen, die in praktischen Versuchen auf die Probe wirken, wie z.B. die Reibung an den Rohrstirnseiten, Gefügeinhomogenitäten und Form- und Lagetoleranzen. Die Gleichungen ergeben kritische Druckspannungen, die unterhalb der tatsächlichen Druckspannungen bei Faltenstart liegen. Ergebnisse von FE-Simulationen liegen näher an den praktischen Versuchsergebnissen. Eine Begrenzung der Ausbeulung der Rohrwand ermöglicht eine Reduzierung der Faltenbildung. Die Stauchkraft sinkt durch die Ausbeulung nicht ab, da sich die Rohrwand an der begrenzenden Hülse abstützt. Dadurch wird die Aufdickung gefördert und die Ausbeulung reduziert. Eine Begrenzung der Ausbeulung wurde beim Rotationszugbiegen durch Zustellen des Gegenhalters in Querrichtung zum Rohr umgesetzt, siehe Abschnitt 6.2.

## 4.1 Einfluss der Werkzeugkräfte und Achsenwege

Während eines Einrichtprozesses werden die Werkzeugkräfte und Achsenwege auf einer Rotationszugbiegemaschine eingestellt und variiert, um mit möglichst wenigen iterativen Versuchen ein Bauteil innerhalb der Toleranzen herzustellen. Kenntnisse über die Sensitivität der Einstelländerungen gegenüber den Verfahrensgrenzen des Rotationszugbiegens ermöglichen eine gezieltere Wahl der Prozessparameter und können zu einer geringeren Anzahl an Einstellversuchen führen. Prozessparameter wurden hinsichtlich ihres Einflusses auf die Dehnung am Außenbogen und die Faltenbildung am Innenbogen untersucht.

### 4.1.1 Vorgehen zur Bewertung der Risswahrscheinlichkeit und der Faltenbildung

In den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen wurden die Dehnung am Rohraußenbogen als Maß für die Risswahrscheinlichkeit und der Faltenbewertungsfaktor für den direkten Vergleich von Biegebauteilen ermittelt.

#### Bewertung der Risswahrscheinlichkeit

Zur Beurteilung der Risswahrscheinlichkeit wurden die Rohre elektrolytisch berastert, so dass die Dehnung am Außenbogen nach dem Biegen ermittelt und mit Hilfe des Programms *Autogrid-Systeme* der VIALUX GMBH, Chemnitz, in einem Grenzformänderungsdiagramm ausgewertet werden konnte. Die Berasterung wurde in Anlehnung an HASSAN (2017) und LIEWALD et al. (2014) durchgeführt. Das Dehnungsverhältnis nach HAN (2003) und STEINHEIMER (2006) in Gleichung 4.1 gibt an, wie steil oder flach die mittlere Steigungslinie im zweiten Quadranten mit Schnittpunkt im Diagrammursprung ist.

$$\text{Dehnungsverhältnis } \beta_D = \frac{d\varphi_2}{d\varphi_1} \quad (4.1)$$

In Abbildung 4.1 a) ist ein Dehnungsverhältnis von -0,584 als Beispiel dargestellt. Je größer der Betrag des Dehnungsverhältnisses ist, desto mehr Material konnte in die Umformzone gefördert werden und desto weniger wurde der Außenbogen gedehnt. Abbildung 4.1 b) zeigt ein typisches Formänderungsdiagramm eines durch eine FE-Simulation berechneten Rohrbogens, der durch Rotationszugbiegen hergestellt wurde. Zur Prozessauslegung kann der kritische Umformgrad für den Außenbogen aus der Grenzdehnung nach Gleichung 2.3 berechnet werden. Am Außenbogen entspricht der kritische Umformgrad dem Hauptumformgrad  $\varphi_1$ . Zur Einordnung in ein Formänderungsdiagramm kann der Nebenumformgrad  $\varphi_2$  am Außenbogen anhand des Dehnungsverhältnisses berechnet werden. Für das Rotationszugbiegen bei mitfahrendem Gegenhalter wird entsprechend der Software *bu-Biegeplaner (BUBI)* der bu+ENGINEERING GMBH, Siegen, ein Dehnungsverhältnis von  $\beta_D = -0,25$  am Außenbogen angenommen. Nachschiebende Gegenhalter können flachere Steigungen (betragsmäßig höhere Dehnungsverhältnisse) ermöglichen.

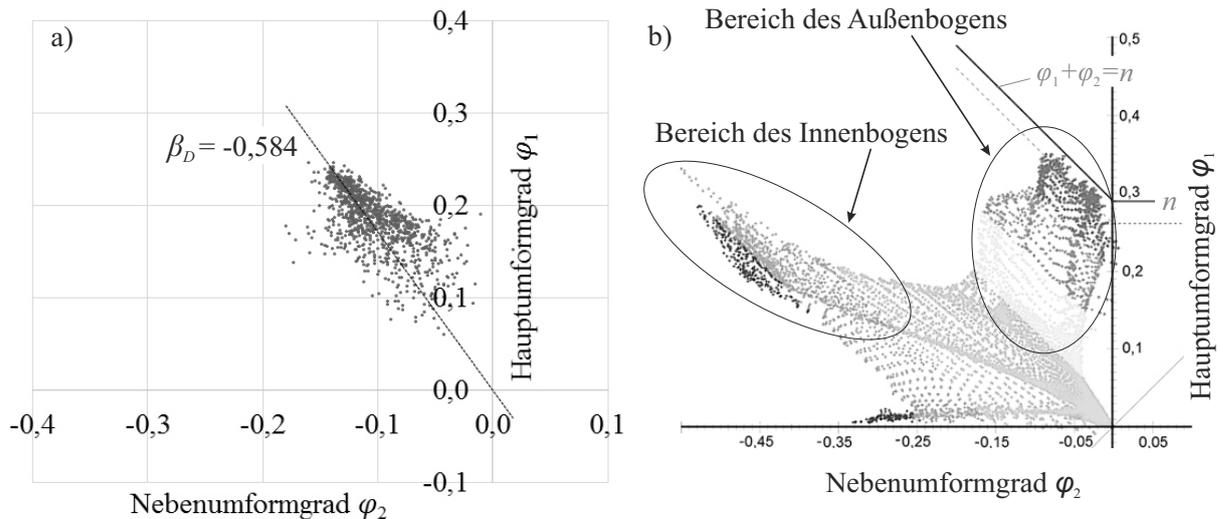


Abbildung 4.1: a) Formänderungsdiagramm für die optisch ausgewerteten Dehnungen am Außenbogen eines mittels Rotationszugbiegen hergestellten Rohrbogens. b) Formänderungsdiagramm für die mittels FE-Simulation berechneten Dehnungen eines Rohrbogens.

Die Grenzformänderungskurve, die konventionell an Blechen gewonnen wurde, schneidet die Achse des Hauptumformgrades nach STEINHEIMER (2006) auf der Höhe des Verfestigungsexponenten  $n$  und besitzt im zweiten Quadranten eine Steigung von  $-1$ . Dadurch kann eine Prozessauslegung gegenüber der Rissbildung erfolgen.

### Bewertung der Faltenbildung

Die Faltenbildung am Innenbogen wird mit Hilfe des Bewertungsfaktors  $\Omega$  nach Gleichung 2.4 quantifiziert. Zur Bestimmung des Bewertungsfaktors wird die Oberfläche des Rohrbogens mit dem 3D-Koordinaten-Messarm *Faro Edge 2,7 M* des Herstellers FARO EUROPE GMBH & CO. KG, Gladbeck mit *Faro Laser Line Probe ES* erfasst. Ein Messarm steigert nach KULCZYK (2012) die Qualität innerhalb der Produktion und sorgt für eine schnelle Erfassung komplexer Geometrien, was nach KUHNHEN (2016) in der Biegebranche von großer Bedeutung ist. Der Messarm besitzt sieben Gelenke, die manuell in alle drei Raumrichtungen unabhängig voneinander bewegt werden können. Bei einer volumetrischen Messabweichung von  $\pm 0,041$  mm beträgt die Einzelpunktabweichung  $0,029$  mm. Die Bauteiloberfläche kann, wie in Abbildung 4.2 dargestellt, taktil oder berührungslos mit dem Laserscanner vermessen werden. Eine LED-Anzeige gibt dem Prüfer Rückmeldung über den korrekten Messabstand des Laserscanners. Für die Aufnahme der Ist-Geometrie werden die Prüflinge auf dem Messtisch fixiert. An den zwei geraden Profilabschnitten wird jeweils ein Zylinder taktil aufgenommen. Das Programm *Polyworks 2018* der INNOVOMETRIC SOFTWARE INC., Quebec, Kanada, generiert anhand dieser Messpunkte die Zylinder nach dem *Best-Fit-Prinzip*. Die Punkte der Zylinderachsen spannen eine Ebene auf, die als Projektionsebene der Messpunkte der Rohrkontur dient. Diese Messpunkte der Kontur am Innenbogen werden durch manuelle Führung des Laserscanners erfasst.

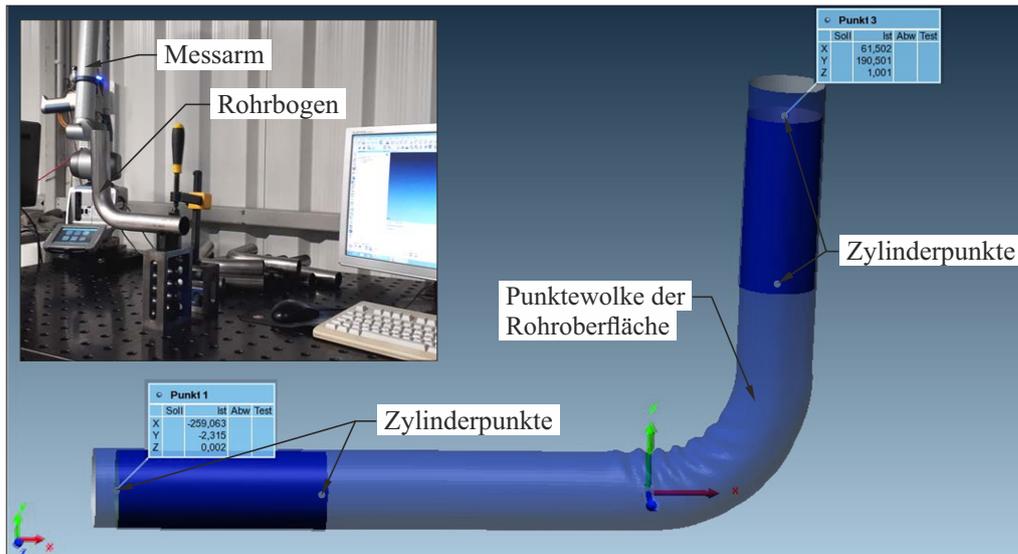


Abbildung 4.2: 3D-Messarm der FARO EUROPE GMBH & CO. KG und Flächenscan eines faltenbehafteten Rohrbogens, dargestellt in dem Programm Polyworks 2018 der INNOVMETRIC SOFTWARE INC.

Die Weiterverarbeitung des Oberflächenscans erfolgt mit der Software *Matlab R2016b* des Entwicklers THE MATHWORKS INC., Natick, USA. Das entwickelte Programm filtert die Konturpunkte heraus, die in der Projektionsebene liegen. Diese werden durch einen Spline ersetzt. Eine faltenfreie Zielkontur mit idealem Bauteilradius wird über den Spline gelegt, wobei sich die Enden der Schenkellinien überlagern. Die Ausgabegröße, der Faltenbewertungsfaktor, entspricht der Differenz zwischen der gescannten Rohrkontur und der Zielkontur, siehe Unterabschnitt 2.1.4. Durch die Messung werden sowohl primäre Falten nach ENGEL & MATHES (2013) in dem zylindrischen Rohrabschnitt als auch sekundäre Falten im Bereich des eigentlichen Bogens erfasst.

#### 4.1.2 Praktische Biegeversuche unter Variation der Werkzeugkräfte und Achsenwege

Praktische Versuche wurden auf der lehrstuhleigenen Rotationszugbiegemaschine TN 120 durchgeführt. Diese Biegemaschine wurde speziell für den Forschungseinsatz in Zusammenarbeit mit der TRACTO TECHNIK GMBH, Lennestadt, konstruiert und verfügt über eine hohe Steifigkeit. Elf Achsen können weg- oder kraftgeregelt programmiert werden. Die Maschinensteuerung ist vom Typ *S7-400* der SIEMENS AG, München. Das HMI befindet sich in einem separaten Bedienpult, siehe Abbildung 4.3. Das maximale Biegemoment beträgt 48 kNm. Die Halbzeugaufnahme ist für Profile mit einem maximalen Außendurchmesser von 160 mm geeignet. Der Gegenhalter, der Dorn, die äußere Spannbacke und das Spannfutter werden, ebenso wie die Biegeachse und die Querststellung des Faltenglätters, hydraulisch angetrieben. Die Längsstellung des Faltenglätters und der Vorschub des Transportes werden elektrisch angetrieben. Die Erfassung des Hydraulikdrucks er-

folgt über Druckmessumformer mit Dünnschicht-Dehnungsmessstreifen. Die Kraft der elektrischen Achsen wird indirekt über den Motorstrom erfasst. Die Achsenwege werden über Magnetsensoren registriert. Die Messdaten der Maschine werden über das implementierte Programm *Symtrace-D7* der SYMPAT GMBH, Nürnberg, aufgezeichnet.

### Versuchsaufbau und -durchführung

Die betrachtete Biegeaufgabe entspricht einem Biegefaktor von  $B = 1,875$  und einem Wanddickenfaktor von  $W = 20$ . Die geschweißten Rohre haben den Werkstoff X5CrNi18-10 mit der Werkstoffnummer 1.4301 und einen Außendurchmesser von 40 mm. Die Wanddicke beträgt 2 mm und der Biegeradius 75 mm. Das Ziel war es, Stellgrößen zur Beeinflussung der Risswahrscheinlichkeit und der Faltenbildung zu identifizieren und zu untersuchen. Die Biegeaufgabe wurde hinsichtlich der Komplexität aus dem Mittelfeld des Biegediagramms gewählt, siehe Abbildung 2.7. In Abschnitt 6.2 werden eine ähnliche und zwei komplexere Biegeaufgaben untersucht, die ebenfalls in das Biegediagramm eingetragen wurden. Da aufgrund der Qualitätsunterschiede der Rohrbiegungen unterschiedliche Rückfederungswerte auftreten können, wurde der Biegewinkel an der Biegeform für jeden Versuch auf  $90^\circ$  unter Last eingestellt, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die Rohre wurden mit der Schweißnaht nach oben in die Maschine eingeschoben, um die Schweißnähte einer möglichst geringen Dehnung auszusetzen. Die Biegemaschine und die Werkzeuganordnung sind in Abbildung 4.3 dargestellt.

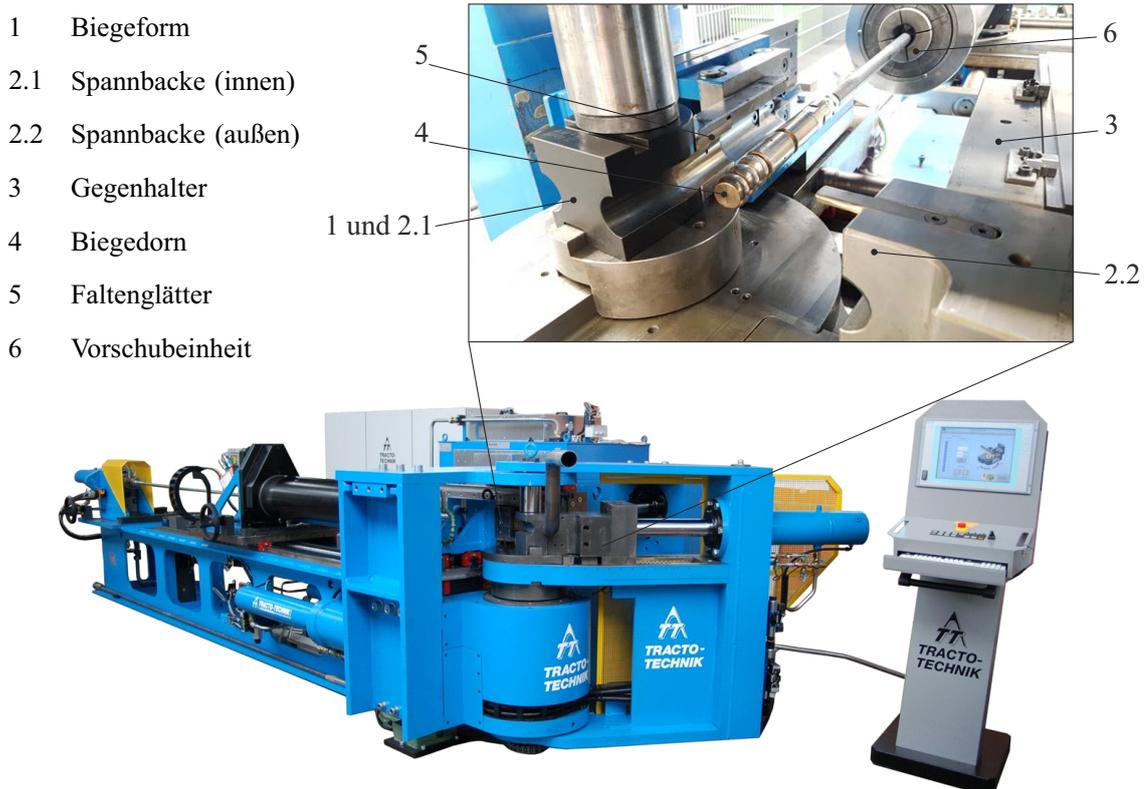


Abbildung 4.3: Lehrstuhleigene Biegemaschine TN 120 und Anordnung der Rotationszugbiegewerkzeuge.

Folgende Prozessparameter wurden hinsichtlich ihres Einflusses auf die Dehnung am Außenbogen und die Faltenbildung am Innenbogen untersucht.

- Gegenhaltergeschwindigkeit in Rohrlängsrichtung,
- Gegenhalterzustellung quer zur Rohrrichtung und
- Vorschubgeschwindigkeit des Transportes

Die Sensitivitätsanalyse der genannten Prozessparameter wurde nach der OFAT-Methode (One factor at a time) nach BANDEMÉR et al. (1994) durchgeführt. Die Parameter wurden demnach einzeln variiert, nicht in Kombination. Dadurch konnten die Veränderungen an den Biegebauteilen eindeutig der Stellgröße zugeordnet werden. In der ersten Versuchsreihe wurde die Gegenhaltergeschwindigkeit in Längsrichtung variiert. Der Gegenhalter wurde in Querrichtung auf Kontakt zum Rohr gefahren und in dieser Richtung fixiert. Das Rohrende wurde in der inneren und äußeren Spannbacke nach HINKEL (2013) gespannt. Das andere Rohrende blieb ungespannt. Der Faltenglätter wurde konventionell positioniert (Abschnitt 4.3). Der Dornschaft des Drei-Gliederdorns wurde so ausgerichtet, dass seine vordere Stirnseite in der Übergangsebene liegt. 5° vor Biegeende wurde der Dorn aus der Umformzone herausgezogen, um einen gleichmäßigeren Materialfluss ohne Kraftspitzen zu erzielen. Die Längsachse des Gegenhalters wurde in drei Einstellungen untersucht. Nach HINKEL (2013) kann der Gegenhalter in Längsrichtung zum Rohr feststehend, mitlaufend oder nachschiebend eingesetzt werden. Zur Vergleichbarkeit wurde ein Geschwindigkeitsfaktor als Quotient aus Werkzeuggeschwindigkeit und Rohrgeschwindigkeit definiert, siehe Gleichung 4.2. Die Rohrgeschwindigkeit wurde anhand der Bogenlänge  $\widehat{l}_{b,Rohr}$  der idealen Rohrmittellinie berechnet. Die Bogenlänge entspricht der Abwicklung des Rohrbogens, siehe Abbildung 4.4.

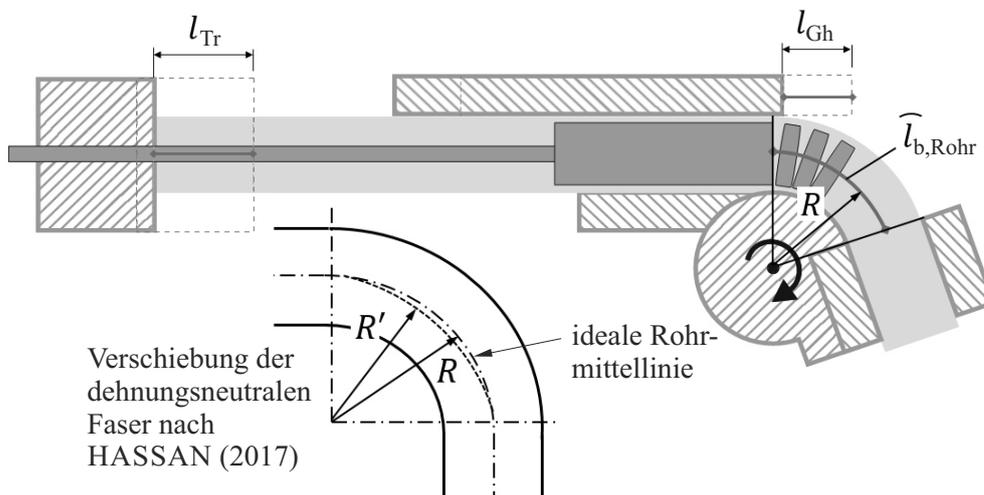


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung des Transportweges  $l_{Tr}$ , des Gegenhalterweges  $l_{Gh}$  sowie der idealen ( $\widehat{l}_{b,Rohr}$ ) und tatsächlichen Bogenlänge des Rohres.

$$f_{v,Gh} = \frac{v_{Gh}}{v_{Rohr}} = \frac{l_{Gh}}{\widehat{l}_{b,Rohr}} \quad \text{und} \quad f_{v,Tr} = \frac{v_{Tr}}{v_{Rohr}} = \frac{l_{Tr}}{\widehat{l}_{b,Rohr}} \quad (4.2)$$

Der feststehende Gegenhalter entspricht einem Geschwindigkeitsfaktor von 0. Der mit Rohrgeschwindigkeit mitfahrende Gegenhalter entspricht theoretisch dem Faktor 1. In Realität stellt sich eine Verlagerung der neutralen Faser, siehe Unterabschnitt 2.1.5, ein. Tatsächlich fahren der Gegenhalter und das Rohr bei einem Geschwindigkeitsfaktor  $< 1$  mit gleicher Geschwindigkeit. Der Vorteil des mitfahrenden Gegenhalters ist, dass die geringe Relativgeschwindigkeit zu weniger Reibung zwischen Werkzeug und Rohr führt. Der nachschiebende Gegenhalter fährt mit einer höheren Geschwindigkeit als das Rohr und kann über die Reibkraft mehr Material in die Umformzone befördern. Dadurch kann die Dehnung am Außenbogen verringert werden. In den Versuchen wurde ein Geschwindigkeitsfaktor von 1,7 eingestellt. Der Gegenhalter wurde entlang einer Geschwindigkeitsrampe beschleunigt. Bei einem Biegewinkel von  $20^\circ$  hat er seine Endgeschwindigkeit erreicht. Eine höhere Beschleunigung des Gegenhalters war bei kleinen Biegewinkeln aufgrund der Kollisionsgefahr mit der äußeren Spannbacke nicht möglich.

### Versuchsergebnisse und Diskussion

Abbildung 4.5 zeigt, dass mit zunehmender Geschwindigkeit des Gegenhalters der Hauptumformgrad am Außenbogen des Rohres von 0,34 auf 0,24 reduziert wird. Das Dehnungsverhältnis steigt von 0,407 auf 0,686. Die Streckung wird, wie in den Formänderungsdiagrammen dargestellt, mit zunehmender Gegenhaltergeschwindigkeit geringer.

Der gemessene Rohrnachlauf während des Biegens  $s_{\text{Rohr}}$  wurde von 105 mm bei feststehendem Gegenhalter auf 117 mm bei nachschiebendem Gegenhalter erhöht. Die Bogenlänge der idealen Rohrmittellinie beträgt bei dieser Biegeaufgabe 117,8 mm. Der Unterschied zwischen dem gemessenen Rohrnachlauf und dem berechneten Weg des Rohres wird durch die Verschiebung der neutralen Faser verursacht. Während des Biegens verlagert sich die dehnungsneutrale Faser in Richtung des Innenbogens, wodurch sich der Rohrnachlauf verringert, siehe Abbildung 4.4. Ein nachschiebender Gegenhalter löst eine überlagerte Druckspannung aus, welche die neutrale Faser im Bogenbereich nach außen drückt.

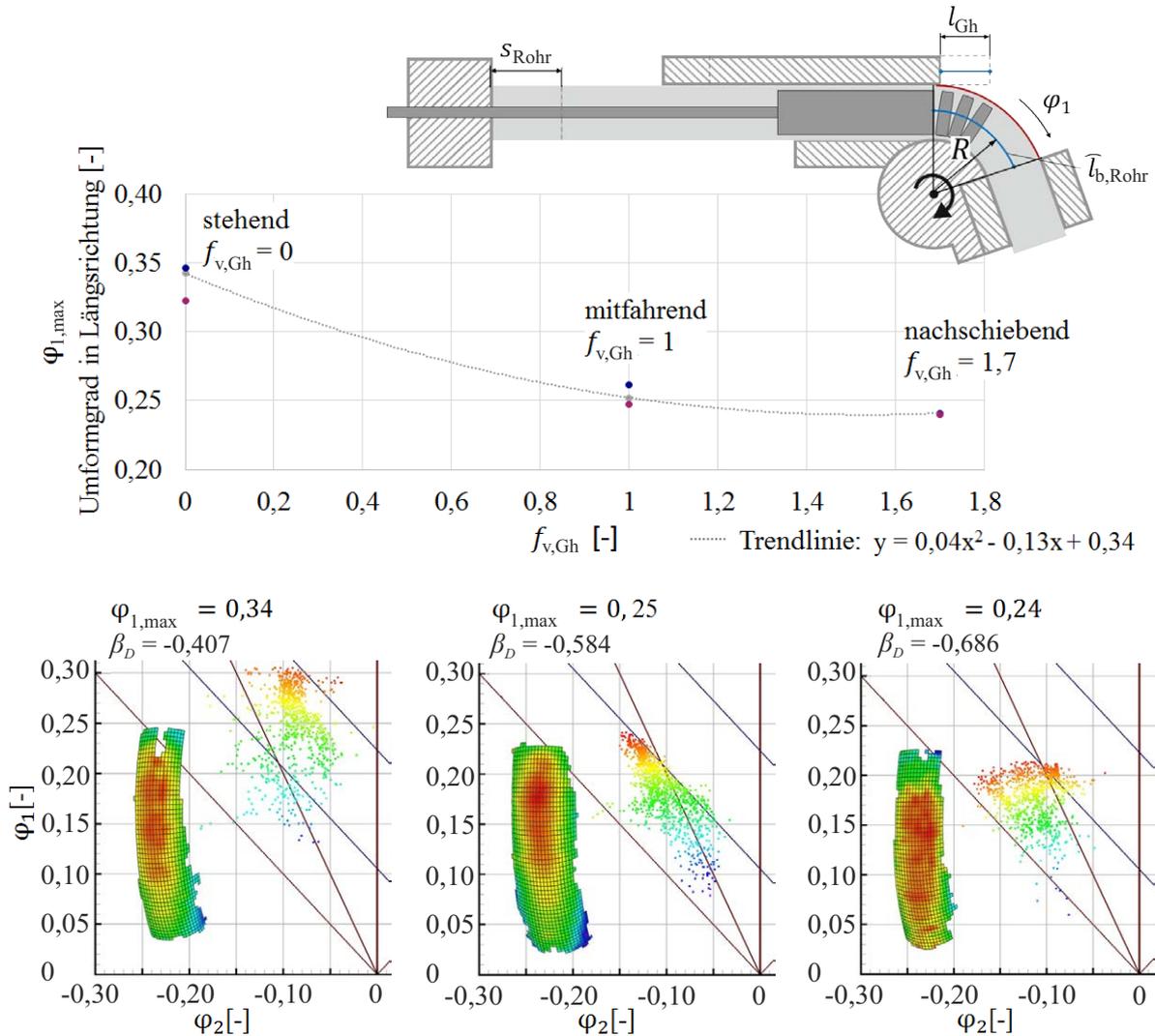


Abbildung 4.5: Einfluss der Geschwindigkeit des Gegenhalters in Längsrichtung auf den Hauptumformgrad  $\varphi_1$  am Rohraußenbogen (Versuchshalbzeug Rohr 1.4301 B = 1,875 W = 20).

Neben der Gegenhaltergeschwindigkeit wurde die Vorschubgeschwindigkeit des Transportes variiert. Der Gegenhalter wurde in Querrichtung auf Kontakt zum Rohr gefahren und in Quer- und Längsrichtung fixiert. Die anderen Werkzeuge behielten die zuvor beschriebenen Einstellungen. Das hintere Rohrende wurde in der Vorschubeinheit fixiert. Dies ermöglichte eine Überlagerung von Zug- oder Druckspannung während der Umformung. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde in fünf Einstellungen variiert. Der Geschwindigkeitsfaktor nach Gleichung 4.2 nahm Werte zwischen 0,89 (Vorschubweg 105 mm) und 1,05 (Vorschubweg 124 mm) an. Abbildung 4.6 zeigt, dass sich mit steigender Vorschubgeschwindigkeit der Hauptumformgrad am Außenbogen von 0,28 auf 0,21 verringert. Das Dehnungsverhältnis steigt von 0,658 auf 1,023. Wie in den Formänderungsdiagrammen dargestellt, nimmt die Streckung des Außenbogens ab.

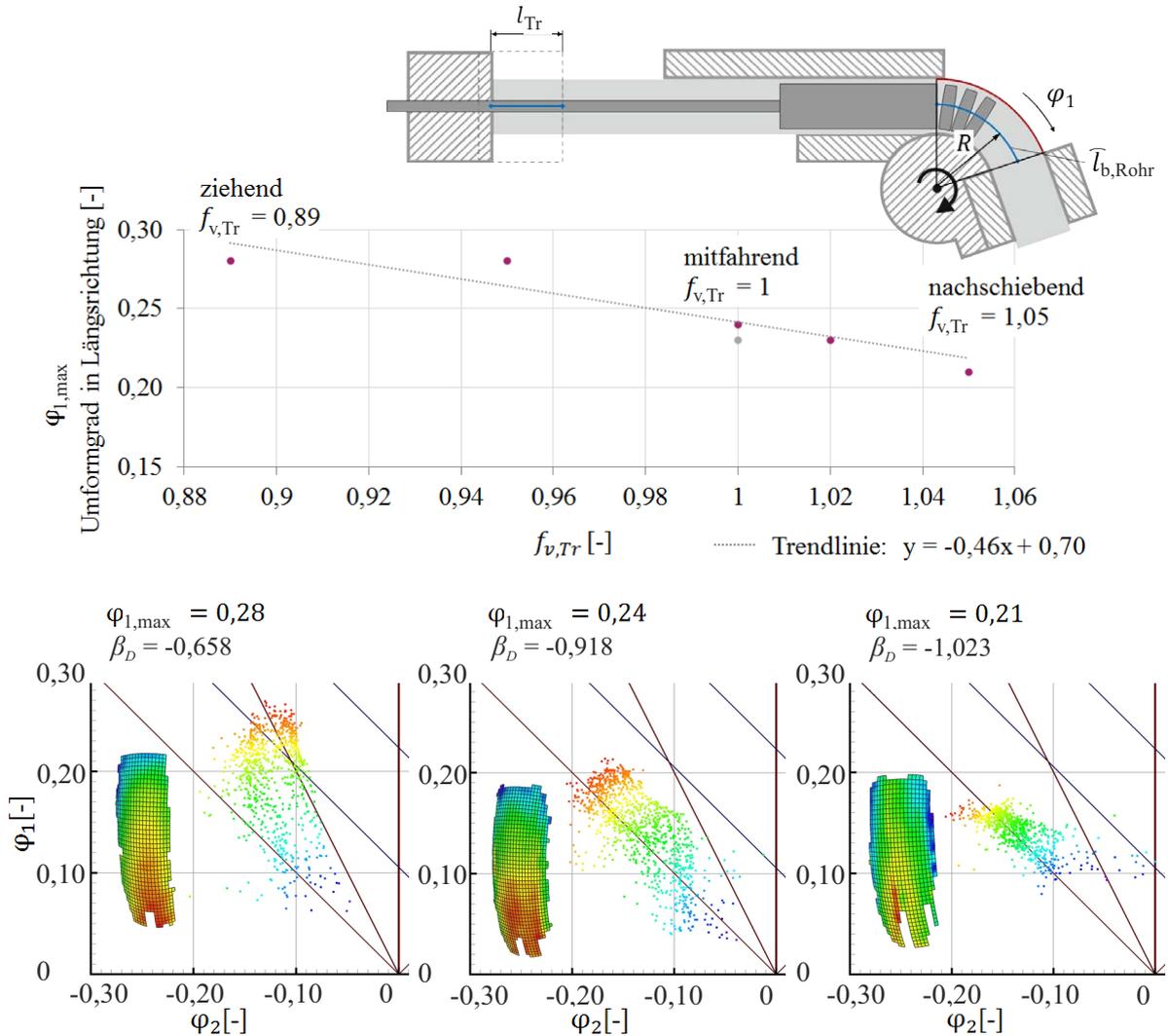


Abbildung 4.6: Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit des Transportes auf den Hauptumformgrad  $\varphi_1$  am Rohraußenbogen (Versuchshalbzeug Rohr 1.4301  $B = 1,875$   $W = 20$ ).

Für die Versuchsreihe zur Sensitivität der Gegenhalterzustellung in Querrichtung blieben die zuvor beschriebenen Werkzeugeinstellungen erhalten. Der Gegenhalter wurde in Längsrichtung fixiert. Die Vorschubgeschwindigkeit des Transportes wurde auf einen Faktor von 1 eingestellt. Untersucht wurde der Einfluss auf die Faltenbildung. Die Gegenhalterzustellung in Querrichtung erfolgte weggeregelt. Bei ihrer Variation wurde die Achse in 0,2 mm-Schritten näher zum Rohr positioniert, was eine Erhöhung der Gegenhalternormalkraft verursachte. Als Nullposition der Gegenhalterzustellung wurde die Einstellung mit den größten Falten gewählt. Der Faltenbewertungsfaktor sinkt mit zunehmender Zustellung des Gegenhalters, siehe Abbildung 4.7 a).

Während bei einer Achsenposition von 0 mm große Falten sichtbar sind, bildeten sich bei einer Zustellung von 0,2 mm kleinere Falten aus. Faltenfreie Rohrbögen wurden bei einer Gegenhalterzustellung von 0,4 mm produziert. Die Falten sind sowohl im geraden Rohrbereich (Primärfalten) als auch im Bogenbereich (Sekundärfalten) vorhanden.

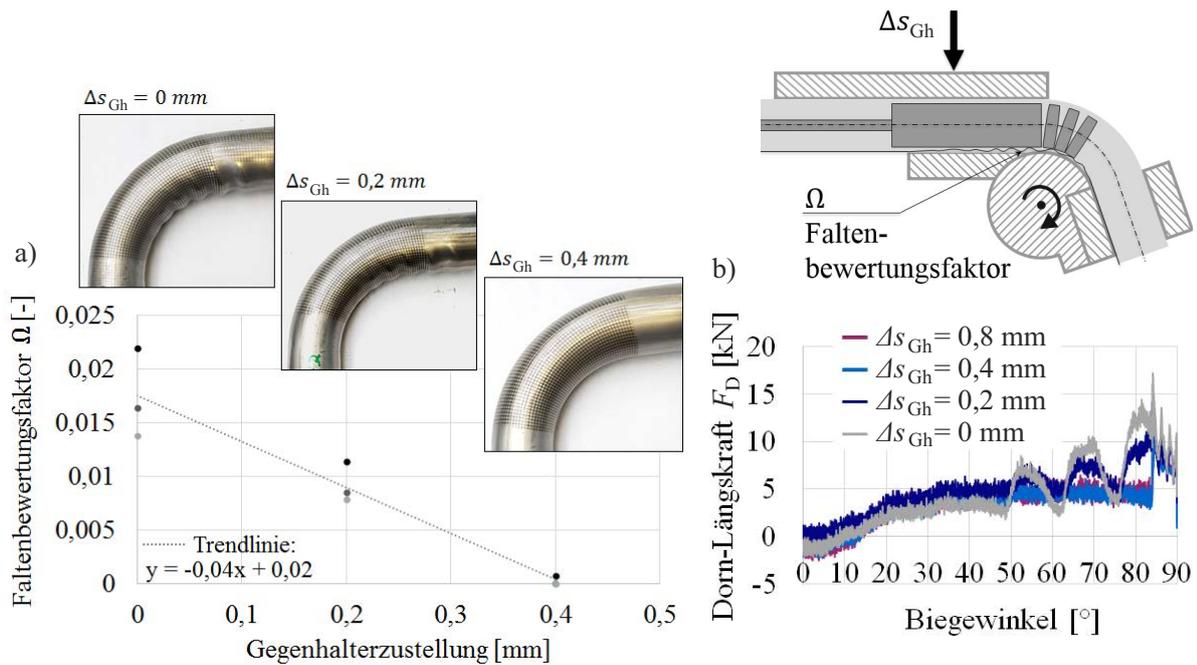


Abbildung 4.7: Einfluss der Gegenhalterzustellung in Querrichtung auf die Faltenbildung am Rohrbinnenbogen (Versuchshalbzeug Rohr 1.4301  $B = 1,875$   $W = 20$ ).

Der Verlauf der Dornlängskraft in Abbildung 4.7 b) weist faltensignifikante Reaktionen auf. Ab einem Biegewinkel von  $48^\circ$  haben sich Kraftanstiege und -abfälle bei faltenbehafteten Rohrbögen ausgebildet. Eine mögliche Ursache für die Kraftverläufe sind Falten, die sich zwischen die Dornglieder setzen und bei fortschreitendem Biegeprozess Anstiege in der Dornlängskraft verursachen. Weiterführende Untersuchungen sind in Unterabschnitt 6.2.4 und 7.2.2 beschrieben.

Die Werkzeugeinstellungen bei größter Faltenbildung werden als Referenz genommen, um den Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit des Transportes auf die Faltenbildung zu untersuchen. Abbildung 4.8 a) zeigt, wie eine Reduzierung der Vorschubgeschwindigkeit auf das 0,89-fache der Rohrgeschwindigkeit zu einem faltenfreien Rohr führt. Die Variation der Gegenhaltergeschwindigkeit in Längsrichtung besitzt bei diesen Versuchen keinen signifikanten Einfluss auf die Faltenbildung.

Die Normalkraft des Gegenhalters nimmt bei konstanter Achsenposition mit sinkender Vorschubgeschwindigkeit des Transportes ab, siehe Abbildung 4.8 b).

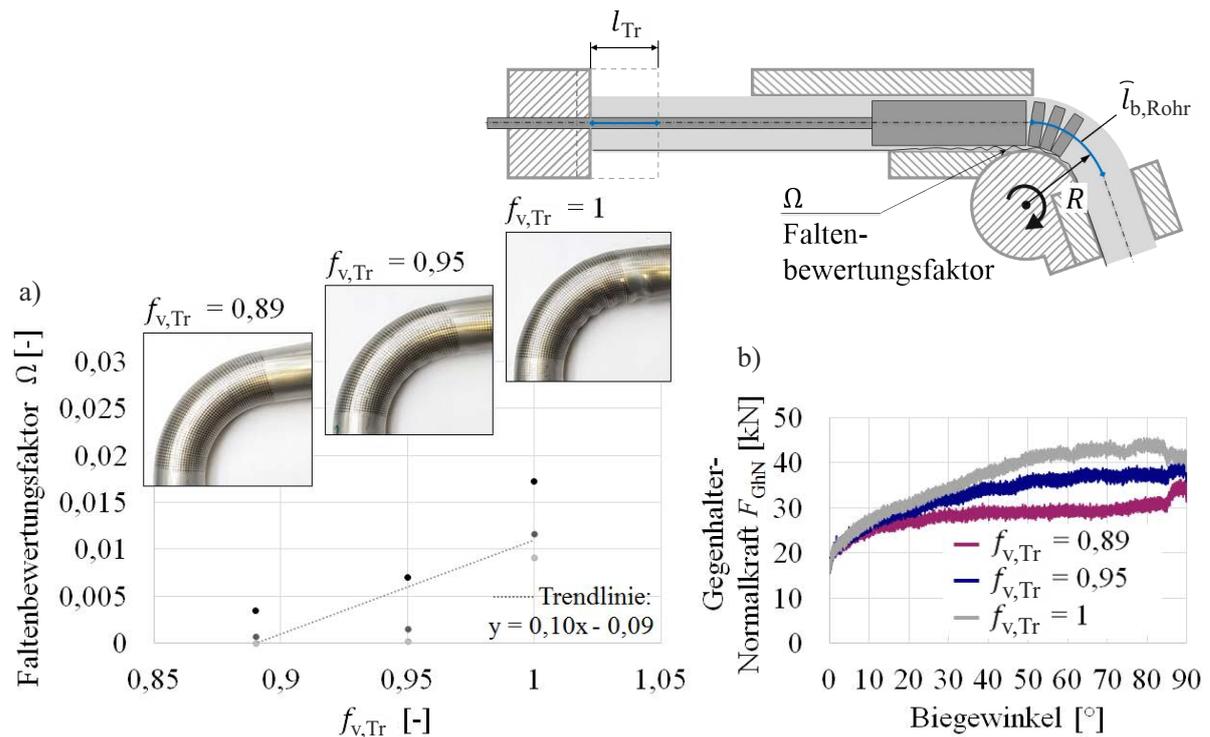


Abbildung 4.8: Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit des Transportes auf die Faltenbildung am Rohrrinnenbogen (Versuchshalbzeug Rohr 1.4301 B=1,875 W=20).

Zusammenfassend kann die Dehnung am Außenbogen beim Rotationszugbiegen durch einen mitfahrenden oder nachschiebenden Gegenhalter reduziert werden. Die durch Reibung nach HINKEL (2013) überlagerte Druckspannung sorgt für eine Verringerung der Risswahrscheinlichkeit. Mit dem Transportvorschub kann ebenfalls eine überlagerte Druckspannung erzeugt und mehr Material in die Umformzone geschoben werden, um Rissen entgegenzuwirken.

Eine Zustellung des Gegenhalters in Querrichtung zum Rohr kann Falten verhindern. Mit steigender Gegenhalternormalkraft nimmt die Faltenausprägung ab. Eine überlagerte Zugspannung durch Reduzierung der Vorschubgeschwindigkeit des Transportes verringert ebenfalls die Faltenbildung. In Abbildung 4.9 sind die Einflüsse der Gegenhalterzustellung und der Transportgeschwindigkeit auf die Faltenbildung zusammengefasst dargestellt.

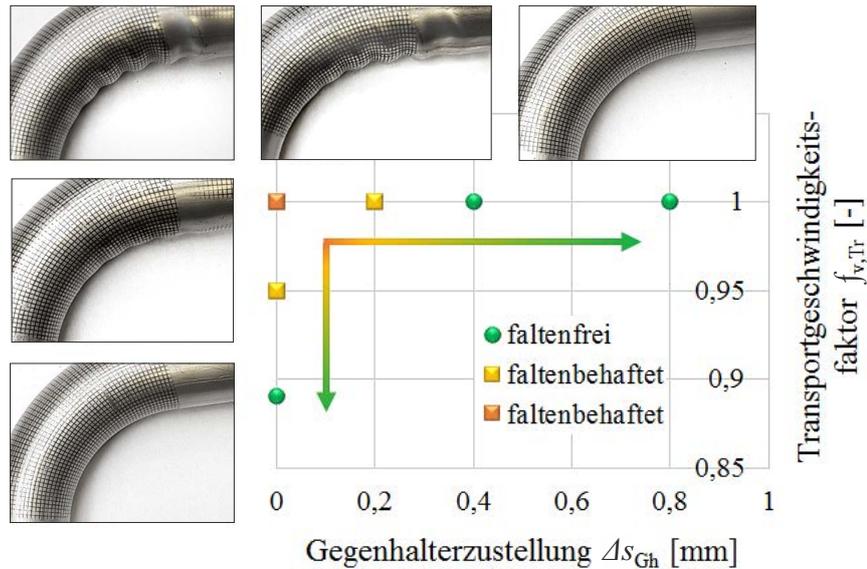


Abbildung 4.9: Einfluss der Gegenhalterzustellung und der Vorschubgeschwindigkeit des Transportes auf die Faltenbildung beim Rotationszugbiegen.

Falten lösten bei der untersuchten Biegeaufgabe (Rohr 1.4301  $B = 1,875$   $W = 20$ ) an dem Verlauf der Dornlängskraft signifikante Reaktionen aus. Es lassen sich Rückschlüsse auf den Entstehungszeitpunkt und die Höhe der Falten ziehen. Die Erkenntnisse über die Dornkraft als Faltenindikator und die Prozessparameter zur Reduzierung der Falten wurden durch Versuche und Berechnungen weiterer Biegeaufgaben untersucht, die in Abschnitt 6.2 beschrieben sind.

### 4.1.3 CBR-Systeme - Case-based reasoning

Die Ergebnisse der Untersuchungen bilden die Wissensbasis für ein Case-based reasoning-System (CBR), das an der Biegemaschine implementiert wurde, vgl. ABELE et al. (2016), DE CARVALHO et al. (2018) und BORCHMANN et al. (2019). Ein CBR-System birgt das Potenzial, Maschinenbediener bei der Einstellung des Biegeprozesses zu unterstützen, um fehlerfreie Bauteile zu produzieren. Der Aufbau intelligenter CBR-Systeme basiert auf einem Ansatz zur Modellierung des menschlichen Denkens. Nach BERGMANN et al. (1998) hat die Informationstechnik gezeigt, dass es leichter fällt, einen vorhandenen Fall auf eine neue Problemstellung zu übertragen, als eine Einzellösung von Grund auf neu herzuleiten. Das CBR-System speichert und sortiert praxisrelevante Fälle und stellt sie den Maschinenbedienern zur Verfügung, vgl. Abbildung 4.10. Dies ermöglicht nach KOLODNER (2014) den Maschinenbedienern eine durch Interpolation und Extrapolation erreichte technische Abschätzung des Zielsystems.



ner werden in absteigender Reihenfolge weitere Empfehlungen angezeigt, die bei weniger ähnlichen Biegeaufgaben zum Erfolg geführt haben. Die entwickelte Programmoberfläche wurde von der LACHMANN & RINK GMBH, Freudenberg, programmiert und ist in Abbildung 4.11 dargestellt.

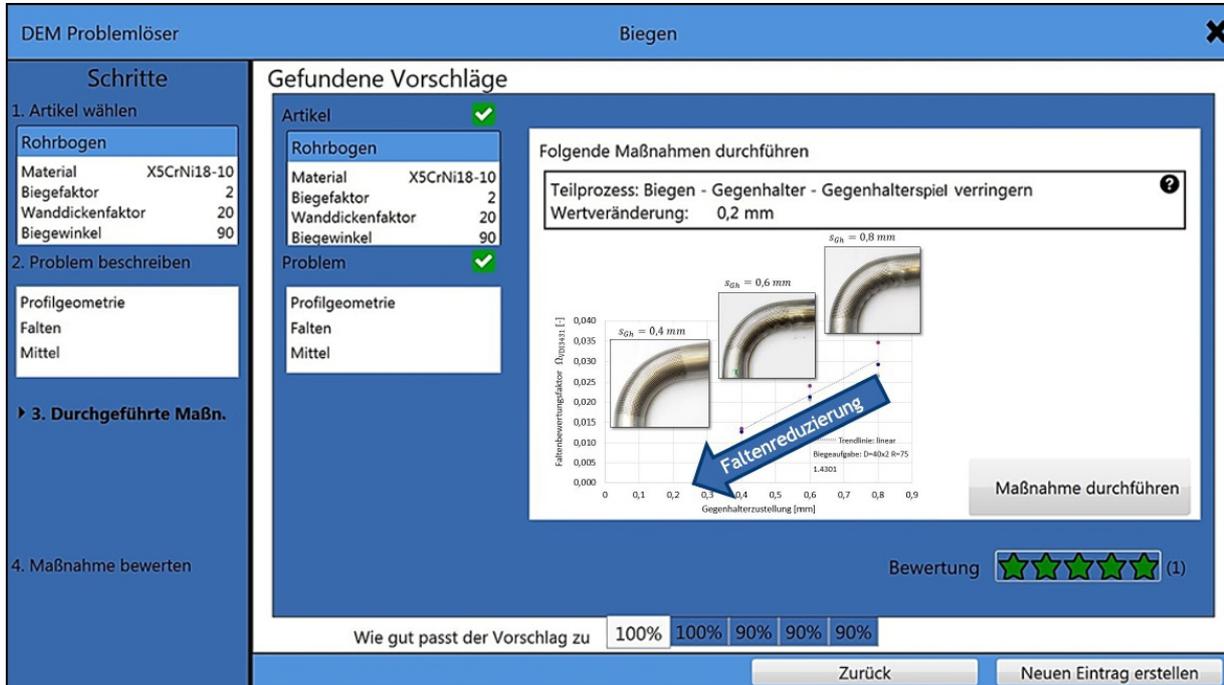


Abbildung 4.11: Programmoberfläche des entwickelten Case-based reasoning-Systems mit den Arbeitsschritten *Artikel auswählen*, *Problem beschreiben*, *gefundenen Vorschlag auswählen & umsetzen* und *umgesetzte Maßnahme bewerten*.

Der Bediener gibt ein, für welche Abhilfemaßnahme er sich entschieden hat und ob diese Maßnahme erfolgreich war. Das Feedback ist wichtig, damit das Programm den neuen Fall in seiner Auswertung einordnen kann. Der Einstellprozess einer Maschine und der Anlernprozess unerfahrener Bediener kann mit einem CBR-System verkürzt werden. Der Maschinenbediener als Sensor und ein Computer mit Eingabemöglichkeit (Integration in das HMI denkbar) sind Voraussetzungen, um ein CBR-System an einer Maschine zu implementieren. CBR-Systeme unterstützen das *Organisational Memory* (DE CARVALHO et al. 2008) eines Unternehmens und stellen eine Möglichkeit zur Erfassung und Darstellung von Fachwissen dar.

## 4.2 Einfluss der Steifigkeiten der Maschinenachsen

Nach DOEGE & BEHRENS (2007), MERKLEIN et al. (2009) und KUHNHEN et al. (2018) ist die Steifigkeit der Maschinenachsen bei Untersuchungen des Materialflusses von entscheidender Bedeutung. Im Folgenden werden FE-Simulationen von Rotationszugbiegeversuchen unter Variation der Achsensteifigkeit beschrieben, um ihren Einfluss auf die Faltenbildung zu untersuchen.

### 4.2.1 Werkzeug- und Achsensteifigkeit

Die Steifigkeit einer Maschinenachse beschreibt die unbeabsichtigte Bewegung der Werkzeuge unter Prozesskräften. Anfangsverlagerungen und -kippen werden durch ein Setzverhalten der Werkzeughalter oder Führungen, die sich zwischen Werkzeug und Achsantrieb befinden, verursacht. Zug- und Druckkräfte können nach DOEGE & BEHRENS (2007) zudem zu Verlagerungen und Durchbiegungen innerhalb des Achsenaufbaus führen, siehe Abbildung 4.12. Anders als die Steifigkeit der Maschinenachse beschreibt die Werkzeugsteifigkeit die elastische Verformung der Werkzeuge. Abhängig von dem Elastizitätsmodul werden die Werkzeuge unter Druckspannung zusammengedrückt, was lokal zu Abständen zwischen den Werkzeugen und dem Rohr während des Biegeprozesses führen kann.

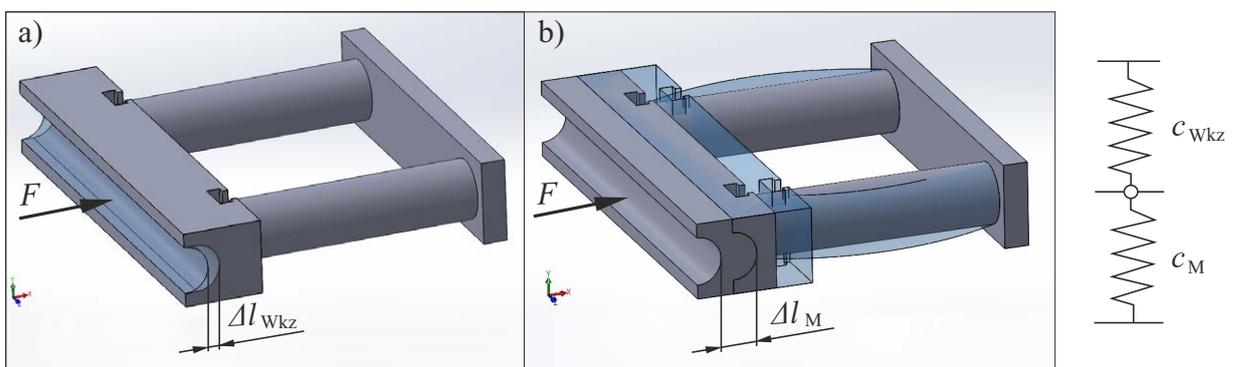


Abbildung 4.12: Schematische, vergrößerte Darstellung a) der Werkzeugsteifigkeit als elastische Verformung des Werkzeugs unter Last und b) der Maschinensteifigkeit als Verlagerung innerhalb des Achsenaufbaus aufgrund von Setzverhalten, Kippungen und Durchbiegung unter Last.

Nach DOEGE & BEHRENS (2007) kann die Werkzeugsteifigkeit anhand der Kraft  $F$ , der Anlagefläche  $A_{Wkz}$  (hier: projizierte Fläche der Kavität), dem Elastizitätsmodul ( $E$ -Modul) des Werkzeugs und der Auslanglänge  $l_{Wkz}$  in Kraftrichtung berechnet werden, siehe Gleichung 4.3 und 4.4.

$$\sigma = \frac{F}{A_{Wkz}} = E \cdot \frac{\Delta l_{Wkz}}{l_{Wkz}} \quad (4.3)$$

$$c_{Wkz} = \frac{F}{\Delta l_{Wkz}} = \frac{E \cdot A_{Wkz}}{l_{Wkz}} \quad (4.4)$$

Die Werkzeugnachgiebigkeit ist an der Biegemaschine TN 120 kleiner als die Achsenachgiebigkeit. Wirkt eine Kraft von 90 kN auf den Gegenhalter (Länge 350 mm, Kavität  $\varnothing 40$  mm, Tiefe  $l_{Wkz} = 40$  mm), beträgt die Verlagerung  $\Delta l_{Wkz} = 0,003$  mm. Der  $E$ -Modul des Werkzeugs wurde mit  $210 \text{ kN/mm}^2$  angenommen. Die in praktischen Versuchen gemessenen Achsenverlagerungen am vorderen und hinteren Ende des Gegenhalters betragen bei einer Kraft von je 45 kN  $\Delta l_{M,v} = 0,4$  mm (vorne) und  $\Delta l_{M,h} = 0,34$  mm (hinten), siehe Abschnitt 5.3. In den folgenden FE-Simulationen wurden die Werkzeuge als Starrkörperelemente (ohne  $E$ -Modul) und die Maschinenachse über Federelemente an den Werkzeugen simuliert.

KERSTEN (2013) hat Steifigkeitsmessungen an der Biegemaschine TN 120 (Unterabschnitt 4.1.2) durchgeführt. Er untersuchte einen Freiformbiegeprozess, bei dem die Achsensteifigkeit von besonderer Bedeutung ist, da der kinematische Prozess sehr empfindlich auf Werkzeugverlagerungen reagiert. Nach KERSTEN (2013) liegen die Federsteifigkeiten der Biegemaschine zwischen 30 kN/mm und 160 kN/mm, daher wurden in dieser Untersuchung Parametereinstellungen in diesem Bereich vorgenommen. Die Krafrichtungen der Freiformbiegewerkzeuge unterscheiden sich von denen der Rotationszugbiegewerkzeuge, daher können die Steifigkeiten nicht übertragen werden. Sie liegen aber in der gleichen Größenordnung. Um die Empfindlichkeit der Achsensteifigkeit hervorzuheben und damit eine bessere Äquivalenz zu schaffen, wurde für alle Achsen die gleiche Steifigkeit angewendet. Von diesem Wert aus wurden Steifigkeitsvariationen bei höheren und niedrigeren Federraten durchgeführt.

#### 4.2.2 Modellaufbau der Finite-Elemente-Simulationen des Rotationszugbiegeprozesses

FE-simulierte Biegeversuche wurden mit Rohren aus dem Werkstoff X5CrNi18-10 mit der Werkstoffnummer 1.4301 mit einem Biegefaktor von  $B = 1,5$  und einem Wanddickenfaktor von  $W = 40$  durchgeführt. Das Halbzeug hat einen Außendurchmesser von 40 mm und eine Wanddicke von 1 mm. Der Biegewinkel an der Biegematrize wurde auf  $90^\circ$  eingestellt. Der FE-Simulationsaufbau ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Als Beispiel ist der Wanddickenverlauf eines Rohrbogens mit Falten dargestellt.

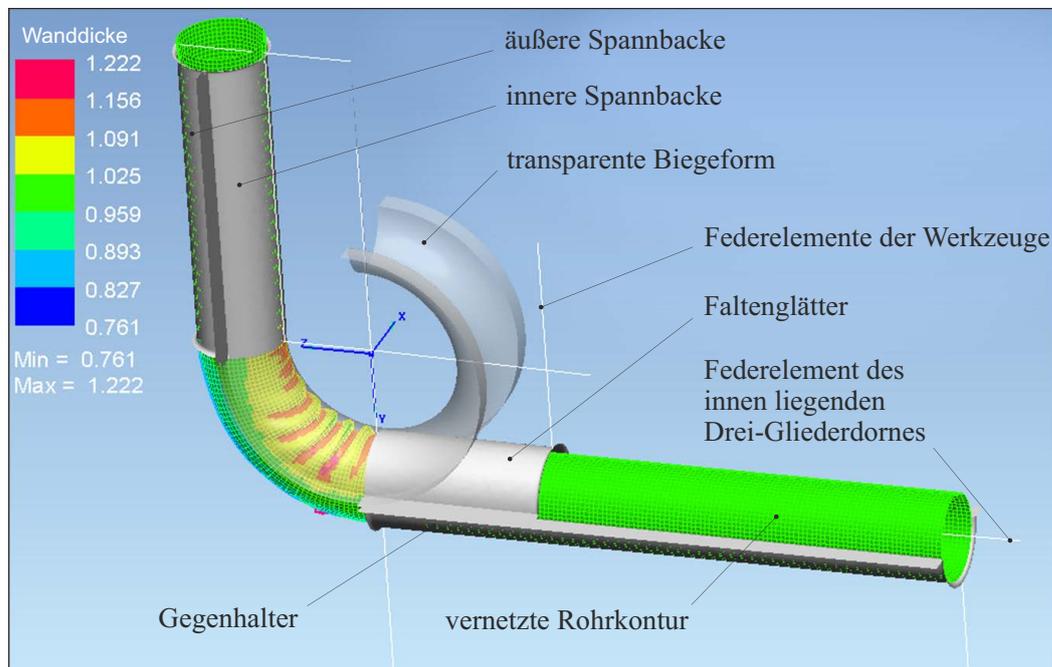


Abbildung 4.13: Aufbau der FE-Simulationen am Beispiel eines faltenbehafteten Rohrbogens.

Die Streckgrenze  $R_{p0,2} = 390 \text{ N/mm}^2$ , Zugfestigkeit  $R_m = 690 \text{ N/mm}^2$  und Gleichmaßdehnung  $\varepsilon_{gl} = 50 \%$  wurden eingegeben und die Fließkurve nach SWIFT (1952) berechnet. Der Elastizitätsmodul wurde auf  $210 \text{ kN/mm}^2$  gesetzt. Es wurde ein isotropes Verhalten nach VON MISES als Spezialfall von HILL 48 angenommen. Es wurde das FE-Simulationsprogramm *Pam Stamp Professional 2019.0* der ESI-GROUP, Neu-Isenburg, verwendet. Das verwendete Unterprogramm *Pam-Tube* ist spezialisiert auf Rohrbiegesimulationen von komplexen Bauteilen mit kleinen Biegeverhältnissen. Das Halbzeug in der FE-Simulation hat eine Länge von 500 mm und wurde mit 62 Schalenelementen in Umfangsrichtung und 248 Schalenelementen in Längsrichtung vernetzt. Die Mittelfläche des Rohres wurde mit verformbaren quadratischen Schalenelementen vom Typ BELYTSCHKO-TSAY und die Werkzeuge mit Starrkörperelementen modelliert. Die Reibung zwischen Werkzeugen und Rohr wurde nach COULOMB beschrieben. Der Reibungskoeffizient wurde auf 0,15 gesetzt, außer für die Spannbacken, denen ein Koeffizient von 0,3 zugewiesen wurde. Die Koeffizienten wurden nach den Messungen der Reibungsversuche für das Rotationszugbiegen nach HINKEL (2013) gewählt. Der Gliederdorn wurde als Mehrkörpersystem ausgelegt. Die Bewegung zwischen den Dornkugeln und dem Dornschaft wird daher kinematisch durch Gelenke eingeschränkt.

Bei den Untersuchungen wurden sowohl eine faltenbehaftete als auch eine faltenfreie Rohrbiegung als Referenzbiegung verwendet. Als Nullposition der Gegenhalterzustellung  $\Delta s_{GH}$  wurde die Einstellung der faltenbehafteten Biegung gewählt. Der faltenfreie Rohrbogen wurde mit einer um 1 mm näher zum Rohr zugestellten Gegenhalterachsenposition gebogen. Beide Rohrbögen wurden hinsichtlich des Einflusses der Maschinenachsensteifigkeit auf die Faltenbildung untersucht.

### Implementierung der Federelemente

Im Gegensatz zu ideal feststehenden Werkzeugen wurden in den FE-Simulationen sechs Federelemente eingebaut, an denen die Werkzeugknoten befestigt wurden. Wird ein Werkzeug während des Biegevorgangs mit einer Kraft belastet, federt es entsprechend der eingegebenen Federrate zurück. In dem FE-Simulationsprogramm wird das Federelement mit Stabelementen modelliert. Dort wird die Federrate über eine Kraft-Weg-Kurve definiert. Der Gegenhalter und der Faltenglätter wurden an zwei quer zum Rohr verlaufenden Federelementen befestigt. Beide Werkzeuge sind frei drehbar und nicht verschiebbar. Der Dorn wurde an einem Federelement in Längsrichtung und die Biegeform an einem Federelement in Querrichtung befestigt. Für die Parametervariationen wurden alle Federelemente mit der gleichen Federrate belegt und um die gleichen Werte variiert, um den Einfluss der Maschinenachsen mit geringer Steifigkeit im Vergleich zu den Maschinenachsen mit hoher Steifigkeit zu untersuchen. Die Biegeform wurde in Längsrichtung zum Rohr fixiert, da die Maschine in dieser Achse besonders steif ist und keine großen Verschiebungen zu erwarten sind. Abbildung 4.14 zeigt die Anordnung der Werkzeuge und der Federelemente.

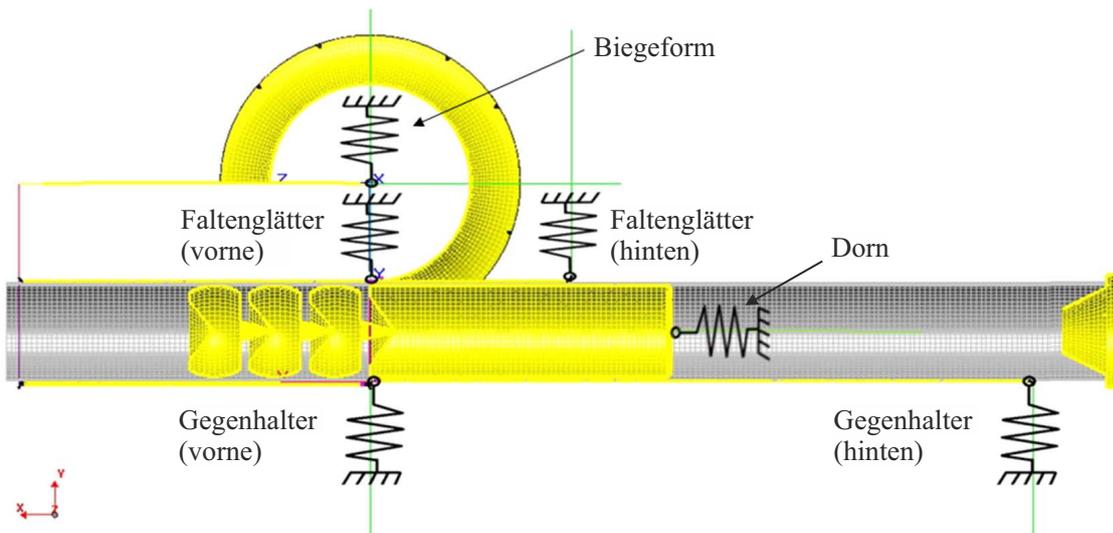


Abbildung 4.14: Anordnung der Werkzeuge und der Federelemente in den FE-Simulationen zur Untersuchung des Einflusses der Werkzeugfederrate auf die Faltenbildung am Rohrbinnenbogen.

Die FE-Simulationen bestehen aus vier Stufen. Die erste Stufe entspricht einem Vorprozess, bei dem sich die äußere Spannbacke nach außen bewegte, so dass ein Abstand zur Rohraußenwand entstand. Die zweite Stufe entspricht dem Spannvorgang, bei dem zwei Federelemente an den Enden der äußeren Spannbacke aktiviert wurden und diese mit einer Kraft von 70 kN gegen das Rohr zogen. Daran schließt sich als dritte Stufe der Biegevorgang an, bei dem alle Federelemente des Werkzeugs aktiviert wurden. Die Biegeform rotierte, bis unter Last ein Biegewinkel von  $90^\circ$  erreicht wurde. Die letzte Stufe ist der Rückfederungsprozess. Die Rückfederung der Rohrbiegung wurde nach dem Biegen simuliert. Alle FE-Simulationen wurden mit dem gleichen Solver der genannten Software *Pam Stamp* durchgeführt.

Die Spannbackenlänge von 140 mm wurde entsprechend der Gleichungen nach HINKEL (2013) gewählt, damit das Rohr durch die Spannkraft nicht plastifiziert. Die Biegeform definiert die Biegeachse, um die sich das Rohr, die Spannbacken und die Biegeform drehen. Durch das Federelement der Biegeform konnte sich die Position der Biegeachse verändern. Die äußere Spannbacke wurde mit Federelementen gegen das Rohr gezogen. Die Federelemente waren an der Biegeform befestigt, um Positionsänderungen der Biegeachse zu übernehmen. Dadurch wurde eine ausreichende Spannkraft unabhängig von der Position der Biegeform und der Biegeachse gewährleistet. Die Federelemente der Spannbacken haben in allen FE-Simulationen die gleiche Federrate, um eine ausreichende Spannkraft zu gewährleisten.

### Bewertung der Faltenbildung mittels Bewertungsfaktor

Die Faltenbildung an den Rohrbögen wurde entsprechend dem in Unterabschnitt 4.1.1 beschriebenen Vorgehen ausgewertet. Anstelle der Oberflächenscans wurden die Oberflächennetze der Rückfederungsstufe aus den FE-Simulationen abgeleitet. Die Oberflächennetze wurden in die Software *Poly-Works 2016* (Unterabschnitt 4.1.1) als Polygonmodell importiert. Der Faltenbewertungsfaktor entspricht der Differenz zwischen der durch die FE-Simulationen berechneten Rohrkonturen und der Zielkontur.

### 4.2.3 Versuchsergebnisse und Diskussion zur Untersuchung der Achsensteifigkeiten

In den nachfolgend beschriebenen Ergebnissen wurde der Einfluss der Maschinenachsensteifigkeit auf die Faltenbildung untersucht. Abbildung 4.15 zeigt die Faltenbewertungsfaktoren in Abhängigkeit von den Federsteifigkeiten der Achsen. Bei einem faltenfreien Ausgangszustand (Gegenhalterzustellung  $\Delta s_{\text{Gh}} = 1 \text{ mm}$ ) und einer Achsensteifigkeit von 1000 kN/mm wurden annähernd keine Falten gebildet. Der Faltenbewertungsfaktor beträgt hier 0,001. Durch die Reduzierung der Steifigkeit auf 100 kN/mm und 50 kN/mm steigt der Faltenbewertungsfaktor und damit die Größe der Falten leicht an. Bei einer Reduzierung auf Steifigkeiten von 10 kN/mm und 2 kN/mm steigt der Faltenbewertungsfaktor mit Werten über 0,013 stark an.

Bei einem faltenbehafteten Ausgangszustand (Gegenhalterzustellung  $\Delta s_{\text{Gh}} = 0 \text{ mm}$ ) und einer Achsensteifigkeit von 1000 kN/mm sind mit einem Faltenbewertungsfaktor von 0,004 Falten zu erkennen. Abbildung 4.15 zeigt, dass die Faltenbildung dieses Rohrbogens durch Reduzierung der Achsensteifigkeit erhöht wird. Der Anstieg des Faltenbewertungsfaktors ist flacher als bei einem faltenfreien Ausgangszustand.

Die Achsenverlagerungen wurden anhand der Positionen der Netzkpunkte der Werkzeuge vor und nach der Umformung gemessen. Die Netzkpunkte lagen an den Belastungspunkten der Federelemente, siehe Abbildung 4.14. Die Positionen der Belastungspunkte bei einem Biegewinkel von  $0^\circ$  wurden mit den Positionen bei einem Biegewinkel von  $90^\circ$  verglichen. Die Verlagerungen der Werkzeuge wurden in vertikaler Richtung, nur bei dem Dorn in horizontaler Richtung, entsprechend des Hauptkoordinatensystems der FE-Simulationen gemessen.

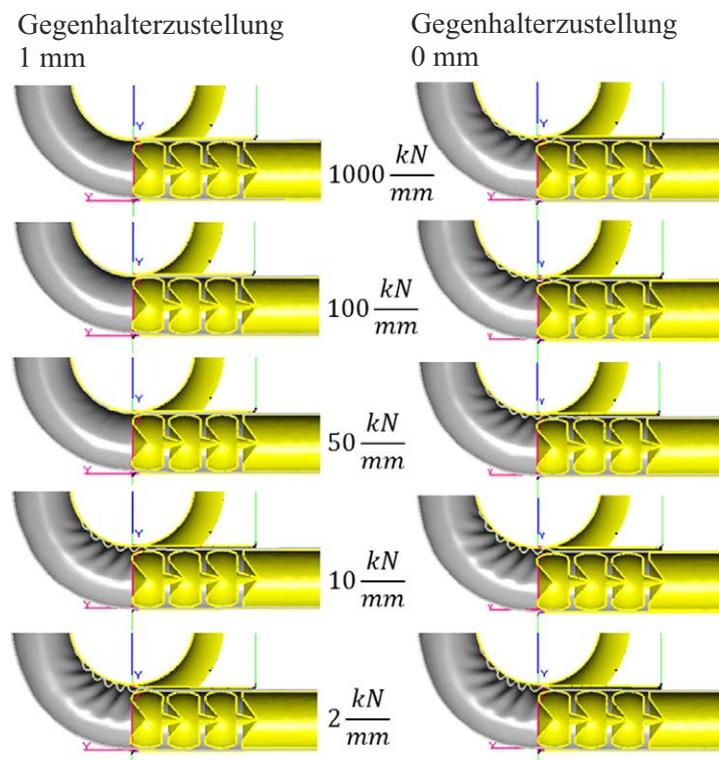
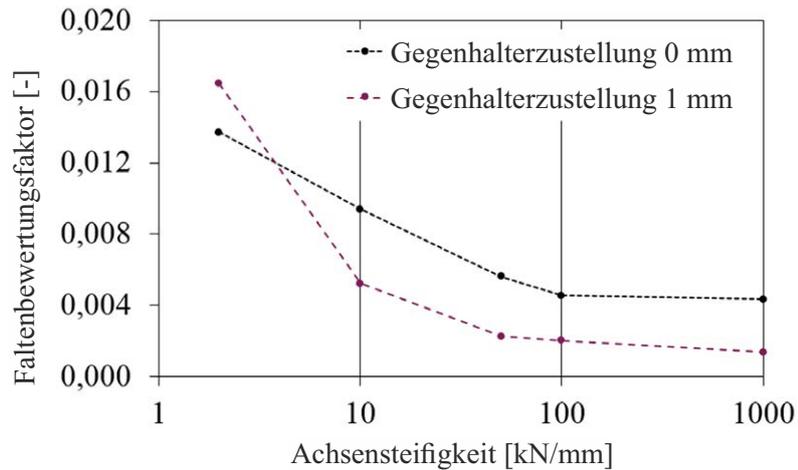


Abbildung 4.15: Verlauf der Faltenbewertungsfaktoren in Abhängigkeit von den Achsensteifigkeiten (gleiche Steifigkeiten an sechs verschiedenen Achsen) beim Rotationszugbiegen.

Tabelle 4.1 zeigt die Verlagerungen der Maschinenachsen bei einem faltenfreien Ausgangszustand ( $\Delta s_{\text{Gh}} = 1 \text{ mm}$ ) und bei einem faltenbehafteten Ausgangszustand ( $\Delta s_{\text{Gh}} = 0 \text{ mm}$ ).

Tabelle 4.1: Verlagerungen der Achsen unter Last in Abhängigkeit von den Achsensteifigkeiten beim Rotationszugbiegen bei Gegenhalterzustellungen von 1 mm und 0 mm.

Federsteifigkeiten [kN/mm]	Achsenverlagerung [mm] bei einer Gegenhalterzustellung von 1 mm					Achsenverlagerung [mm] bei einer Gegenhalterzustellung von 0 mm				
	Gegenhalter		Falten-glätter	Biege-form	Dorn	Gegenhalter		Falten-glätter	Biege-form	Dorn
	vorne	hinten				vorne	hinten			
2	0,71	0,67	0,53	1,48	5,7	0,94	0,19	0,77	2,44	4,68
10	0,61	0,23	0,26	0,26	1,81	0,90	0,20	0,47	0,29	2,07
50	0,18	0,06	0,01	-0,12	0,49	0,18	0,07	0,07	-0,04	0,29
100	0,07	0,04	0,01	-0,12	0,23	0,1	0,04	0,04	-0,17	0,16
1000	0,01	0,00	0,01	-0,20	0,01	0,01	0,00	0,01	-0,23	0,01

Eine Reduzierung der Achsensteifigkeit führt zu einer Erhöhung der Achsenverlagerungen. Der Gegenhalter verlagert sich bei faltenfreier Ausgangsposition ( $\Delta s_{\text{Gh}} = 1 \text{ mm}$ ) vorne um bis zu 0,71 mm und hinten um bis zu 0,67 mm. Bei faltenbehafteter Ausgangssituation ( $\Delta s_{\text{Gh}} = 0 \text{ mm}$ ) verlagert er sich vorne um bis zu 0,94 mm und hinten um bis zu 0,19 mm. Bei einer Achssteifigkeit von 2 kN/mm verschiebt sich die Biegeform mit 1,48 mm ( $\Delta s_{\text{Gh}} = 1 \text{ mm}$ ) und 2,44 mm ( $\Delta s_{\text{Gh}} = 0 \text{ mm}$ ) besonders stark. Die Dornverschiebung in Längsrichtung ist ebenfalls stark ausgeprägt. In Tabelle 5.2 aus Abschnitt 5.3 werden die an der Biegemaschine gemessenen Steifigkeiten aufgeführt. Dadurch können den Werkzeugachsen unterschiedliche Steifigkeiten zugeordnet werden. Ein Vergleich zeigt, dass die gemessenen Steifigkeiten keinem linearen Verlauf entsprechen. Krafterhöhungen verursachen zunächst kleine, dann zunehmende Verlagerungen, siehe Abschnitt 5.3.

Beim Rotationszugbiegen können bereits kleine Falten für die weitere Verwendung des Bauteils von Bedeutung sein. Das werkzeuggebundene Verfahren wird aufgrund seiner umfangreichen Kraftübertragung eingesetzt, wenn nur geringe Formabweichungen am Bauteil zulässig sind. In der Fluidtechnik können beispielsweise bei der Verwendung von Hydraulikschläuchen nach KUHNHEN (2016) bereits kleine Falten zu unerwünschten Verwirbelungen und damit zu Druckverlusten führen. Die Untersuchung zeigt, dass die Steifigkeiten der Maschinenachsen die Faltenbildung beim Rotationszugbiegen beeinflussen. Falten bilden sich dort aus, wo sich Abstände zwischen Werkzeugen aufgrund der Achsenverschiebungen bilden. Die berechneten Falten erreichen bei Steifigkeitswerten zwischen 2 kN/mm und 100 kN/mm Faltenbewertungsfaktoren bis zu 0,016. Auch bei einer Verringerung der Achsensteifigkeit von 1000 kN/mm auf 100 kN/mm werden Faltenausprägungen verstärkt.

Anhand der Ergebnisse dieser Untersuchung und in Zusammenhang mit den Ergebnissen aus Unterabschnitt 6.2.4 kann die Empfehlung festgehalten werden, dass für den Aufbau eines FE-Simulationsmodells Maschinensteifigkeiten gemessen werden sollten und als Eingangsgrößen in das Modell einfließen sollten, um den Werkstofffluss realitätsnah abbilden zu können.

### 4.3 Einfluss der Faltenglättergeometrie

Der Faltenglätter ist ein Bestandteil des Werkzeugsatzes für das Rotationszugbiegen, welcher bei kleinen Biegeradien und geringen Wanddicken eingesetzt wird. Er liegt in der Kavität der Biegeform an und schließt den Freiraum zwischen Biegeform und geradem Rohrabschnitt, siehe Abbildung 2.3. Die Faltenausprägung kann durch die Verringerung des Freiraums zwischen Werkzeug und Rohr reduziert werden. Durch den Einsatz eines Faltenglätters und eines Biegedorns können Kräfte über den Gegenhalter, den Biegedorn und das Rohr auf den Faltenglätter übertragen werden. Die in radialer Rohrrichtung induzierten Druckspannungen wirken nach KUHNHEN (2016) und BORCHMANN et al. (2019) Falten entgegen, siehe auch Unterabschnitt 4.1.2. Die Glättung bereits entstandener Falten ist nach ENGEL & MATHES (2013) nur bedingt möglich, vielmehr verhindert der Faltenglätter die Entstehung von Falten.

Der Funktionsbereich des Faltenglätters umfasst einen dünnen Materialauslauf, der einer aufwändigen spanenden Fertigung von mehrfach gekrümmten Flächen bedarf. Die Flächen werden von dem Rohraußendurchmesser und dem Radius der Biegeform vorgegeben. Während des Biegeprozesses legt sich die dünn auslaufende Faltenglätterspitze an die Biegeform an. Aufgrund der wirkenden Normal- und Schubkräfte unterliegt der Faltenglätter starkem Verschleiß. Die Schubkräfte werden nach HINKEL (2013) durch die Reibung zwischen Rohr und Faltenglätter verursacht.

Für die Positionierung des Faltenglätters hat sich die nachfolgend beschriebene Vorgehensweise bewährt. Die lehrstuhleigene Biegemaschine TN 120, siehe Abbildung 4.3, hat den Vorteil, dass sie über zwei weg- und kraftregelbare Achsen für den Faltenglätter verfügt. Der Faltenglätter wird in positiver Längsrichtung verfahren, bis die Spitze des Faltenglätters die Übergangsebene erreicht, siehe Abbildung 4.16 a). Die Übergangsebene kann durch den Beginn der inneren Spannbacke ersichtlich sein. Bestehen die Biegeform und die innere Spannbacke aus einem Werkzeug, kann eine Markierung am Werkzeug die Übergangsebene kennzeichnen. Der Faltenglätter wird anschließend in Querrichtung auf Kontakt zur Biegeform gefahren. Er sollte parallel zum Gegenhalter stehen. Dadurch wird die größtmögliche Kontaktfläche zum Rohr erzielt. Stützt sich das Rohr nur auf dem Bereich der Faltenglätterspitze ab, kann ein Freiraum am hinteren Werkzeugende vorliegen, in dem sich Falten ausbilden können. Liegt der Faltenglätter nicht an der Biegeform an, kann es zu Ausbrüchen am Faltenglätter kommen. Um die Kontaktflächen zu prüfen, wurden Faltenglätter vor dem Biegen mit Tuschiepaste bestrichen. Abbildung 4.16 b) zeigt einen gut eingestellten Faltenglätter nach der Biegung eines faltenfreien Rohres. Die Tuschiepaste wird dort entfernt, wo ein Rohrkontakt entsteht, auch wenn nur ein kurzzeitiger Kontakt oder eine geringe Flächenpressung vorliegt. Die Höhenposition des Faltenglätters wird durch einen Formschluss zwischen der Faltenglätteraufnahme und der Maschinenkonsole bestimmt. Der Faltenglätter und die Faltenglätteraufnahme müssen bei der Konstruktion und Fertigung an die Höhe der Biegeform und der Transporteinheit angepasst werden.

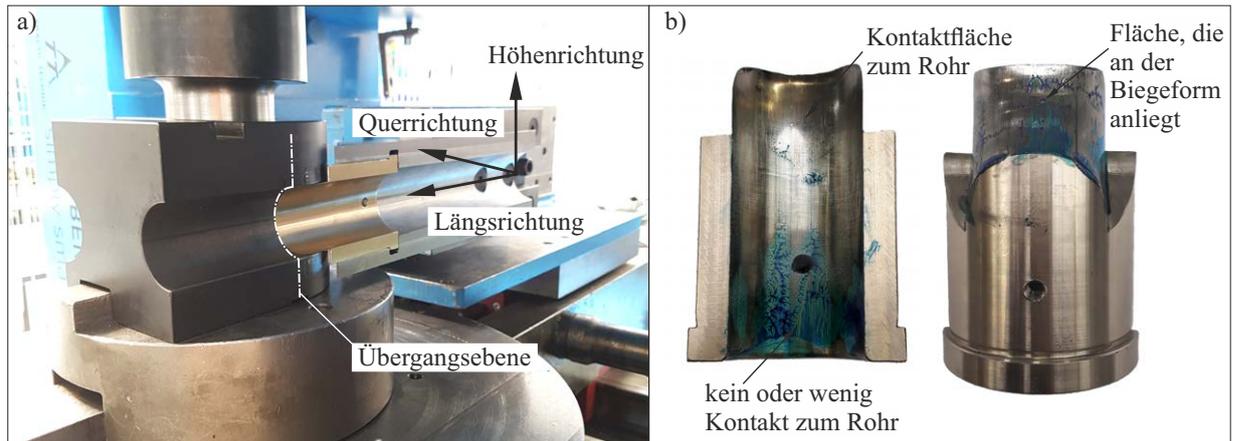


Abbildung 4.16: a) An der Übergangsebene ausgerichteter Faltenglätter. b) Kontaktflächen eines Faltenglätters zur Kraftübertragung auf die Biegeform und das Rohr.

In Unterabschnitt 4.3.1 und 4.3.2 sind die Arten des Faltenglätterverschleißes und die Ergebnisse praktischer Biegeversuche mit gekürzter Faltenglätterspitze beschrieben. Eine Kürzung der Faltenglätterspitze war bei der betrachteten Biegeaufgabe um 6 mm möglich (Gesamtlänge des Faltenglätters 95 mm).

### 4.3.1 Faltenglätterverschleiß

Der Faltenglätter stellt ein Verschleißteil dar und wird in der Regel aus Aluminiumbronze gefertigt. Aluminiumbronzen werden in Strangguss-Qualität, gepresst, gezogen, gegossen oder geschmiedet hergestellt. Der zähnharte Konstruktions- und Gleitwerkstoff ermöglicht die Fertigung komplexer, filigraner Geometrien sowie einen Werkstofffluss unter hohen Flächenpressungen. Aufgrund der guten tribologischen Eigenschaften besitzen Verschleißteile aus Aluminiumbronze hohe Standzeiten.

Zu den Verschleißmerkmalen von Faltenglättlern gehören Riefen in Längsrichtung und in radialer Richtung sowie Ausbrüche an der Faltenglätterspitze. Neben den abrasiven Verschleißmerkmalen kann sich eine Verformung der Faltenglätterkontur im Grund der Kavität bilden, siehe Abbildung 4.17.

Die dünn auslaufende Faltenglätterspitze ist besonders verschleißbehaftet. Zudem kann sich das ausgebrochene Material während des Biegeprozesses zwischen Faltenglätter und Rohr setzen und dadurch weitere Riefen und Eindrücke an der Rohroberfläche verursachen. ENGEL & MATHES (2013) führten FE-Simulationen des Rotationszugbiegens unter Variation der Faltenglätterposition durch. Es waren Verschiebungen des Faltenglätters in Längsrichtung zum Rohr möglich, ohne das Biegeergebnis zu verschlechtern und Falten zu verursachen. Der Faltenglätter wurde ideal starr ausgeführt und blieb trotz des fehlenden Kontaktes zur Biegeform in Position. Die Untersuchung ließ die Vermutung zu, dass Faltenglätter in Abhängigkeit von der Biegeaufgabe gekürzt werden können.

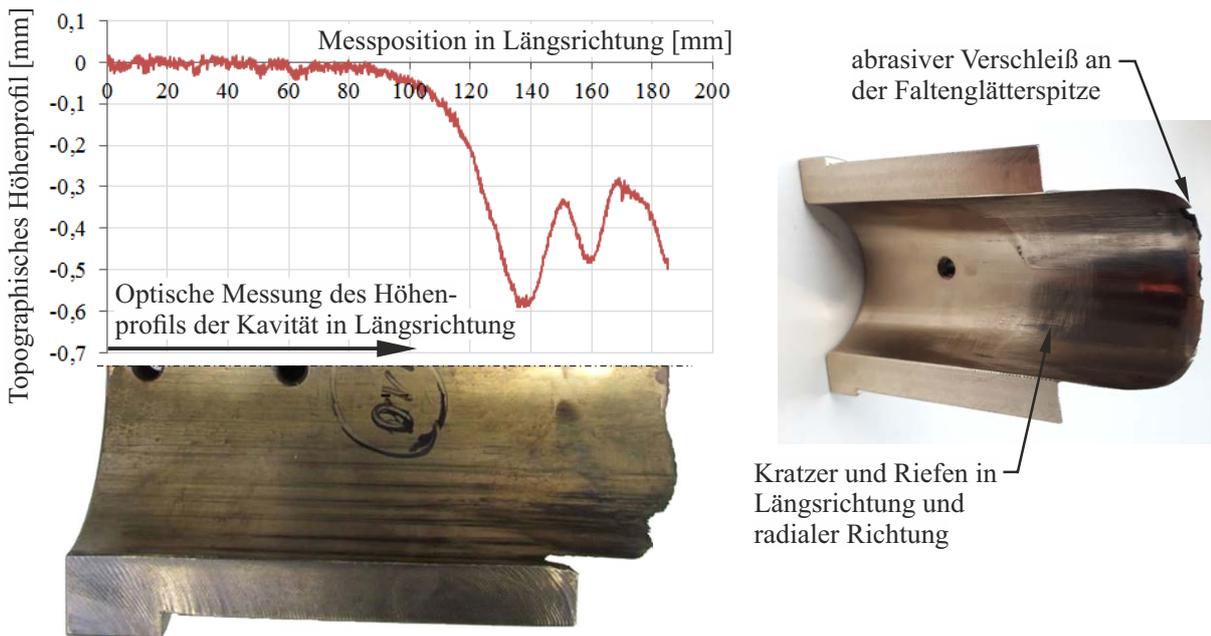


Abbildung 4.17: Verschleißmerkmale eines Faltenglätters.

### 4.3.2 Biegeversuche mit gekürzten Faltenglättern

Der dünne Materialauslauf an der Faltenglätterspitze ist besonders verschleißbehaftet. Ein Kürzen der Spitze birgt das Potenzial, den Verschleiß zu reduzieren und die Standzeit von Faltenglättern zu erhöhen.

Praktische Biegeversuche wurden mit Faltenglättern durchgeführt, die um verschiedene Längen  $\Delta l_{Fg}$  gekürzt wurden, siehe Abbildung 4.18. Die untersuchte Biegeaufgabe hat einen Biegefaktor von  $B = 1,5$  und einen Wanddickenfaktor von  $W = 40$ . Die Rohre bestehen aus dem Werkstoff X5CrNi1810 mit der Werkstoffnummer 1.4301 und wurden mit einem Biegeradius von 60 mm gebogen. Der Außendurchmesser beträgt 40 mm und die Wanddicke 1 mm. Ziel der Untersuchung war es herauszufinden, wie weit der Faltenglätter entsprechend der vorliegenden Biegeaufgabe gekürzt werden kann, ohne dass Falten entstehen.

Der Faltenglätter wurde ungekürzt und um 3 mm, 6 mm und 10 mm gekürzt eingesetzt. Falten können durch das Zustellen des Gegenhalters in Richtung des Rohres verhindert werden, daher wurden die Biegeversuche unter Variation der Gegenhalterzustellung durchgeführt, siehe Abbildung 4.7. Die Nullposition der Gegenhalterzustellung bildet die Biegung mit den größten Falten und der kleinsten Normalkraft.



Abbildung 4.18: Faltenglätter mit ungekürzter und um  $\Delta l_{Fg}$  gekürzter Spitze.

Die Ergebnisse der praktischen Biegeversuche sind in Abbildung 4.19 dargestellt. Der Einsatz des ungekürzten Faltenglätters liefert ab einer Gegenhalterzustellung von 0,3 mm ein faltenfreies Biegeergebnis. Die Kürzung der Faltenglätterspitze um 3 mm liefert gleiche Biegeergebnisse wie der ungekürzte Faltenglätter. Die Kürzung der Faltenglätterspitze um 6 mm liefert faltenbehaftete Rohrbögen bei einer Gegenhalterzustellung von 0,3 mm. Eine Erhöhung der Gegenhalterzustellung auf 0,7 mm verhindert die Falten. Bei der Kürzung der Faltenglätterspitze um 10 mm ist auch durch eine große Gegenhalterzustellung kein faltenfreier Rohrbogen produzierbar.

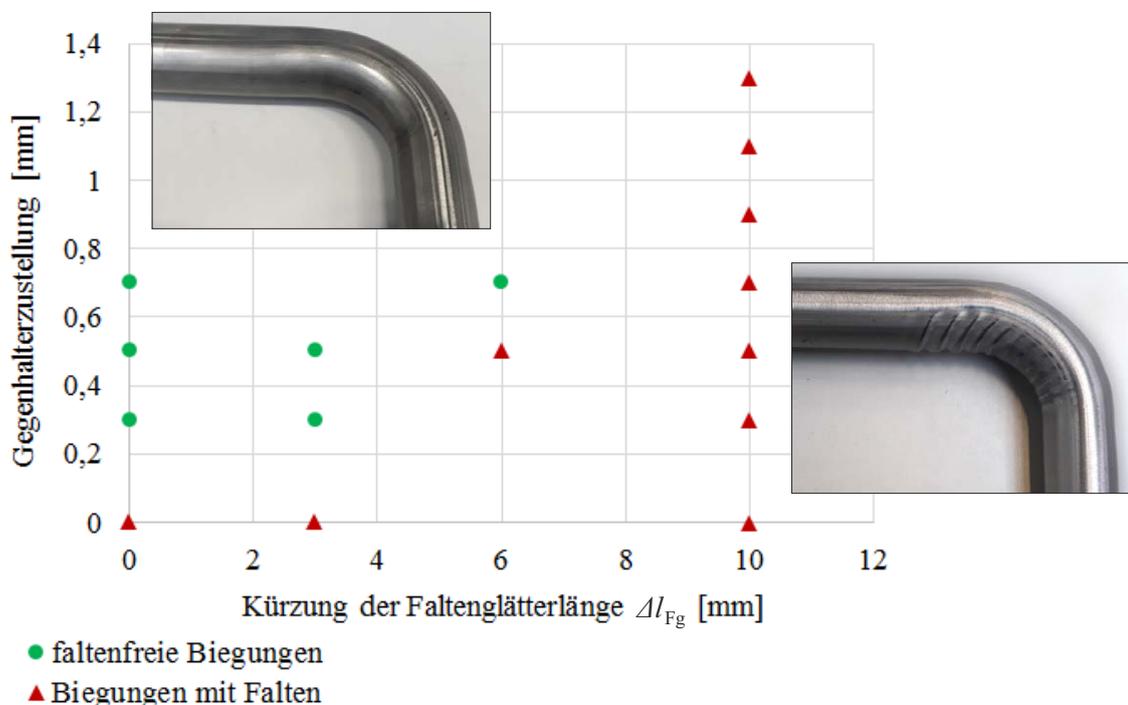


Abbildung 4.19: Übersicht über faltenfreie und faltenbehaftete Rohrbögen in Abhängigkeit von der Gegenhalterzustellung und der Kürzung der Faltenglätterspitze.

Eine Kürzung der Faltenglätterspitze ist bei der betrachteten Biegeaufgabe möglich. Faltenfreie Rohrbögen sind bei einer Kürzung um 6 mm durch eine erhöhte Zustellung des Gegenhalters herstellbar. Die Versuchsergebnisse der praktischen Biegeversuche untermauern das Ergebnis der FE-Simulationen nach ENGEL & MATHES (2013). Der dünne Materialauslauf des Faltenglätters ist nicht immer erforderlich. Es besteht die Möglichkeit, Faltenglätter mit einer verschlissenen Faltenglätterspitze unter Erhöhung der Gegenhalterzustellung weiter einzusetzen.

Die Zustellung des Gegenhalters hat eine Erhöhung der Normalkraft zur Folge. Die gekürzte Spitze verursacht einen Freiraum, in dem sich eine Falte ausbilden kann. Die Gegenhalterkraft wird auf die verringerte Kontaktfläche des Faltenglätters (Abbildung 4.16) und die Kavität der Biegeform übertragen. Die Krafterhöhung verursacht eine erhöhte Flächenpressung und eine veränderte Flächenpressungsverteilung, welche die Faltenbildung verhindert und die Kürzung der Faltenglätterspitze ermöglicht. Die Falten entstehen im geraden Rohrabschnitt vor der Übergangsebene, wie die Messung in Abschnitt 6.1 zeigt. Dadurch ist es möglich, den Faltenglätter im Bereich der Übergangsebene zu kürzen, ohne dass sich dort Falten bilden. Die Wellenlänge der Faltenbildung steigt mit der Wanddicke, siehe Unterabschnitt 4.4.2 und 6.2.3. Es wird vermutet, dass die maximal mögliche freie Länge des Rohrabschnitts  $\Delta l_{Fg}$  von der Wanddicke abhängig ist und ca. der halben Wellenlänge der Faltenbildung entspricht.

## 4.4 Einfluss der Druckspannung auf das Ausbeulverhalten

Die Druckspannung, die in Längsrichtung auf ein Rohr wirken kann, ist begrenzt. Die Instabilitätsgrenze wird durch die Rohreigenschaften und äußere Einflussgrößen bestimmt. Im Folgenden wird das Ausbeulverhalten beim RZB in Abhängigkeit von der Rohrlängskraft untersucht, sowie bei Stauchversuchen unter Variation des Werkzeugspiels.

### 4.4.1 Einfluss der durch den Transport überlagerten Druckspannungen auf die Faltenbildung beim RZB

Die Transporteinheit einer Rotationszugbiegemaschine kann das Rohr während des Biegens nachführen. Hierzu wird das Rohr im Spannfutter fixiert. Ist die Transportgeschwindigkeit größer als die Rohrgeschwindigkeit wird mehr Material in die Umformzone geschoben. Die Rohrwanddicke wird erhöht. Die Verlagerung der neutralen Faser in Richtung Innenbogen (Unterabschnitt 2.1.5) wird reduziert. Dadurch stellen sich eine geringere Längsdehnung am Außenbogen und damit eine kleinere Risswahrscheinlichkeit ein. Da der gesamte Querschnitt des Rohres in die Umformzone geschoben wird, führt die geänderte Verlagerung der neutralen Faser gleichzeitig zu einer Erhöhung der Materialstauchung am Innenbogen. Dadurch kann es am Innenbogen zu einer unerwünschten Faltenbildung kommen, siehe Abbildung 4.20.

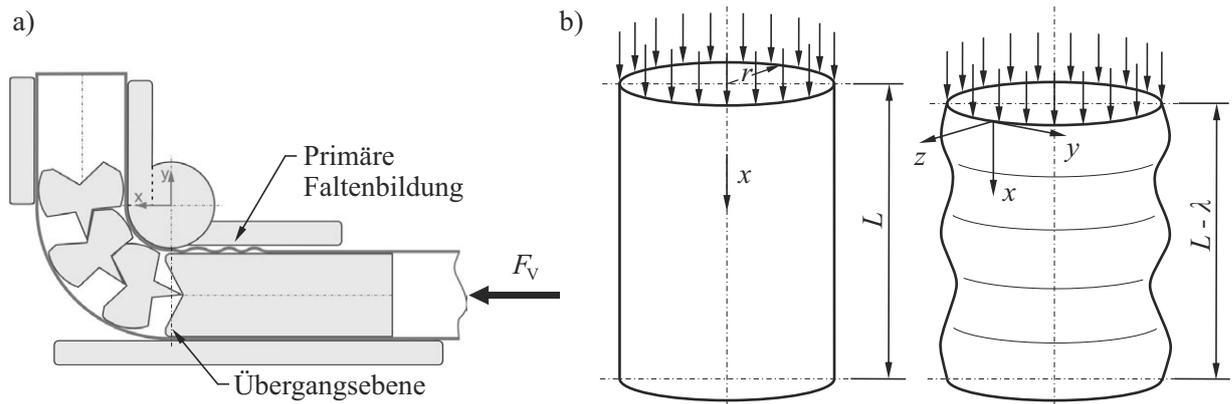


Abbildung 4.20: Schematische Darstellung des Vergleichs eines durch Rotationszugbiegen hergestellten Rohrbogens mit überlagerter Druckspannung durch den Vorschub der Transporteinheit mit einem unter Druckspannungen stehenden, geraden Rohrabschnitt nach SCHAPITZ (1963).

Durch die in Längsrichtung des Rohres eingeleitete Transportkraft werden Druckspannungen überlagert. Die Transportkraft soll möglichst groß gewählt werden, um dem Versagenskriterium Riss entgegenzuwirken, aber nur so groß, dass es nicht zur Faltenbildung kommt. Mit dem Ziel, eine geeignete Einstellung der Transportkraft zu ermitteln, wird der Berechnungsansatz nach SCHAPITZ (1963) untersucht. Nach Schapitz gibt es Gleichungen zur Berechnung der kritischen Druckspannung eines Rohres. Die kritische Druckspannung entspricht der maximalen Spannung, die in Längsrichtung auf ein Rohr wirken kann, ohne dass ein rotationsymmetrisches Ausbeulen und damit Faltenbildung eintritt.

Nach Gleichung 2.31 ist die kritische Druckspannung sowohl von geometrischen Größen des Rohres als auch von dessen Materialeigenschaften abhängig. Abbildung 4.21 zeigt die Veränderung der berechneten Druckspannung bei Verdoppelung des jeweiligen Einflussparameters.

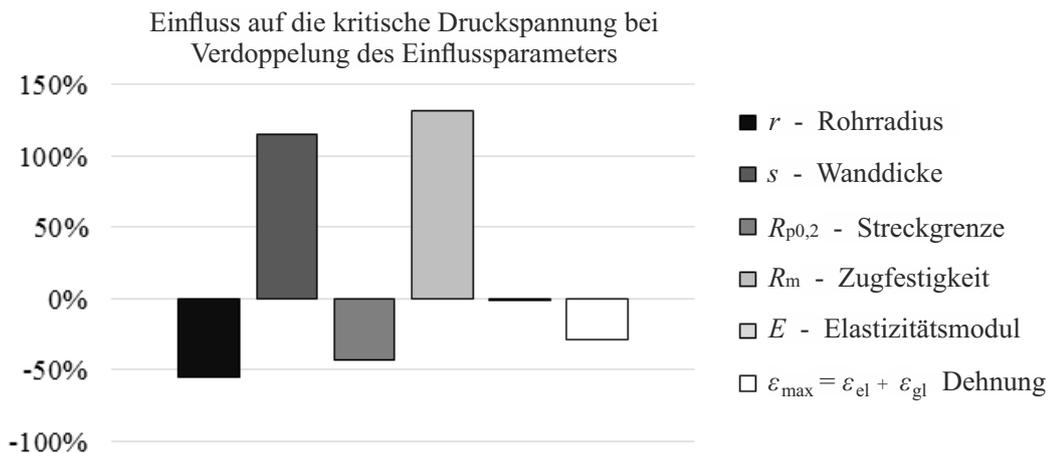


Abbildung 4.21: Einfluss der geometrischen Größen und Materialeigenschaften laut Gleichung 2.31 nach SCHAPITZ (1963).

Nach SCHAPITZ (1963) ist der Einfluss der Rohrwanddicke und der Einfluss der Zugfestigkeit des Rohrwerkstoffs auf die kritische Druckspannung am größten. Im Vorgriff auf Unterabschnitt 4.4.2 und 6.2 kann festgehalten werden, dass Rohre mit einem Wanddickenunterschied von 0,2 mm in Stauch- und Biegeversuchen unterschiedliche Kraftverläufe und Faltenausprägungen aufwiesen. Dadurch wird der große Einfluss der Wanddicke bestätigt. Der Einfluss der Zugfestigkeit konnte durch die unterschiedlichen Messergebnisse bei einem Rohrvergleich mit Zugfestigkeiten von  $751 \text{ N/mm}^2$  und  $506 \text{ N/mm}^2$  bestätigt werden.

Zur Ermittlung der wirkenden Druckspannungen beim Rotationszugbiegen wurden mit der FE-Simulationssoftware *Pam Stamp*, siehe Unterabschnitt 4.2.2, Biegeaufgaben unterschiedlicher Wanddickenverhältnisse untersucht. Hierbei wurde die Transportkraft schrittweise erhöht, bis Ausbeulungen der Rohre eintraten. Dazu wurde das Halbzeug mit dem Werkstoff X2CrTi12 und der Werkstoffnummer 1.4512 modelliert. Der Werkstoff besaß eine Streckgrenze von  $R_{p0,2} = 223 \text{ N/mm}^2$ , eine Zugfestigkeit von  $R_m = 428 \text{ N/mm}^2$  und eine Gleichmaßdehnung von  $\varepsilon_{gl} = 23,6 \%$ . Der Außendurchmesser des Rohres betrug 30 mm, ebenso wie der Biegeradius. Das Rohr hat in den FE-Simulationen eine Länge von 292 mm und wurde um einen Biegewinkel von  $127,7^\circ$  gebogen. Es wurde mit 40 Schalenelementen in Umfangsrichtung sowie 124 Schalenelementen in Längsrichtung vernetzt. Die Werkzeuge waren als Starrkörperelemente (*Rigid bodies*) und der Dorn als Mehrkörpersystem (*Multi body system*) aufgebaut. Die Bewegung zwischen den Dorngliedern und dem Dornschaft wurde durch idealisierte kinematische Gelenke eingeschränkt.

Der Quotient aus der wirkenden Transportkraft und der maximal ohne Überschreitung der Streckgrenze aufnehmbaren Längskraft ist in Abbildung 4.22 für unterschiedliche Wanddickenverhältnisse dargestellt. Die Maximalkraft wurde nach Gleichung 4.5 berechnet.

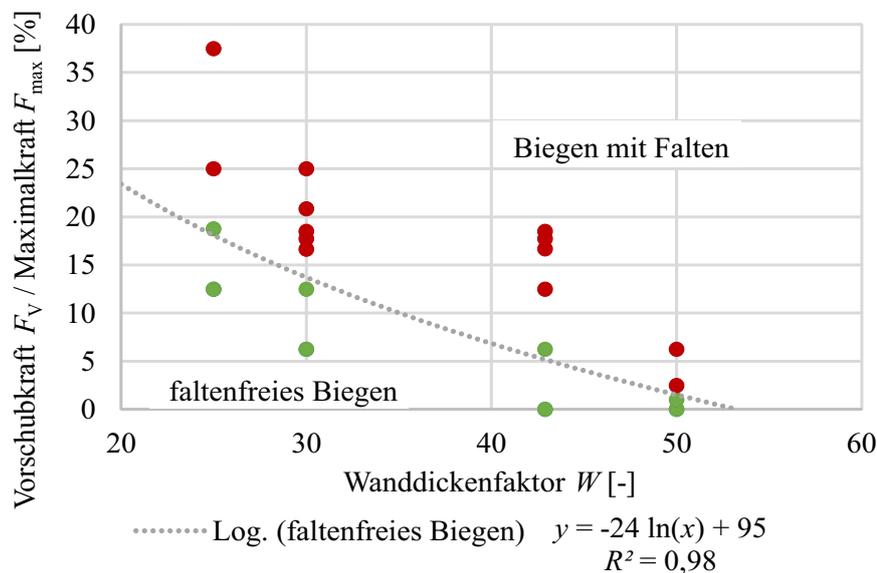


Abbildung 4.22: Verhältnis zwischen der durch den Transportvorschub überlagerten Druckkraft und der Faltenbildung, berechnet anhand von FE-Simulationen bei einem Rohraußendurchmesser von 30 mm und dem Werkstoff X2CrTi12 (1.4512).

$$F_{\max} = R_{p0,2} \cdot \pi \cdot (r_A^2 - r_I^2) \quad (4.5)$$

FE-Simulationen, die einen faltenfreien Rohrbogen als Biegeergebnis aufwiesen, sind grün dargestellt. Rot dargestellt sind faltenbehaftete Rohrbögen. Bei der betrachteten Biegeaufgabe können nach Abbildung 4.22 Transportkräfte entlang der logarithmischen Trendlinie mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,981 gewählt werden, um die Risswahrscheinlichkeit zu reduzieren, ohne Falten zu verursachen.

#### 4.4.2 Einfluss der Rohrwanddicke auf das Ausbeulverhalten bei Druckbeaufschlagung

Einflussgrößen wie geometrische Abweichungen, werkstoffliche Inhomogenitäten oder die Kraftereinleitung wirken sich auf das Ausbeulverhalten aus. Bei Überschreiten der Fließgrenze beeinflusst zudem die kontinuierliche Veränderung des Querschnitts die Stabilität der Rohrwand bzw. des Querschnitts selbst. Berechnungen sind für den Bereich der elastisch-plastischen Umformung ungenau, obwohl sich nach DÜSING (1994) viele Forscher wissenschaftlich mit dem Ausbeulverhalten von Kreiszyinderschalen unter Axialspannung beschäftigt haben.

Praktische Versuche sind nach SCHAPITZ (1963) rein theoretischen Betrachtungen vorzuziehen. Schapitz beschreibt in seinen Gleichungen einen Stauchprozess mit geradliniger Werkzeugbewegung. Im Folgenden werden die Ergebnisse praktischer Stauchversuche und deren Vergleich mit Berechnungen beschrieben.

Praktische Stauchversuche an Rohren wurden an der Universalprüfmaschine Z250 der ZWICK ROELL GMBH & CO. KG, Ulm, durchgeführt. Die Maschine überträgt über eine zentrale Antriebsspinde sowohl Zug- als auch Druckkräfte mit einer maximalen Prüfkraft von 250 kN. Die Traverse besitzt einen maximalen Verfahrweg von 320 mm und eine zwischen 0,5  $\mu\text{m}/\text{min}$  und 600 mm/min einstellbare Prüfgeschwindigkeit. Der Prüfvorgang wurde mit der Software TESTXPRT III DER ZWICK ROELL GMBH & CO. KG nach der Prüfnorm DIN 50106 für Stauchversuche programmiert. Der Kraftverlauf aus der Kraftmessdose und der Traversenweg wurden über ein rechnerunterstütztes Messwerterfassungssystem (MES) verarbeitet. Ein Analog/Digital-Umwandler *PCIE 6014* der NATIONAL INSTRUMENTS GERMANY, München, überführt die analogen Messdaten der Sensoren in digitale Signale. Die Karte besitzt eine Auflösung von 16 bit bei einer Abtastrate von 200.000 Messungen pro Sekunde. Aus der Eingangsspannung von -10 V bis +10 V resultiert eine Genauigkeit von 0,31 mV/bit. Die digitalen Signale wurden an einem Messcomputer mit der Software *DIAdem Advanced Edition 2020 & DAC Bundle* der NATIONAL INSTRUMENTS GERMANY, München, für mathematische und visuelle Datenanalyse verarbeitet und gespeichert.

Die Rohre aus dem Werkstoff X5CrNi18-10 mit der Werkstoffnummer 1.4301 haben einen Außendurchmesser von 40 mm und Wanddicken von 0,8 mm, 1 mm und 2 mm. Der Versuchsaufbau der Stauchversuche ist in Abbildung 4.23 dargestellt. Die Proben wurden an einer konventionellen Drehmaschine *D320X920-DPA* der OPTIMUM MASCHINEN GERMANY GMBH, Hallstadt auf Länge plangedreht, um senkrecht zur Rohrachse verlaufende Schnittflächen zu erhalten. Die Probenlänge betrug 105 mm. Durch eine freie Stauchlänge von 65 mm > 10,9 mm wurde gewährleistet, dass sich nach KROMM (SCHAPITZ 1963) ein Ausbeulen der Rohrwand einstellen und sich Wellen in Längsrichtung ausbreiten können, siehe Gleichung 2.29. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 0,05 mm/s. Der zu stauchende Weg wurde auf 8 mm eingestellt.

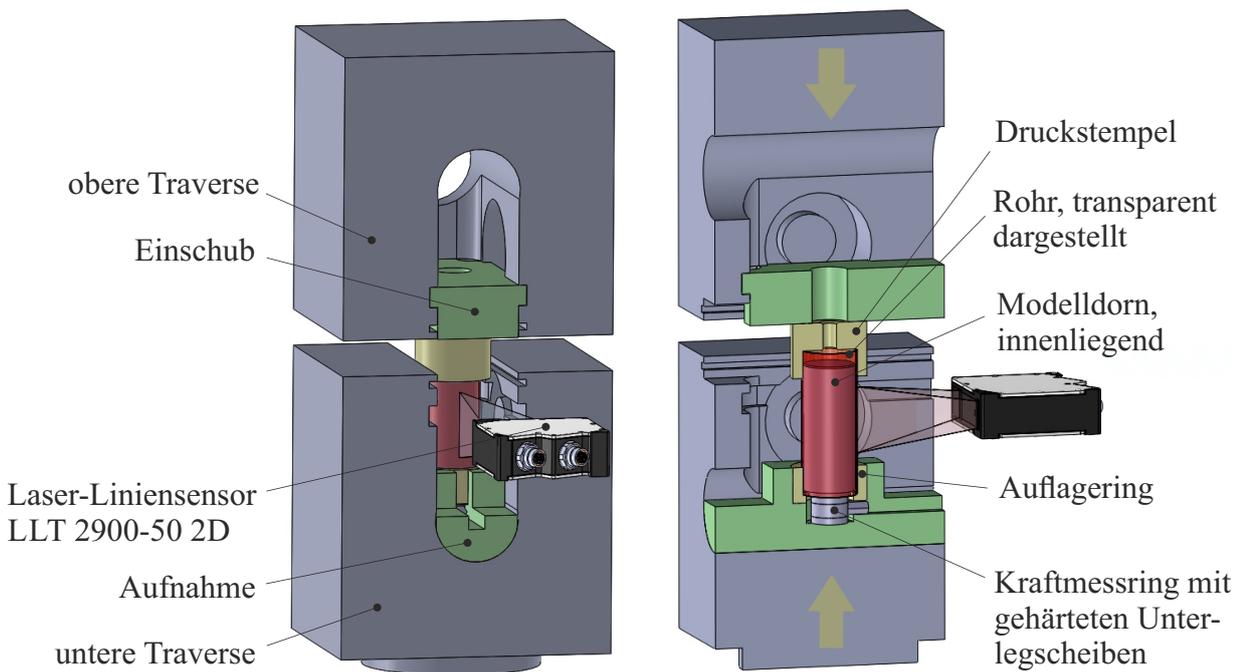


Abbildung 4.23: Versuchsaufbau der Stauchversuche an der Universalprüfmaschine Z250 unter Einsatz des Laser-Liniensensors LLT 2900-50 2D zur Aufzeichnung der Rohrkonturen.

Die Probe wurde zwischen dem Druckstempel und dem Auflagering gestaucht. Die Werkzeuge übertrugen die Stauchkraft und fixierten die Probenenden in radialer Richtung. Der Auflagering wurde in eine Aufnahme in der unteren Traverse eingesetzt. Die Aufnahme war in der Kavität der Traverse beweglich. Angelehnt an den Rotationszugbiegeprozess wurde das Rohr von innen durch einen Dorn gestützt. Der Druckstempel lag an dem Einschub in der oberen Traverse an. Die Gewindebohrung in dem Druckstempel konnte ein Abziehen vom Rohr oder ein Herausdrücken des Dornes erleichtern. Gemessen wurden die Stauchkraft und der Traversenweg in Längsrichtung des Rohres. Die Messung erfolgte ab einer Stauchkraft von 100 N. Zudem wurde ein Kraftmessring *KMR-100kN* der HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH, Darmstadt, zwischen dem Modelldorn und der Aufnahme in der unteren Traverse positioniert. Dadurch wurde die Kraft gemessen, die bei Ausbeulung des Rohres auf den Dorn übertragen wird. Ein Laser-Liniensensor *LLT*

2900-50 2D der MICRO EPSILON GMBH, Ortenburg, wurde zur Erfassung der Kontur der Rohraußenwand eingesetzt, um den Zeitpunkt und die Ausprägung der Ausbeulung auswerten zu können. Die Datenübertragung wurde über das beschriebene MES realisiert. Die entstehende Kraft wurde im Vorfeld durch Multiplizieren der in Zugversuchen ermittelten Streckgrenze von  $446 \text{ N/mm}^2$  mit dem jeweiligen Querschnitt näherungsweise berechnet.

Zur Auswertung des Startzeitpunktes der Ausbeulung wurden die gemessenen Profile des Laser-Liniensensors betrachtet, siehe Abbildung 4.24. Zwischen zwei Schritten des Stauchweges konnte eine Veränderung der Rohrkontur von einem geraden zu einem leicht welligen Profil beobachtet werden. Der noch wellenfreie Zustand wurde subjektiv ermittelt und in Abbildung 4.25 als Beginn der Ausbeulung markiert. Plötzliche Übergänge konnten bei dünnwandigen Rohren zwischen gerader Rohrwand und stark welligem Profil entstehen. Dickwandige Rohre wiesen leichte Wellenkonturen auf, die sich gleichmäßiger ausprägten. Die in Abbildung 4.24 abgebildeten Rohrproben zeigen den Endzustand nach Erreichen des Stauchweges von 8 mm bzw. 12 mm.

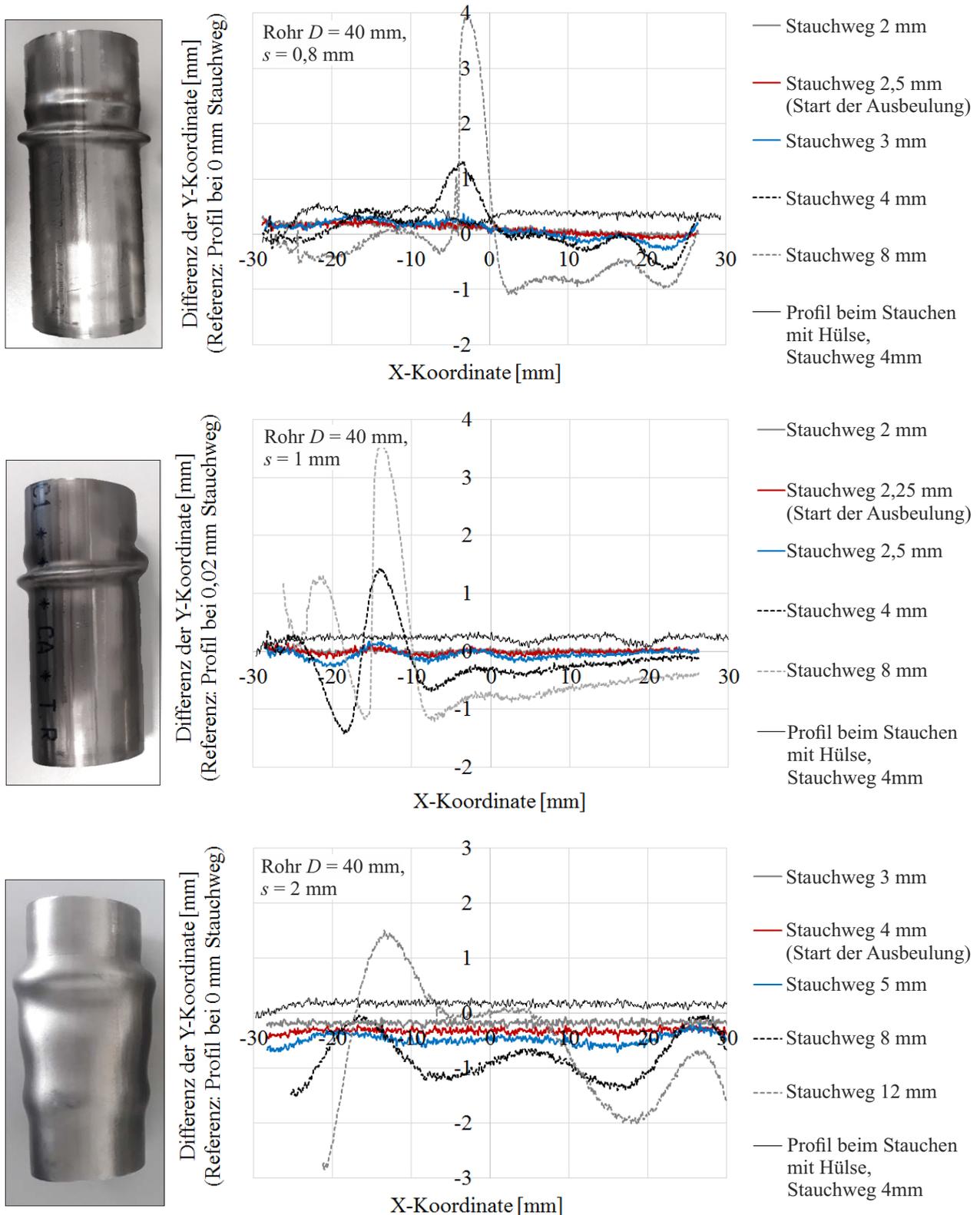


Abbildung 4.24: Konturverläufe in Form von Koordinatenprofilen zur Ermittlung des Startzeitpunktes der Ausbeulung und Auswertung der Verformungsstadien sowie Bilder der Endzustände der zugehörigen Stauchproben. Weiterhin ist der Konturverlauf je einer Probe, gestaucht mit einer begrenzenden Hülse, bezogen auf Unterabschnitt 4.4.3 dargestellt.

In Abbildung 4.25 sind die Stauchkraftverläufe der untersuchten Proben über dem Stauchweg dargestellt. Die praktischen Stauchversuche weisen eine gute Wiederholgenauigkeit auf. Die Stauchkraft steigt zunächst steil an, steigt dann mit geringerer Steigung weiter, bis ein Kraftmaximum erreicht ist und fällt anschließend ab. Der Beginn der Ausbeulung liegt vor dem Kraftmaximum. Mit steigender Wanddicke vergrößert sich der Abstand zwischen Ausbeulung und Kraftmaximum. Bei den Rohrproben mit einer Wanddicke von 2 mm wurde bei einem Stauchweg von 8 mm noch kein Kraftabfall erreicht, daher wurde der Stauchweg dieser Proben auf 12 mm erhöht. Die gemessenen Dornkräfte waren vergleichsweise gering ( $< 400$  N). Dadurch wird beim Rotationszugbiegen die Annahme bestätigt, dass Falten im geraden Bereich des Dornschaftes einen geringen Einfluss auf die Dornlängskraft haben und Kraftänderungen von Falten im Bogenbereich zwischen den Dorngliedern hervorgerufen werden.

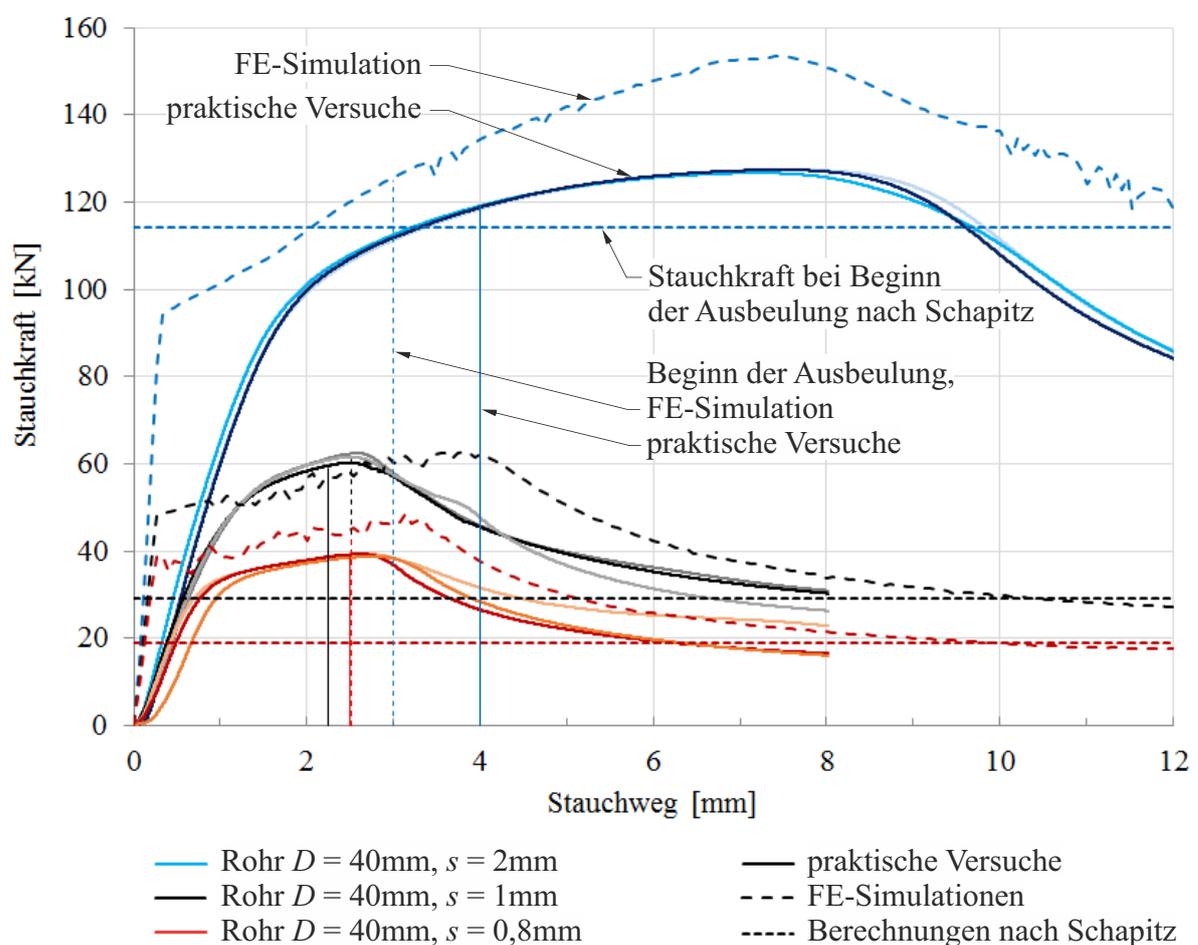


Abbildung 4.25: Vergleich der gemessenen und berechneten Stauchkraftverläufe von Rohren verschiedener Wanddicken. Vertikale Linien kennzeichnen den subjektiv ermittelten Beginn der Ausbeulung.

Neben den Ergebnissen der praktischen Versuche sind FE-Berechnungen aufgeführt. Die in FE-Simulationen berechneten Proben bleiben länger stabil. Ihre Werte für das Kraftmaximum sind größer und liegen bei den dünnwandigen Proben bei größeren Stauchwegen. Der subjektiv ermittelte Beginn der Ausbeulung liegt bei den kleinen Wanddicken nah an den

Ergebnissen der praktischen Versuche. Die Proben mit einer Wanddicke von 2 mm beulen in der FE-Berechnung früher aus. Horizontale Linien kennzeichnen den nach SCHAPITZ (1963) berechneten Wert für die kritische Druckkraft. Dazu wurde die kritische Druckspannung nach Gleichung 2.36 auf den jeweiligen Ausgangsquerschnitt bezogen. Die berechneten Druckkräfte liegen unterhalb der Werte aus den praktischen Versuchen und aus den FE-Simulationen. Bei den Rohrproben mit einer Wanddicke von 2 mm kommt die berechnete Druckkraft den Versuchsergebnissen am nächsten.

Der Vergleich der Ergebnisse der praktischen Stauchversuche und der FE-Simulationen mit den Berechnungen nach SCHAPITZ (1963) ist im folgenden Unterabschnitt 4.4.3 zusammen mit den Ergebnissen aus 4.4.1 und 4.4.3 in Abbildung 4.28 aufgeführt.

#### 4.4.3 Einfluss des Werkzeugspiels auf das Ausbeulverhalten bei Druckbeaufschlagung

Die in Unterabschnitt 4.4.2 beschriebenen praktischen Stauchversuche wurden unter Begrenzung der Ausbeulung durch eine Hülse erweitert. Ziel war es herauszufinden, ob sich der Übergang zwischen Aufdickung und Ausbeulung der Rohrwand hinauszögern lässt, sodass die Stauchproben mehr Druckkraft aufnehmen können und erst später ausbeulen und Falten bilden. Die Versuchsdurchführung und Datenanalyse erfolgte wie in Unterabschnitt 4.4.2 beschrieben. Der Versuchsaufbau mit einer Hülse als zusätzliches Werkzeug ist in Abbildung 4.26 dargestellt.

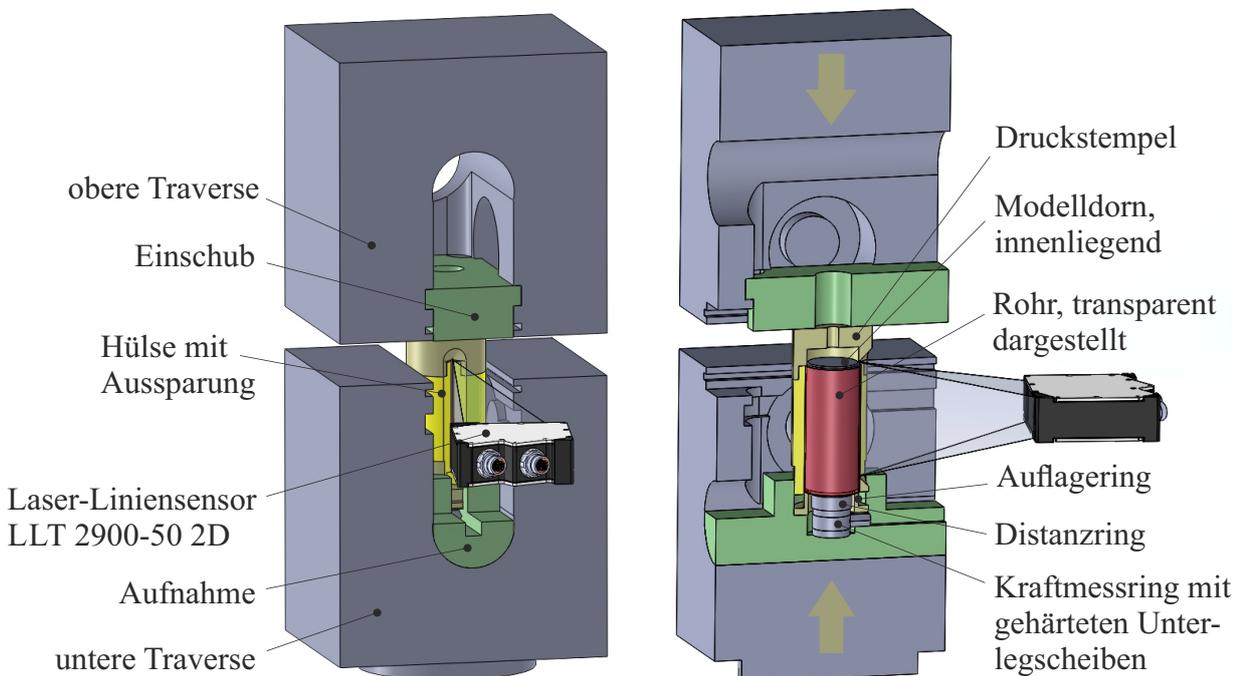


Abbildung 4.26: Versuchsaufbau der Stauchversuche mit Begrenzung der Ausbeulung an der Universalprüfmaschine Z250 unter Einsatz des Laser-Liniensensors LLT 2900-50 2D zur Aufzeichnung der Rohrkonturen.

Die Rohrproben wurden zwischen dem Druckstempel und dem Auflagering positioniert. Die Hülse war über ein Gewinde mit dem Druckstempel verbunden und umhüllte die Rohraußenwand. Durch Verfahren der Traversen wurde der Druckstempel auf das Rohrende gedrückt und zusammen mit der Hülse nach unten gefahren. Der Auflagering schob das andere Rohrende nach oben und fuhr dabei in die Hülse hinein. Dadurch konnte gewährleistet werden, dass die Rohraußenwand über die gesamte Länge umschlossen war und nicht frei ausbeulen konnte. Zwei Hülsen mit einem Innendurchmesser von 40,45 mm und 40,65 mm bei Rohraußendurchmessern von 40 mm kamen zum Einsatz. In die Hülsen wurde je eine Aussparung gefertigt, um mit dem Laser-Liniensensor die Rohrkontur während des Stauchprozesses erfassen zu können.

In Abbildung 4.27 sind die Kraftverläufe der Stauchversuche mit Hülse den Kraftverläufen ohne Hülse gegenübergestellt. Bis zum Zeitpunkt der Ausbeulung gleichen sich die Kraftverläufe mit und ohne Hülse. Die Auswertung der Rohrkontur ergab, dass der Zeitpunkt der Ausbeulung bei beiden Versuchsreihen gleich war. Nach Eintritt der Ausbeulung stiegen die Stauchkräfte der Versuche mit Hülse an. Die Bilder der Rohrproben zeigen im Vergleich zu Abbildung 4.24, dass die Amplitude der Wellenkontur durch den Einsatz einer Hülse begrenzt wird. In Abbildung 4.24 sind die Konturprofile bei einem Stauchweg von 4 mm mit und ohne Begrenzung dargestellt. Die mit Hülse gestauchten Profile weisen kleinere Wellen auf. Eine Stabilisierung setzt durch die Abstützung der Rohrwand an der Hülse ein. Der kleinere Hülseninnendurchmesser von 40,45 mm verursachte einen größeren Kraftanstieg als der Innendurchmesser 40,65 mm. Stauchwege  $> 4$  mm konnten in praktischen Versuchen nicht untersucht werden, da der Druckstempel und der Auflagering aufgrund der hohen Flächenpressung an den Rohrstirnseiten plastisch verformt wurden. In FE-Simulationen wurden die Werkzeuge als Starrkörperelemente (*Rigid Bodies*) eingestellt. Die Kraftverläufe der FE-Simulationen steigen auch bei größeren Stauchwegen weiter an, ohne dass sich ein Kraftmaximum einstellt.

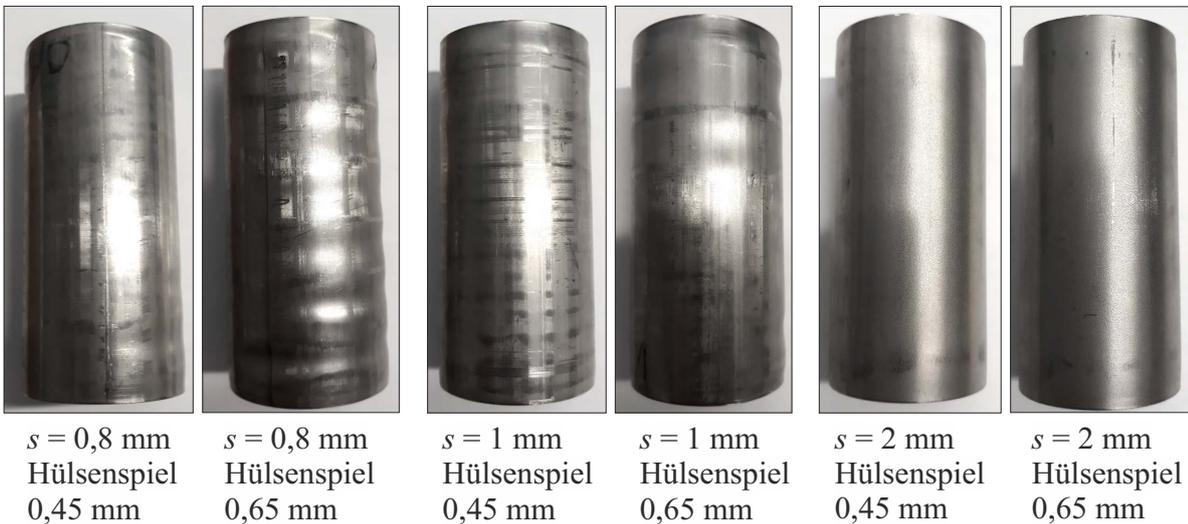
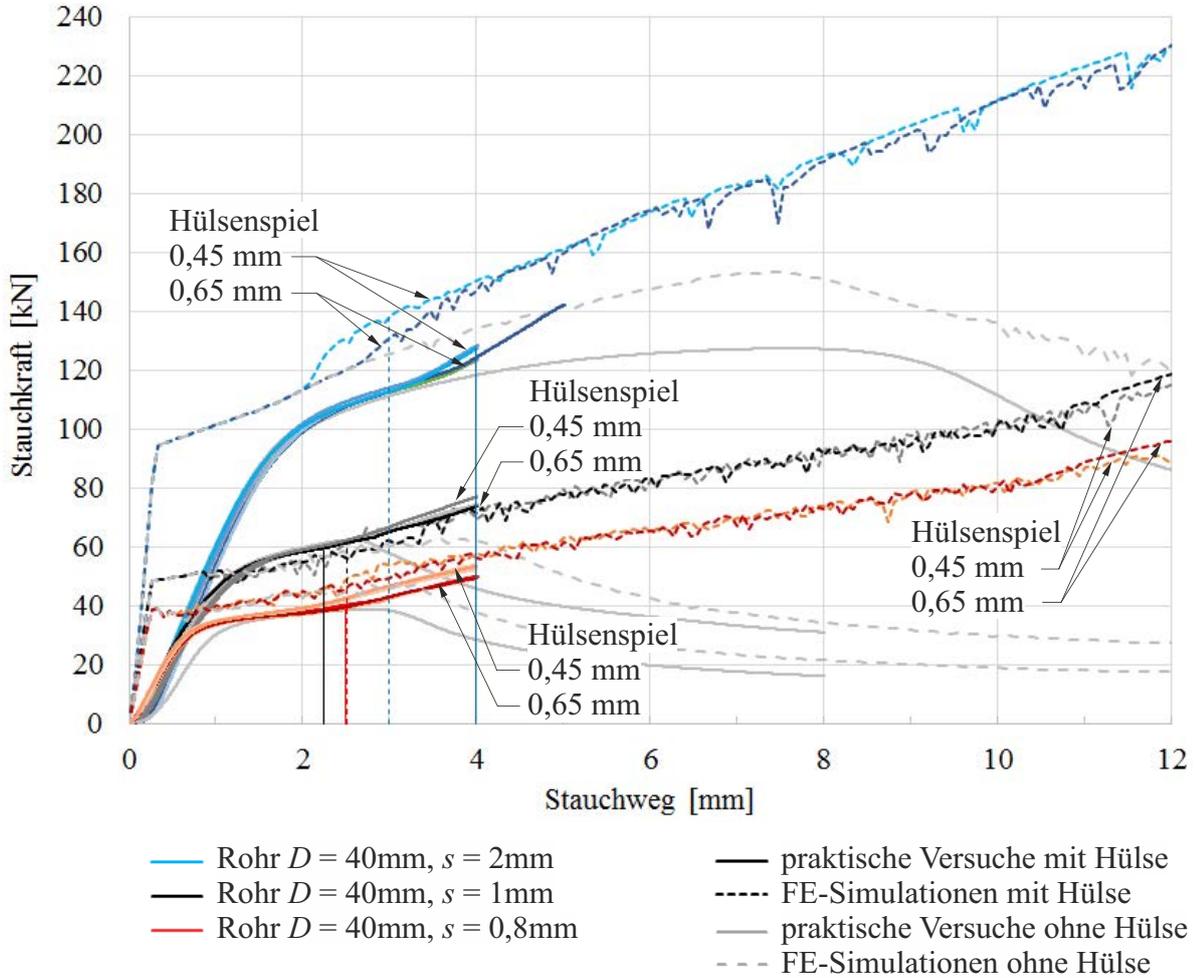


Abbildung 4.27: Vergleich der gemessenen und berechneten Stauchkraftverläufe mit Begrenzung der Ausbeulung um 0,45 mm und 0,65 mm im Durchmesser sowie Bilder der Rohrproben nach Erreichen der Endstauchlänge von 4 mm.

Die Auswertung der Wanddicken wurde für die FE-berechneten Rohrproben durchgeführt und ist in Tabelle 4.2 dargestellt. Die Begrenzung der Ausbeulung durch eine Hülse verursacht eine reduzierte Wellenausprägung und eine erhöhte Aufdickung der Rohrwand.

Tabelle 4.2: Maximale Wanddicken der in FE-Simulationen berechneten Rohrproben bei den Stauchwegen 0 mm und 14 mm mit und ohne Einsatz einer begrenzenden Hülse.

Stauchweg	maximale Wanddicke [mm]		
	ohne Begrenzung	mit Begrenzung (Hülzenspiel 0,45 mm)	mit Begrenzung (Hülzenspiel 0,65 mm)
0 mm	0,800	0,800	0,800
14 mm	0,849	1,010	1,009
0 mm	1,000	1,000	1,000
14 mm	1,086	1,259	1,244
0 mm	2,000	2,000	2,000
14 mm	2,368	2,383	2,411

Die Versuchsergebnisse aus Unterabschnitt 4.4.1, 4.4.2 und 4.4.3 wurden in Abbildung 4.28 in einem Druckspannungsdiagramm gegenübergestellt.

Rechnet man die Transportkräfte der faltenfreien Biegungen aus Abbildung 4.22 in Druckspannungen um, können diese mit der Berechnung nach Schapitz verglichen werden. Die durch den Transport eingebrachten Druckspannungen überlagern die biegebedingten Spannungen im Rohr. Die Verläufe der Druckspannungen nach Schapitz entsprechend den Gleichungen 2.31, 2.36 und 2.37 wurden im Vergleich zu dem Verlauf der maximalen Druckspannung am Rohrrinnenbogen aus den FE-Simulationen des Rotationszugbiegeprozesses aufgeführt. Die Druckspannungen aus den FE-Simulationen liegen oberhalb der berechneten Werte nach Schapitz. Dies lässt vermuten, dass der Biegeprozess gegenüber dem Stauchprozess die Rohrwand stabilisiert, sodass höhere Druckspannungen ohne eine Ausbeulung wirken können. Die Kinematik des Biegeprozesses beinhaltet eine um die Biegeachse rotierende Bewegung des Halbzeugs. Es kommt zu einer Verlagerung der neutralen Faser und zu einer zum Innenbogen anwachsenden Druckspannung in Längsrichtung. Neben dem Werkstofffluss in Längsrichtung stellt sich ein Werkstofffluss in Umfangsrichtung des Rohres ein. Dieser fördert Material aus dem Bereich des Innenbogens in den ausdünnenden Außenbogen. Dadurch können sowohl Druckspannungen am Innenbogen als auch Zugspannungen am Außenbogen abgebaut werden.

In praktischen Stauchversuchen und FE-Simulationen wurden Druckspannungsverläufe ermittelt, die oberhalb der Ergebnisse nach Schapitz liegen. Abweichungen zwischen den Ergebnissen praktischer Stauchversuche und mittels FE-Simulationen oder einem Formelwerk berechneter Stauchversuche können ihre Ursache in Umgebungseinflüssen haben. Zu den Einflussgrößen gehören u.a. die Reibung zwischen Halbzeug und Stauchwerkzeugen, die Temperatur, Gefügeinhomogenitäten sowie Form- und Lageabweichungen an Halbzeug und Werkzeugen.

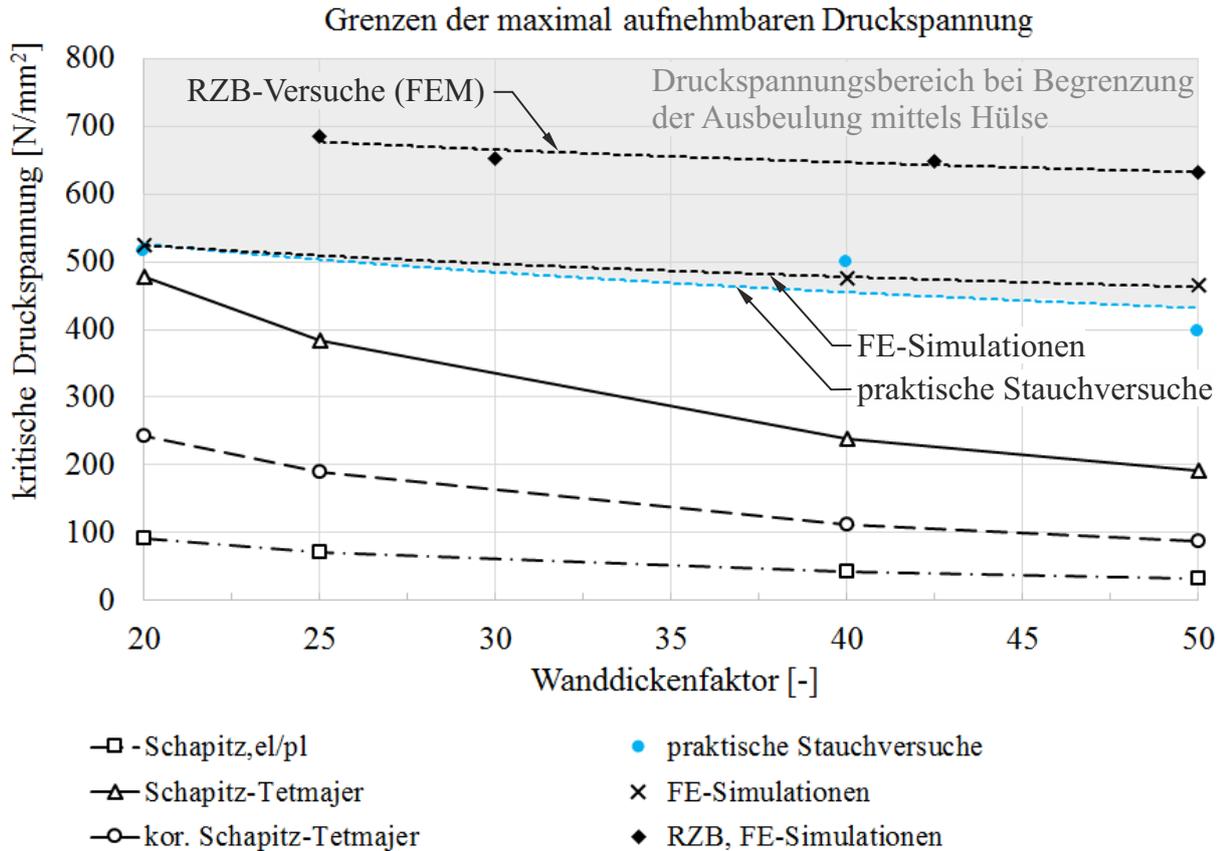


Abbildung 4.28: Einordnung der Versuchsergebnisse der Stauchprozesse aus praktischen Versuchen und FE-Simulationen in die Berechnungen nach Schapitz.

Praktische Versuche unterliegen Schwankungen, da die Umgebungseinflüsse z. T. nicht konstant gehalten werden können. Bei Erreichen der kritischen Druckspannung fällt die Stauchkraft stark ab. Dadurch liegen unterkritische und überkritische Zustände dicht beieinander.

In praktischen Stauchversuchen und FE-Simulationen wurde die Ausbeulung auf 0,45 mm und 0,65 mm im Durchmesser begrenzt. Der Druckspannungsverlauf bei Beginn der Ausbeulung ist gleich dem Verlauf ohne Begrenzung. Mit größer werdendem Stauchweg stellt sich eine Stabilisierung der Rohrwand und ein Spannungsanstieg ein, der durch den grau hinterlegten Bereich in Abbildung 4.28 gekennzeichnet ist. In diesem Bereich befinden sich auch die Ergebnisse der Rotationszugbiegeversuche. Der Einsatz einer begrenzenden Hülse kann das Druckspannungsniveau und die Ausprägung der Ausbeulung eines Stauchversuchs in den Bereich des Rotationszugbiegens verlagern. Das Spannungsniveau des Stauchversuchs ist abhängig von dem Hülsenspiel und dem Stauchweg, siehe Abbildung 4.27.

## 5 FE-Simulationsmodell zur Faltenvorhersage

Aus dem Stand der Technik geht hervor, dass die Faltenbildung eine Instabilität darstellt, die nur näherungsweise durch Berechnungen, wie FE-Simulationen, vorhergesagt werden kann. Die Entwicklung erweiterter FE-Simulationenmodelle hat zum Ziel, die Berechnungsergebnisse näher an die Ergebnisse praktischer Versuche zu führen.

Praktische Grundlagenversuche dienten der Vorbereitung des in Abschnitt 6.2 angewandten FE-Simulationsmodells. Neben den Zugversuchen zur Bestimmung der Werkstoffkennwerte der Halbzeuge wurde ein Versuchsstand zur Bestimmung der Reibungskoeffizienten zwischen den Halbzeugen und den Werkzeugen mittels Rohrziehversuchen entwickelt. Zudem wurden Verlagerungen unter Last an den in der Biegemaschine eingebauten Werkzeugen gemessen. Dadurch konnten Steifigkeiten ermittelt werden, die sich aus den Achsensteifigkeiten der Maschine und der Kompressibilität der Werkzeuge zusammensetzen.

Die in den vorbereitenden Versuchen ermittelten Werte dienten als Eingabegrößen für das FE-Simulationsmodell. Werkzeuge werden in der Regel als Starrkörperelemente (*Rigid Bodies*) modelliert. Die Eingabe der gemessenen Steifigkeiten erfolgte in Form von Feder-elementen, an denen die Werkzeuge gelagert wurden. Durch die Eingaben konnte eine gute Näherung der berechneten und gemessenen Kraft- und Faltenverläufe erzielt werden. Im Folgenden werden die Grundlagenversuche zur Erzeugung des in Abschnitt 6.2 angewandten FE-Simulationsmodells beschrieben.

### 5.1 Zugversuche und Werkstoffkennwerte

Zugversuche wurden auf der Universalprüfmaschine Z250 (Unterabschnitt 4.4.2) durchgeführt. Als Zugproben wurden Rohre aus dem Werkstoff X5CrNi18-10 mit der Werkstoffnummer 1.4301 und einem Außendurchmesser von 40 mm verwendet. Die Wanddicken betragen 2 mm, 1 mm und 0,8 mm. Die Rohrlänge betrug 300 mm. Die Rohre wurden im Ganzen gezogen, anstatt Zugproben nach DIN 50125 aus den Rohren zu fertigen. Die spanende Bearbeitung kann das Gefüge und damit die Werkstoffeigenschaften ändern. Füllstücke in den Rohrenden gewährleisteten ein Spannen zwischen den Spannbacken. Die Zugprüfung erfolgte gemäß DIN EN ISO 6892-1 und einer Traversengeschwindigkeit von 0,05 mm/s. Aufgezeichnet wurden die Traversenkraft sowie der Traversenweg. Die Streckgrenze  $R_{p0,2}$ , die Zugfestigkeit  $R_m$  und die Gleichmaßdehnung  $\varepsilon_{gl}$  wurden aus dem

arithmetischen Mittel dreier Zugversuche ermittelt. Die Kennwerte sind in Tabelle 5.1 aufgeführt.

Tabelle 5.1: Werkstoffkennwerte ermittelt aus Rohrzugversuchen (arithmetische Mittelwerte dreier Zugproben) an der Universalprüfmaschine Z250 gemäß DIN EN ISO 6892-1.

Kurzbezeichnung	Werkstoffnummer	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$\varepsilon_{gl}$ [%]
D40-W2-V005-m	1.4301	389	663	51
D40-W1-V005-m	1.4301	412	751	50
D40-W08-V005-m	1.4301	356	687	67

## 5.2 Bestimmung der Reibungskoeffizienten der Rotationszugbiegewerkzeuge

Rohrziehversuche wurden zur Bestimmung von Reibbeiwerten durchgeführt. Das Rotationszugbiegen kann nach HINKEL (2013) in tribologische Zonen eingeteilt werden. Die Zonen zwischen dem Gegenhalter und dem Rohr, dem Dorn und dem Rohr sowie dem Faltenglätter und dem Rohr beeinflussen maßgeblich den Werkstofffluss im Bereich der Faltenbildung. Ein Versuchsstand wurde an der Universalprüfmaschine Z250 entwickelt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

Die Rohrproben entsprachen den Zugproben aus Abschnitt 5.1. Sie wurden mit Hilfe eines innen liegenden Füllstücks in der oberen Traversenaufnahme eingespannt. Der Dreigliederdorn wurde im Rohrinernen montiert. In der unteren Traversenaufnahme wurde eine Dornaufnahme mit integriertem Zug-Druck-Sensor U9C mit einer Nennkraft von 20 kN der HOTTINGER UND BALDWIN MESSTECHNIK GMBH, Darmstadt, eingesetzt. Eine separate Spanneinheit ermöglichte die Positionierung von zwei Reibbacken. Die Kavität der Reibbacken entsprach einer Halbschale. Die Maße lagen innerhalb der Toleranzen, die am Gegenhalter und am Faltenglätter vorlagen. Durch ein Handrad wurde die Reibbacke auf Kontakt zum Rohr gefahren. Durch einen Hydraulikzylinder wurde die andere Reibbacke mit einer definierten Normalkraft angestellt. Ein Reibbackenpaar wurde aus dem Werkstoff 42CrMo4 mit der Werkstoffnummer 1.7225 gefertigt und auf 56 HRC gehärtet. Dies entsprach dem Werkstoff und der Härtung des Gegenhalters. Die Kontaktflächen wurden ähnlich der Gegenhalteroberfläche poliert, um eine möglichst ähnliche Rauheit zu erhalten. Ein Reibbackenpaar wurde aus dem Werkstoff CuAl10Fe (ALBROMET 200) mit der Werkstoffnummer CC331G entsprechend des Faltenglätters gefertigt. Die Kontaktflächen wurden, wie bei der Fertigung des Faltenglätters, geschlichtet. Die Rohroberflächen wurden ohne Reinigungsmittel gesäubert, ähnlich der Reinigung vor Biegeprozessen. Die tribologischen Zonen der Rotationszugbiegewerkzeuge wurden nachgestellt, um zugehörige Reibungskoeffizienten bestimmen zu können.

Die Rohrproben wurden durch Verfahren der oberen Traverse mit einer Ziehgeschwindigkeit von 10 mm/s entlang der Reibbacken verfahren.

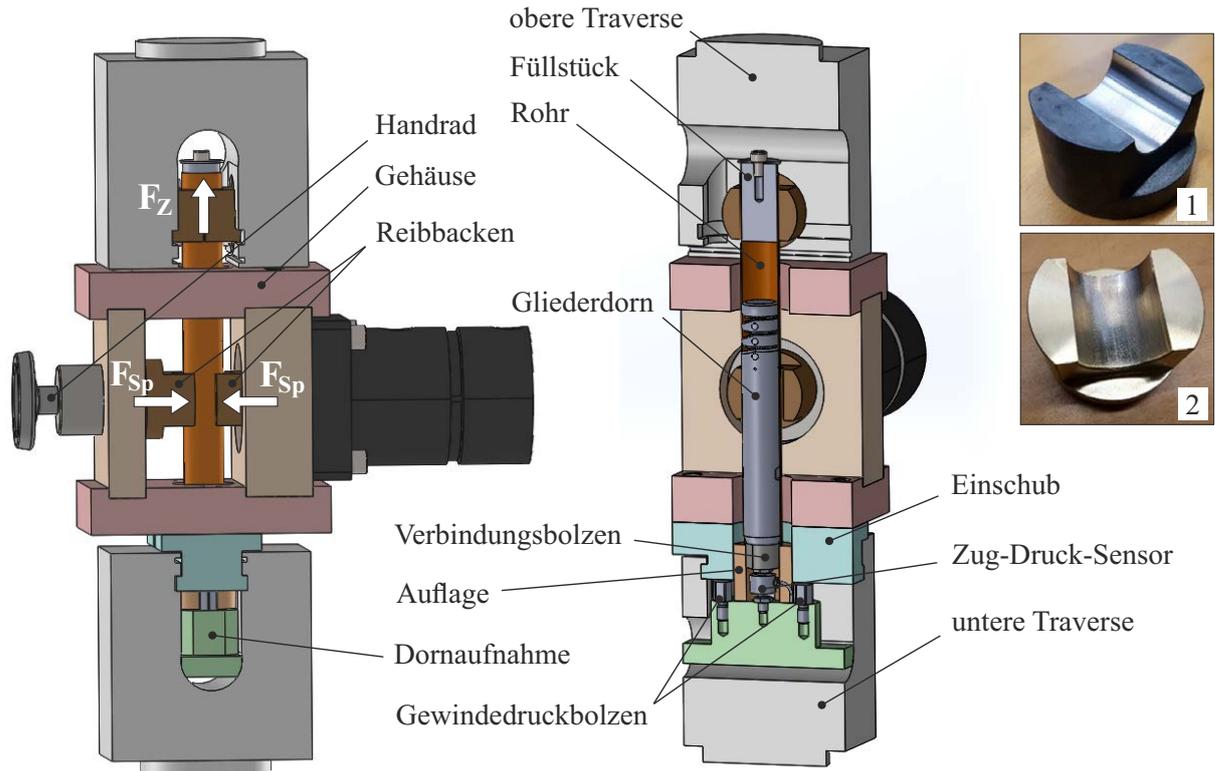


Abbildung 5.1: Versuchstand der Rohrziehversuche zur Bestimmung der Reibungskoeffizienten zwischen Spannbacken und Rohr. Ein poliertes Spannbackenpaar erhielt den Werkstoff, die Härte und das Toleranzfeld der Kavität des Gegenhalters (1). Ein geschichtetes Spannbackenpaar wurde entsprechend den Eigenschaften des Faltenglätters gefertigt (2).

Der Vorschubweg wurde begrenzt, sodass das untere Rohrende nicht durch die Reibbacken gezogen wurde. Das Durchziehen des Rohrendes hätte eine Verkleinerung der Kontaktflächen verursacht, die das Messergebnis verfälschen kann. Aufgezeichnet wurden der Traversenweg, die Traversenkraft, die Normalkraft an den Reibbacken und die Dornlängskraft. Zur Bestimmung der Reibungskoeffizienten wurde der Geometriefaktor für Rohrziehversuche nach HINKEL (2013) angewandt. Der Geometriefaktor  $G_H = \frac{\pi}{2}$  beschreibt das Verhältnis von Rohrziehversuchen zu Streifenziehversuchen. Mit den Gleichungen 5.1 und 5.2 wurden die für das FE-Simulationsmodell benötigten Reibungskoeffizienten  $\mu_R$  berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.2 aufgeführt. Detaillierte Diagramme der Reibungskoeffizienten über dem Traversenweg sind in Anhang A.4 aufgeführt. Die Werte in Abbildung 5.2 wurden aus dem arithmetischen Mittel von fünf Ziehversuchen ab einem Traversenweg von 50 mm bestimmt. Die gemessene Dornlängskraft war, ähnlich wie bei den in Kapitel 4.4.2 beschriebenen Versuchen, vergleichsweise gering.

$$F_Z = 2 \cdot F_R = 2 \cdot \eta_R \cdot F_{Sp} \quad \text{mit} \quad \eta_R = \mu_R \cdot G_H \quad (5.1)$$

$$\mu_R = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{F_Z}{F_{Sp}} \quad (5.2)$$

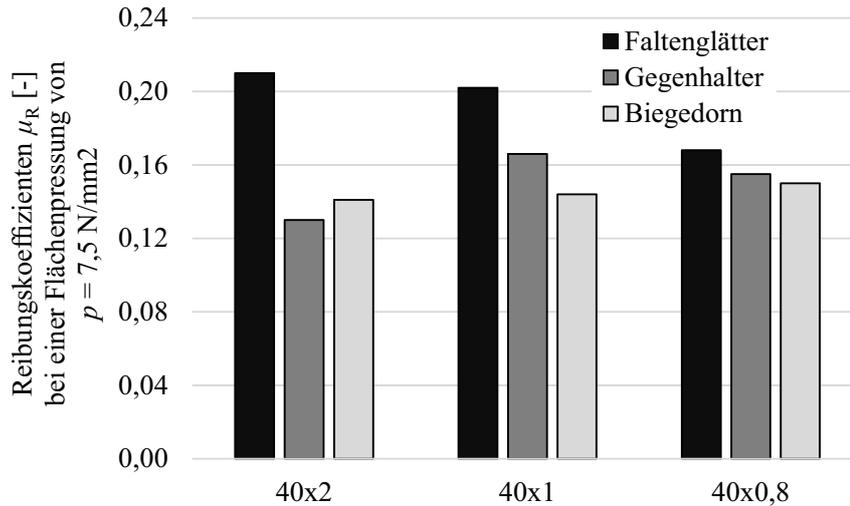


Abbildung 5.2: Reibungskoeffizienten der Rotationszugbiegewerkzeuge unter Berücksichtigung des Geometriefaktors nach HINKEL (2013) bei einer Flächenpressung von  $p = 7,5 \text{ N/mm}^2$  und einer Ziehgeschwindigkeit von  $10 \text{ mm/s}$ . Stellvertretend für den Biegedorn wurde das Reibbackenpaar des Faltenglätters in geschmiertem Zustand verwendet.

Zur Bestimmung der Reibungskoeffizienten der Biegedorne wurden Ziehversuche mit den Spannbacken aus Aluminiumbronze in geschmiertem Zustand durchgeführt und ausgewertet. Die ermittelten Werte für die Reibungskoeffizienten der Werkzeuge lassen sich in die Kennfelder der Reibungskoeffizienten in Abhängigkeit von der Flächenpressung und der Ziehgeschwindigkeit nach HINKEL (2013) einordnen, siehe Abbildung 5.3.

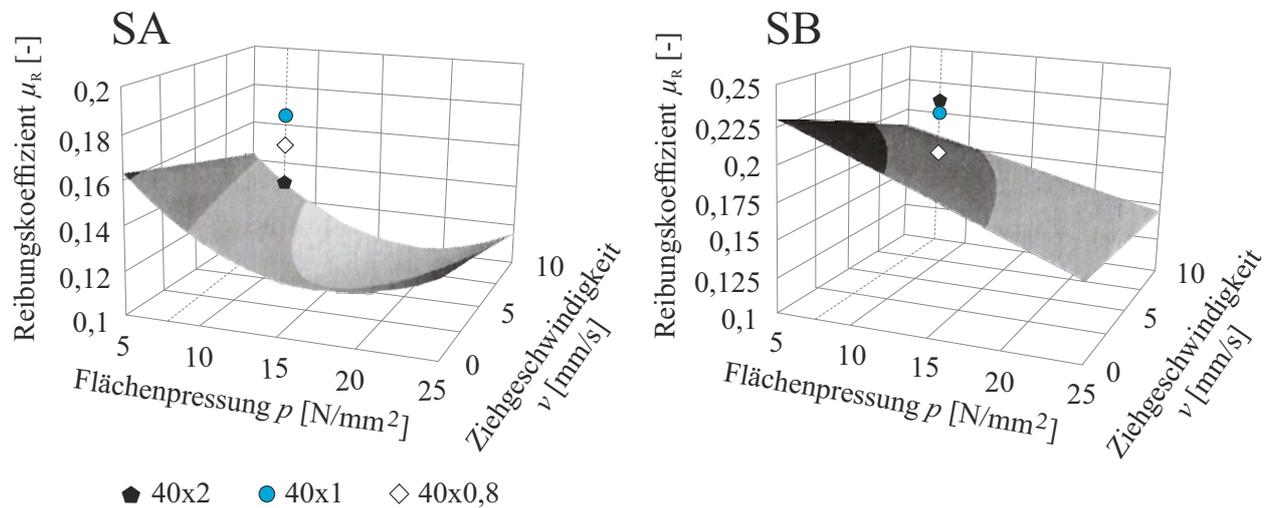


Abbildung 5.3: Einordnung der bei einer Flächenpressung von  $p = 7,5 \text{ N/mm}^2$  und einer Ziehgeschwindigkeit von  $10 \text{ mm/s}$  ermittelten Reibungskoeffizienten der Rotationszugbiegewerkzeuge in die Kennfelder nach HINKEL (2013).

Die Bezeichnung SA entspricht gehärteten Spannbacken aus dem Werkstoff X155CrVMo12-1 mit der Werkstoffnummer 1.2379 mit polierten Reibflächen (Mittenrauwert von  $Ra = 0,07 \mu\text{m}$ ). Die Bezeichnung SB entspricht gehärteten Spannbacken aus dem gleichen Werkstoff mit geschlichteten Reibflächen (Mittenrauwert von  $Ra = 3,16 \mu\text{m}$ ). In das Kennfeld der polierten Spannbacken SA wurden die Reibungskoeffizienten der polierten Gegenhalterspannbacken eingetragen. In das Kennfeld der geschlichteten Spannbacken SB wurden die Ergebnisse der geschlichteten Faltenglätterspannbacken eingeordnet. Die Ergebnisse liegen in der gleichen Größenordnung, aber oberhalb der Kennfelder nach HINKEL (2013). Abweichende Mittenrauwerte können die Unterschiede in den Ergebnissen verursachen.

### 5.3 Bestimmung der Maschinennachgiebigkeit

Es wird zwischen der Achsensteifigkeit und der Werkzeugsteifigkeit unterschieden, siehe Unterabschnitt 4.2.1. Die Steifigkeit einer Maschinenachse wird aus der Auffederung der Achse in Abhängigkeit von der anliegenden Kraft berechnet. Die Werkzeugsteifigkeit bezieht sich auf die elastische Verformung des Werkzeugs in Abhängigkeit von dem Elastizitätsmodul des Werkstoffs.

Im Folgenden werden praktische Versuche an der lehrstuhleigenen Biegemaschine TN 120 (siehe Unterabschnitt 4.1.2) zur Bestimmung der Maschinennachgiebigkeit beschrieben. Die Auffederungen wurden an den eingebauten Werkzeugen gemessen. Dadurch setzen sich die ermittelten Steifigkeitsverläufe sowohl aus der Achsenverlagerung als auch aus der elastischen Verformung der Werkzeuge zusammen. Welche Größe welchen Anteil an den gemessenen Auffederungen trägt, geht aus diesen Versuchen nicht hervor. Die Versuchsergebnisse dienen als Eingabegrößen für das FE-Simulationsmodell zur Faltenvorhersage. Die Steifigkeitsverläufe wurden in Form von Federelementen an den Werkzeugen des FE-Simulationsmodells vorgesehen, siehe Abschnitt 6.2.

#### Gegenhalter

Für den Gegenhalter wurden zwei Steifigkeiten ermittelt, eine am vorderen Ende (Gh, vorne) und eine am hinteren Ende (Gh, hinten), siehe Abbildung 5.4. Der Gegenhalter kann sich in Abhängigkeit von den Steifigkeiten und den wirkenden Kräften um die Höhenachse verdrehen. Bei der Steifigkeitsmessung wurde auf eine gleichmäßige Kraftverteilung am vorderen und hinteren Ende des Gegenhalters geachtet. Eine Platte aus gehärtetem Stahl, gegen die der Gegenhalter gestellt wurde, wurde entsprechend ausgerichtet. Die Größenordnungen der Kraftverläufe wurden entsprechend der in praktischen Rotationszugbiegeversuchen gemessenen Werkzeugkräfte gewählt.

Zur Messung der Kraft wurden zwei Kraftmessdosen 301.100kN mit einer Messunsicherheit von  $\leq \pm 0,08 \%$  der TEST GMBH, Erkrath, in den Gegenhalter integriert. Zur Wegmessung wurden am vorderen und hinteren Ende zwei Wegaufnehmer SM222.4 (Feintaster) der SCHREIBER MESSTECHNIK GMBH, Oberhaching, mit einer Messgenauigkeit von  $\pm 0,5 \%$  montiert. Zusätzlich wurde der Gesamtverfahrweg am Antriebszylinder der Gegenhalterachse mit einem Wegaufnehmer SM222.4 gemessen.

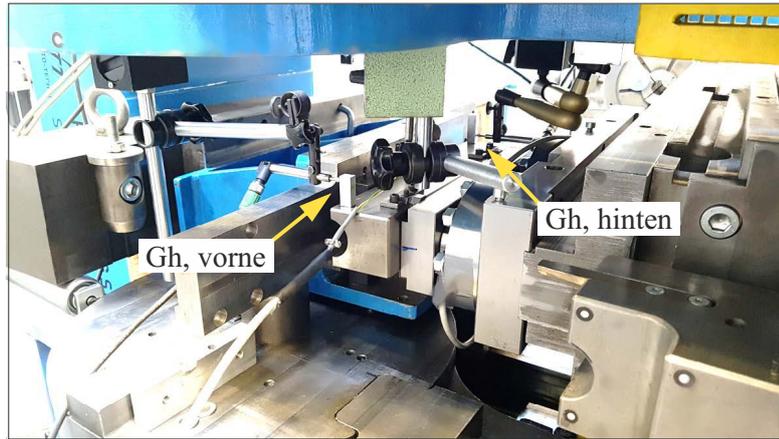


Abbildung 5.4: Versuchsanordnung zur Messung der Gegenhaltersteifigkeiten mit einem Wegaufnehmer am vorderen Ende des Gegenhalters (Gh, vorne) und einem Wegaufnehmer am hinteren Ende (Gh, hinten).

Der am Werkzeug gemessene Weg ist kleiner als der am Zylinder gemessene. Die Differenz aus beiden entspricht der Verlagerung des Gegenhalters. Abbildung 5.5 a) zeigt den Gesamtverfahrweg des Antriebszylinders sowie den Verfahrweg und die resultierende Verlagerung am vorderen Ende des Gegenhalters in Abhängigkeit von der Normalkraft. In Abbildung 5.5 b) ist die Verlagerung des hinteren Gegenhalterendes in Abhängigkeit von der Normalkraft aufgetragen. Die Verläufe der Steifigkeiten konnten nur bedingt durch eine Gerade angenähert werden. In den FE-Simulationen wurde die Approximation durch eine Potenzreihe gewählt.

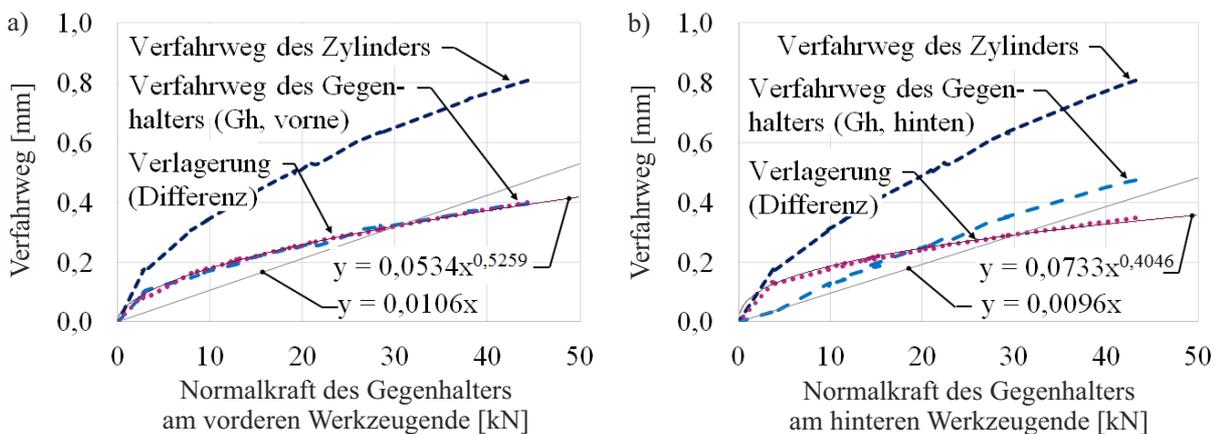


Abbildung 5.5: Verlagerung des Gegenhalters in Abhängigkeit von der Gegenhalternormalkraft a) am vorderen und b) am hinteren Werkzeugende als Differenz aus dem Gesamtverfahrweg, gemessen am Hydraulikzylinder der Maschinenachse, und dem Verfahrweg des Werkzeugs.

## Biegeform

Ein gehärteter Vollstab wurde in die Biegeform eingelegt, um die Steifigkeit der Biegeachse quer zur Stabrichtung zu messen, siehe Abbildung 5.6 a). Die Kraft wurde durch Heranfahren des Gegenhalters an den Vollstab aufgebaut. Die Verlagerung der Biegeform wurde mit dem Wegaufnehmer SM222.4 gemessen.

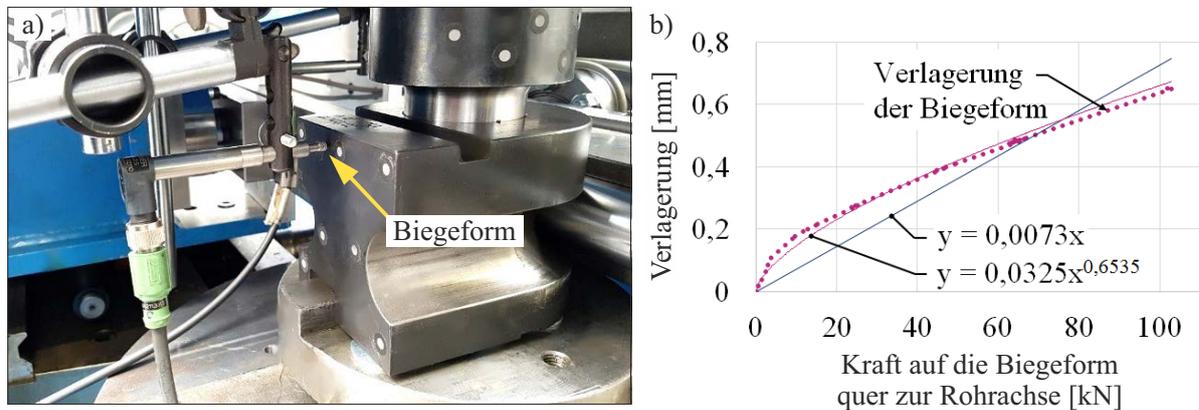


Abbildung 5.6: a) Versuchsanordnung und b) Verlauf der Steifigkeit der Biegeform in Querrichtung zur Rohrachse.

Die an der Biegeform wirkende Kraft wurde aus der Summe der Kräfte der Kraftmessdosen am Gegenhalter berechnet. In Abbildung 5.6 b) ist der Steifigkeitsverlauf der Biegeform in Querrichtung zur Rohrachse dargestellt.

## Faltenglätter

Der Falten glätter stützt sich mit der dünn auslaufenden Spitze an der Biegeform ab. Das hintere Werkzeugende ist an der Falten glätteraufnahme befestigt. Die Kraft auf den Falten glätter und seine Aufnahme wurde durch Zufahren des Gegenhalters aufgebracht, siehe Abbildung 5.7 a). Mit dem Wegaufnehmer SM222.4 wurde die Verlagerung aufgezeichnet. Die Normalkraft auf die Falten glätteraufnahme wurde mit der Kraftmessdose 301.20kN gemessen.

Abbildung 5.7 b) zeigt, dass die Steifigkeit des Falten glätters durch eine lineare Funktion angenähert werden kann. Während des Biegeprozesses wird der größte Anteil der Normalkraft des Falten glätters von dem vorderen Werkzeugende auf die Biegeform übertragen. Die Steifigkeit des hinteren Falten glätterendes wurde bis zu einer Normalkraft von 12 kN gemessen.

Zusammenfassend sind in Tabelle 5.2 die Federsteifigkeiten der Achsen aufgeführt. Die Werte entsprechen den Geradensteigungen der linearen Näherungen. In dem FE-Simulationsmodell wurden bis auf die Falten glättersteifigkeit alle Steifigkeiten als Approximationen durch Potenzreihen eingegeben.

In Abschnitt 6.2 werden praktische Rotationszugbiegeversuche beschrieben, deren Ergebnisse mit den Ergebnissen aus FE-Simulationen und Gleichungen aus der Biegetechnik

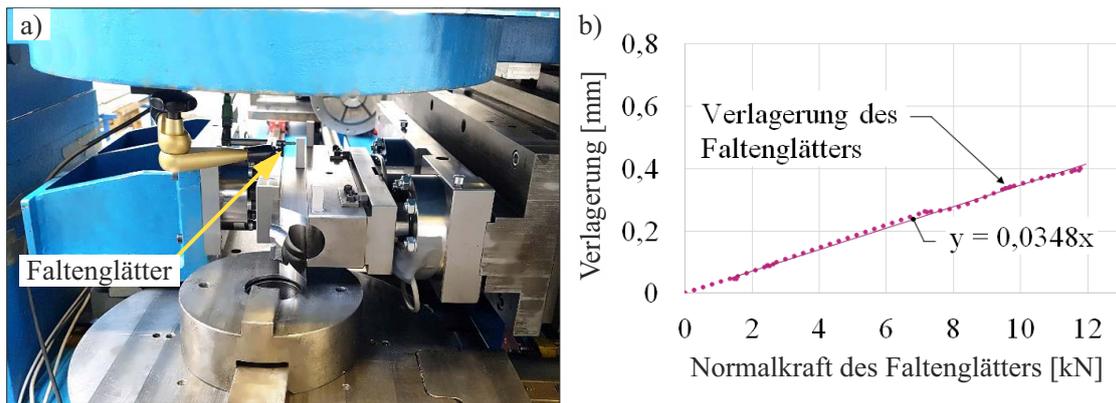


Abbildung 5.7: a) Versuchsanordnung und b) Verlauf der Steifigkeit des Faltenglätters.

Tabelle 5.2: Steifigkeiten der Maschinenachsen an der Rotationszugbiegemaschine TN 120, linear und durch Potenzreihen approximiert.

Rotationszugbiege- werkzeuge	Steifigkeit [kN/mm] bei linearer Approximation	Parameter der Steifigkeitsfunktionen bei Approximation durch eine Potenzreihe	
		Faktor	Exponent
Gegenhalter, vorne	94	0,0534	0,5259
Gegenhalter, hinten	104	0,0741	0,4017
Biegeform	137	0,0325	0,6535
Faltenglätter	29	-	-

verglichen wurden. Die in Tabelle 5.2 aufgeführten Parameter wurden als Steifigkeitsfunktionen von Federelementen in den FE-Simulationen berücksichtigt.

Die in Abschnitt 5.1, 5.2 und 5.3 ermittelten Eingabegrößen für das FE-Simulationsmodell ermöglichten Berechnungsergebnisse, die den Ergebnissen praktischer Rotationszugbiegeversuche nah kommen. In FE-Simulationen können unnachgiebige Werkzeuge stark ansteigende Kräfte verursachen. Besonders die Verwendung der Federelemente an den Werkzeugen konnte die berechneten Verläufe der Kräfte und Faltenausprägungen näher an die gemessenen Verläufe herantreiben.

## 6 Methoden zur In-situ-Messung der Faltenbildung

Nach ALLWOOD et al. (2016) arbeiten Umformprozesse unter Bedingungen der Unsicherheit aufgrund von Parametervariationen und unvollständigem Verständnis. Diese Unsicherheit führt zu einer Verschlechterung der Produkteigenschaften im Vergleich zu den Kundenspezifikationen, die nach ALLWOOD et al. (2016) durch den Einsatz von Regelkreisen reduziert werden kann. Um die Möglichkeiten zu verbessern, nicht nur globale, sondern auch lokale Produkteigenschaften komplexer Teile vorherzusagen, müssen nach TEKKAYA et al. (2015) verbesserte Messmethoden eingesetzt werden.

Im Folgenden werden Methoden zur In-situ-Messung der Faltenbildung vorgestellt, um Anzeichen von Falten beim Rotationszugbiegen frühzeitig zu erkennen. Messsysteme können als Rückführung von Regelkreisen dienen. Die Verläufe ihrer Messwerte verändern sich, wenn Falten entstehen. Der Übergangspunkt von der stabilen zur instabilen Rohrwand kann in Messwertverläufen abgelesen werden. Die Faltenbildung kann durch Gegenmaßnahmen verhindert werden, wenn der Übergangspunkt während des Prozesses so früh erkannt wird, dass sich die Faltenbildung in einem reversiblen Status befindet. Die frühzeitige Detektion der Falten kann eine Prozessregelung ermöglichen, welche die Werkzeugkräfte und Achsenwege während des Biegeprozesses nachregelt.

### 6.1 Taktile Faltencharakterisierung während des Biegens

Zur Untersuchung der Faltenbildung während des Rotationszugbiegeprozesses wurden praktische Experimente mit der Biegemaschine TN 120 (siehe Unterabschnitt 4.1.2) durchgeführt. Gebogen wurden Rohre aus dem Werkstoff X5CrNi18-10 mit einem Außendurchmesser von 40 mm und einer Wanddicke von 1 mm. Der Biegeradius beträgt 60 mm bei einem Biegewinkel von 90° unter Last. Mit dem Winkelsensor *ASM PRMAG 20* der AUTOMATION SENSORIK MESSTECHNIK GMBH, Moosinning, wurde der Biegewinkel, der sich zwischen dem rotierenden Biegearm und dem feststehenden Maschinengestell aufspannt, aufgezeichnet. Das Rohrende wurde in der inneren und äußeren Spannbacke nach HINKEL (2013) gespannt. Das andere Rohrende blieb ungespannt. Der Faltenklärer wurde konventionell positioniert, siehe Abschnitt 4.3. Der Dornschaft des Drei-Gliederdorns wurde so ausgerichtet, dass seine vordere Stirnseite in der Übergangsebene lag. 5° vor Biegeende wurde der Dorn aus der Umformzone herausgezogen, um einen gleichmäßigeren Materialfluss ohne Kraftspitzen zu erzielen. Der Gegenhalter wurde in Längsrichtung des Rohres bewegt, um die Relativgeschwindigkeit und damit die Reibungskräfte zwischen

Rohr und Gegenhalter zu minimieren. Eine reduzierte Geschwindigkeit in der Anfangsphase ist wichtig, um Kollisionen zwischen dem (in Längsrichtung bewegten) Gegenhalter und der äußeren Spannbacke zu vermeiden. Die Gegenhalterzustellung in Querrichtung wurde so eingestellt, dass faltenbehaftete Rohrbögen produziert wurden.

Zur Vermessung der Rohrrinnenkontur wurde eine Tastspitze (1) an die Rohroberfläche angelegt, siehe Abbildung 6.1 a). Die Bewegungen der Tastspitze wurden über den Hebelarm (2) auf den Feintaster (3) übertragen. Der Feintaster SM222.4 der SCHREIBER MESSTECHNIK GMBH, Oberhaching, hat eine Messgenauigkeit von  $\pm 0,5\%$ . Der taktile Messaufbau wurde in den Faltenglätter (4) integriert, der sich an die Biegeform (5) anlegt. Eine Zugfeder (6) gewährleistete den Kontakt zwischen Tastspitze und Rohroberfläche. Die gefertigten Werkzeuge und ihre Montage an der Biegemaschine sind in Abbildung 6.1 b) dargestellt.

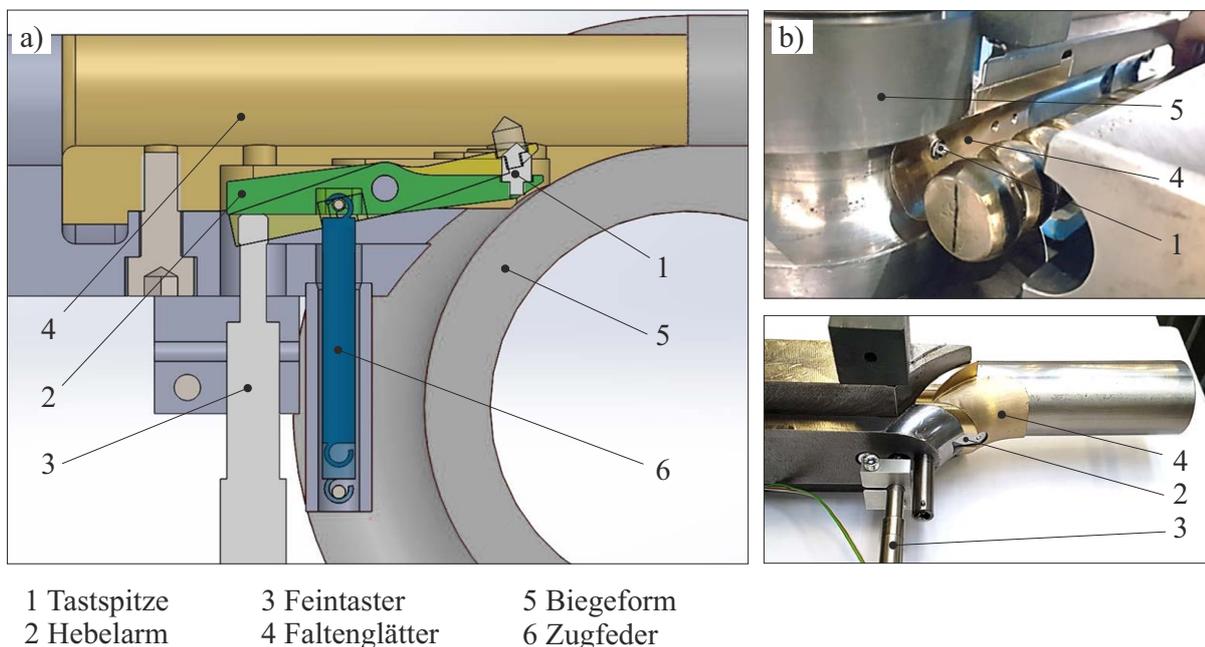


Abbildung 6.1: Werkzeuganordnung mit Integration eines Feintasters im Faltenglätter zur In-situ-Detektion der Faltenbildung. a) CAD-Konstruktion und b) Werkzeugmontage.

Abbildung 6.2 zeigt den Verlauf des Messweges und des Biegewinkels über der Zeit. Während des Zufahrens der Werkzeuge verringert sich der Messweg des Feintasters, da der Faltenglätter an das Rohr angedrückt wird. Befinden sich die Werkzeuge in Biegeposition, beginnt die Rotation. Ab einem Biegewinkel von  $30^\circ$  bis  $90^\circ$  misst der Feintaster eine Kontur mit größer werdenden Falten. Die Faltenberge sind entsprechend dem links abgebildeten Rohrbogen nach unten gerichtet und die Falten Täler nach oben. Während des Auffahrens der Werkzeuge nimmt der Messwert des Feintasters zu, da der Faltenglätter sich vom Rohr entfernt.

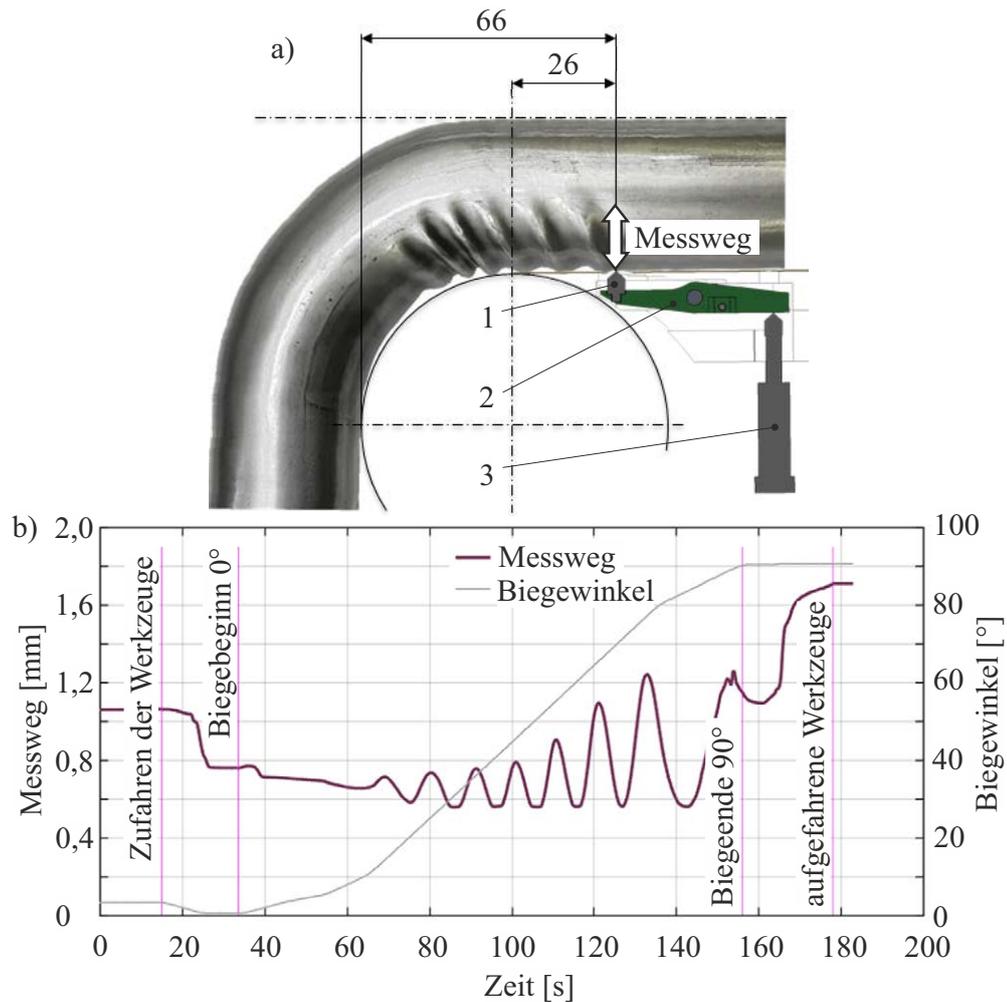


Abbildung 6.2: Vermessung der Rohrkontur mittels Feintaster. a) Messaufbau und b) Verlauf des Messweges.

Selbst kleine Falten mit einer Amplitude von ca. 0,1 mm wurden von dem Feintaster erkannt. Für einen Vergleich der gemessenen Kontur mit der tatsächlichen Kontur wurde die faltenbehaftete Rohrkontur, ähnlich wie in Unterabschnitt 4.1.1 beschrieben, mit dem *Faro Edge 2,7 M* Koordinatenmessarm eingescannt und mit der Software *MATLAB R2016b* weiterverarbeitet. Eine Auswertung der Messung hinsichtlich der Amplitude und dem Abstand der Falten lässt die folgenden Aussagen zu. Die Falten bilden sich vor dem Sensor im Bereich des geraden Rohrabschnitts und nehmen mit fortschreitendem Biege- winkel zu. Später werden sie in der Biegung zusammengeschoben. Durch die Erfassung der Falten an nur einem Punkt ist nicht sichergestellt, dass die erste Falte frühzeitig erkannt wird. Durch die Erfassung der Rohrkontur entlang eines Linienzuges können nicht nur die Höhen und Abstände der Falten, sondern auch die Position und der Zeitpunkt der ersten Falte erfasst werden. Im folgenden Kapitel wird der Einsatz eines Laser-Liniensensors untersucht.

## 6.2 Faltencharakterisierung während des Biegens mittels Rohrkontur- und Kraftmessung

In praktischen Rotationszugbiegeversuchen an der Biegemaschine TN 120 (siehe Unterabschnitt 4.1.2) wurden weitere Messsysteme zur Detektion der Falten untersucht. Ziel war es signifikante Merkmale der Faltenentstehung in den Messwertverläufen zu finden. Durch den Vergleich der Messkurven von faltenfreien und faltenbehafteten Rohrbögen konnten Veränderungen in den Kurvenverläufen der Faltenbildung zugeordnet werden. Die nachfolgenden Sensoren wurden in die Werkzeuge integriert, siehe Abbildung 6.3,

1. ein Laser-Liniensensor, der durch eine Aussparung im Faltenglätter die Rohrkontur misst
2. ein Zug-Druck-Sensor, der in die Dornstange integriert wurde und die Dornlängskraft erfasst
3. eine Kraftmessdose in der Faltenglättieraufnahme, welche die Normalkraft des Faltenglätters erfasst
4. und je eine Kraftmessdose am vorderen und hinteren Ende des Gegenhalters, um die Verteilung der Normalkraft auf den Gegenhalter zu messen.

### 6.2.1 Versuchsaufbau mit Integration externer Messsysteme

Die untersuchten Biegeaufgaben entsprechen einem Biegefaktor von  $B = 1,5$  und Wanddickenfaktoren von  $W = 20$ ,  $W = 40$  und  $W = 50$ . Die Rohre bestehen aus dem Werkstoff X5CrNi18-10 (1.4301) und haben einen Außendurchmesser von 40 mm und Wandstärken von 2 mm, 1 mm und 0,8 mm. Die weiteren Prüfbedingungen entsprachen den in Abschnitt 6.1 beschriebenen Versuchen. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 6.3 dargestellt.

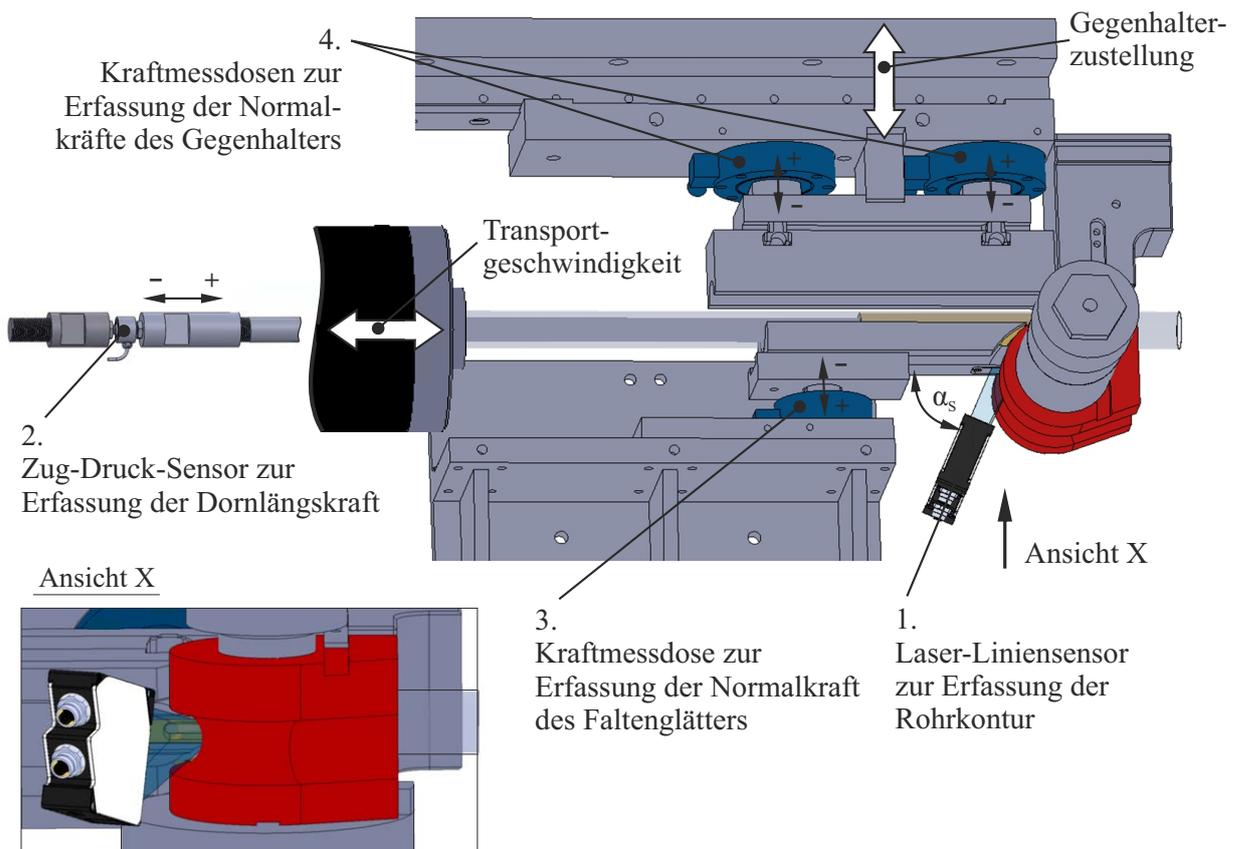


Abbildung 6.3: Einbau der Sensoren zur Faltenmessung an der Rotationszugbiegemaschine.

Der Zug-Druck-Sensor U9C mit einer Genauigkeitsklasse von 0,2 und einer Nennkraft von 20 kN der HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH, Darmstadt, wurde in die Dornstange integriert, um die Dornkraftreaktion in Rohrlängsrichtung zu erfassen. Die Kraftmessdose 301.20kN mit einer Messunsicherheit  $\leq \pm 0,08 \%$  und einer Nennkraft von 20 kN der TEST GMBH, Erkrath, wurde konstruktiv unter Vermeidung eines Kraftnebenschlusses in der Faltenglätteraufnahme vorgesehen. Sie zeichnete den Verlauf der Faltenglätternormalkraft auf. Zwei weitere Kraftmessdosen 301.100 kN mit einer Messunsicherheit  $\leq \pm 0,08 \%$  und einer Nennkraft von 100 kN der TEST GMBH, Erkrath, wurden an den Enden der Gegenhalteraufnahme vorgesehen. Sie lieferten den Verlauf der Normalkraftverteilung des Gegenhalters. Die Kraftverläufe wurden über das in Unterabschnitt 4.4.2 beschriebene rechnerunterstützte MES verarbeitet.

Der Laser-Liniensensor LLT 2900-50 2D, ein Kurzwellenlaser für präzise und stabile Konturmessung der MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GMBH & Co. KG, Ortenburg, wurde hinter der Faltenglätteraufnahme platziert, sodass die Laserlinie im Bereich vor der Übergangsebene auf die Rohroberfläche trifft. Die Laserlinie wurde auf das Rohr projiziert, die diffuse Reflexion von einer Matrix aufgefangen und mit 1.280 Punkten (pro Punkt ein X-/Z-Wert bei vollem Messfeld) ausgegeben. Die Faltenglätteraufnahme und der Faltenglätter mussten dafür mit einer Aussparung versehen werden, wie in Abbil-

dung 6.4 dargestellt. Der Sensor musste in einem Abstand von 70 mm bis 120 mm vom Rohr entfernt platziert werden. Das Messprinzip ist die Lasertriangulation in 2D, bei der aus der Positionsänderung eines Punktes mit Hilfe der Winkelfunktionen die Entfernung der Rohroberfläche zum Laserprojektor berechnet wird. Damit war die Möglichkeit gegeben, auftretende Falten während des Biegeprozesses zu vermessen (Position und Höhe der Falten).

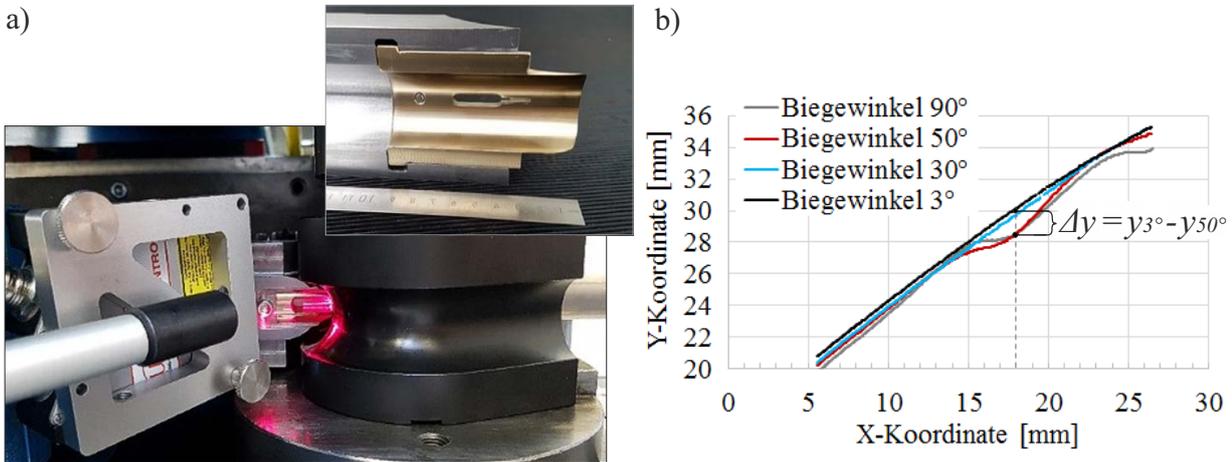


Abbildung 6.4: a) Anordnung des Laser-Liniensensors im Bereich hinter dem Faltenglätter mit Blick auf das Rohr. b) Darstellung der Rohdaten eines aufgezeichneten Profils mit Schrägstellung aufgrund der Anordnung des Sensors zur Rohroberfläche.

Das Resultat war ein topographisches Höhenprofil, welches die Oberflächenkontur widerspiegelt und während des Biegens mit einer Frequenz von 5 Hz gemessen wird. Die Laserlinie musste möglichst nah an der Umformzone positioniert werden, daher wurde der Sensor unter einem Winkel  $\alpha_S$  zur Rohrlängsachse platziert. Der Winkel darf laut Hersteller einen Wert von  $30^\circ$  nicht unterschreiten. Die Profile wurden mit der Software scanCONTROL Configuration Tools 6.1 der MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GMBH & Co. KG, Ortenburg, an einem Messcomputer aufgezeichnet und mit der Software *MATLAB R2016b* der THE MATHWORKS, INC., Natick, USA, verarbeitet.

## 6.2.2 Durchführung praktischer Biegeversuche

Die Gegenhalterzustellung und die Transportgeschwindigkeit wurden variiert, um unterschiedliche Falten zu erzeugen, siehe Abbildung 6.3. Als Nullposition des Gegenhalters wurden die am weitesten vom Rohr entfernten Achsenpositionen gewählt, die zu faltenbehafteten Rohrbögen führten. Bei den Versuchen unter Variation der Gegenhalterzustellung war das Rohrende nicht im Spannfutter der Transporteinheit fixiert und konnte frei nachlaufen. Der Faltenbewertungsfaktor wurde anhand des in Unterabschnitt 4.1.1 beschriebenen Vorgehens ermittelt. Je höher der Bewertungsfaktor, desto mehr weicht die Ist-Kontur des Innenbogens von der Soll-Kontur ab. Die Transportgeschwindigkeit wird mit dem in Unterabschnitt 4.1.2 beschriebenen Geschwindigkeitsfaktor angegeben. Der Versuchsplan ist in Tabelle 6.1 aufgeführt.

Tabelle 6.1: Versuchsplan praktischer Biegeversuche zur Untersuchung faltensignifikanter Messverläufe beim Rotationszugbiegen.

Probenkurzbezeichnung	Gegenhalterposition [mm]	Gegenhalterkraft, max. [kN]	Gegenhalterzustellung $\Delta s_{Gh}$ [mm]	Transportfaktor $f_{v,Tr}$ [-]	Faltenbewertungsfaktor $\Omega$ [ $10^{-3}$ ]
R-40x1-GH06	333,8	35,9	0,6	-	0
R-40x1-GH04	334,0	27,2	0,4	-	0
R-40x1-GH02	334,2	26,7	0,2	-	1,4
R-40x1-GH0	334,4	25,7	0	-	3,1
R-40x1-TR86	334,0	27,8	0,4	0,86	0
R-40x1-TR90	334,0	31,5	0,4	0,90	3,0
R-40x1-TR94	334,0	33,1	0,4	0,94	3,2
R-40x2-GH08	335,2	32,8	0,8	-	0
R-40x2-GH06	335,4	32,6	0,6	-	0
R-40x2-GH02	335,8	31,2	0,2	-	6,8
R-40x2-GH0	336,0	32,0	0	-	7,9
R-40x2-TR86	335,4	31,8	0,6	0,86	0
R-40x2-TR90	335,4	37,0	0,6	0,90	0
R-40x2-TR98	335,4	44,9	0,6	0,98	0
R-40x2-TR100	335,4	51,8	0,6	1,00	2,5
R-40x2-TR104	335,4	60,6	0,6	1,04	5,1
R-40x08-GH03	333,1	86,1	0,3	-	0
R-40x08-GH01	333,3	73,2	0,1	-	0,8
R-40x08-GH0	333,4	65,4	0	-	1,8
R-40x08-TR80	333,0	86,7	0,4	0,80	0
R-40x08-TR86	333,0	95,5	0,4	0,86	0,5
R-40x08-TR90	333,0	97,0	0,4	0,90	0,4
R-40x08-TR94	333,0	98,1	0,4	0,94	1,4

### 6.2.3 Ergebnisse der Rohrkonturmessungen

Die Rohrkontur eines faltenbehafteten Rohrbogens (R-40x1-GH0) ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Die Falten sind bei einer Gegenhalterzustellung von 0 mm aufgetreten. Der Laser-Liniensensor zeichnete kontinuierlich die Koordinaten der Rohrkontur in Form von Profilen auf. Zu jedem Biegewinkel liegt ein Profil aus 1.280 Punkten mit X- und Y-Koordinaten vor. Anstelle der Y-Koordinate ist die Differenz zu der Y-Koordinate bei 3° aufgetragen, um der Schrägstellung des Verlaufs der Rohdaten entgegenzuwirken, siehe Abbildung 6.4 b). Dadurch werden die Faltenamplituden deutlicher dargestellt. Bei einem Biegewinkel von 5° befand sich die Rohrkontur noch in ihrer Ausgangslage. Bis zu einem Biegewinkel von 30° stellte sich eine Verlagerung der Rohrwand in Richtung des Dorns ein. Eine wellenförmige Kontur wurde ab einem Biegewinkel von 35° gemessen, deren Amplitude mit fortschreitendem Biegewinkel zunahm.

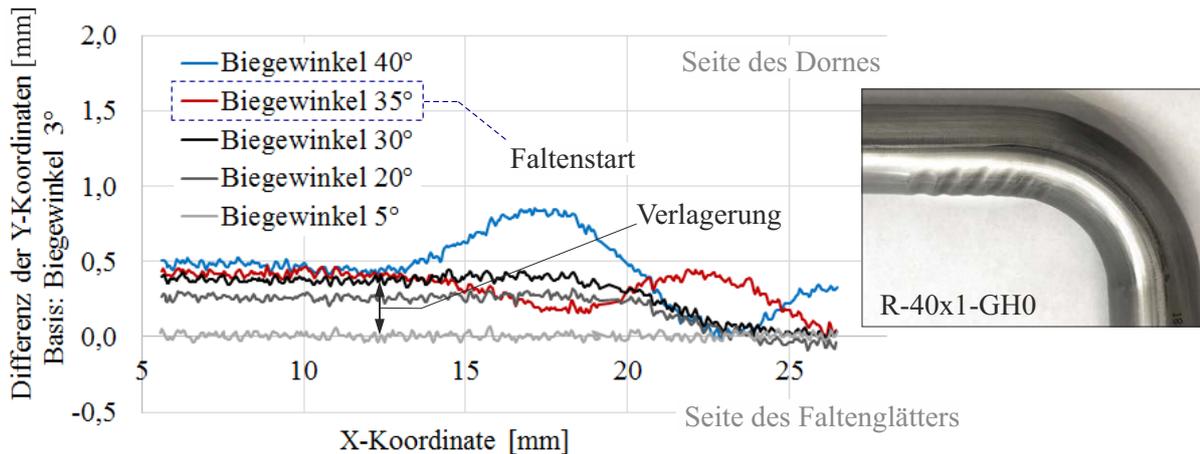


Abbildung 6.5: Mittels Laser-Liniensensor gemessene Rohrkontur am Innenbogen für die Probe R-40x1-GH0 in Abhängigkeit von dem Biegewinkel.

In Abbildung 6.6 ist die Rohrkontur eines Rohrbogens (R-40x1-TR94) dargestellt, der Falten bei einem Geschwindigkeitsfaktor des Transportes von 0,94 aufweist. Die Rohrwand verlagerte sich nicht, was durch das Nachschieben des Materials in die Umformzone und damit durch überlagerte Druckspannungen begründet werden kann. Im Messbereich des Laser-Liniensensors bildete sich ab einem Biegewinkel von  $65^\circ$  eine wellenförmige Kontur aus.

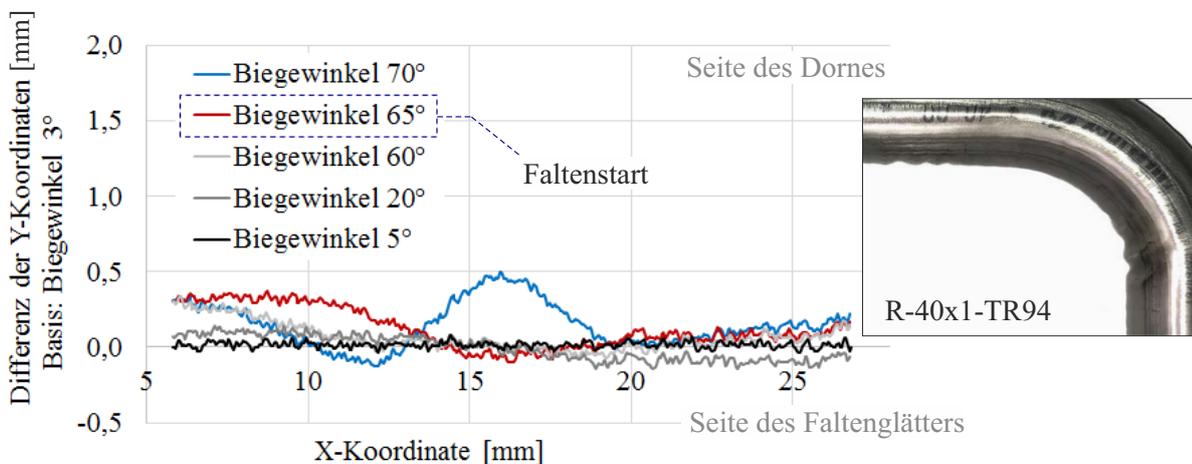


Abbildung 6.6: Mittels Laser-Liniensensor gemessene Rohrkontur am Innenbogen für die Probe R-40x1-TR94 in Abhängigkeit von dem Biegewinkel.

Mit fortschreitendem Biegewinkel steigt die Amplitude der Faltenkontur. Falten verlagern sich hauptsächlich in Richtung des beweglichen Dornes, da sie der Faltenglätters in ihrer Ausbreitung begrenzt. Durch die überlagerten Druckspannungen scheint sich die Rohrwand in die Aussparung des Faltenglätters drücken zu können, sodass die Profile stellenweise negative Differenzen der Y-Koordinaten aufweisen können. Die Profilverläufe weiterer Biegeaufgaben sind in Abbildung 6.7 dargestellt.

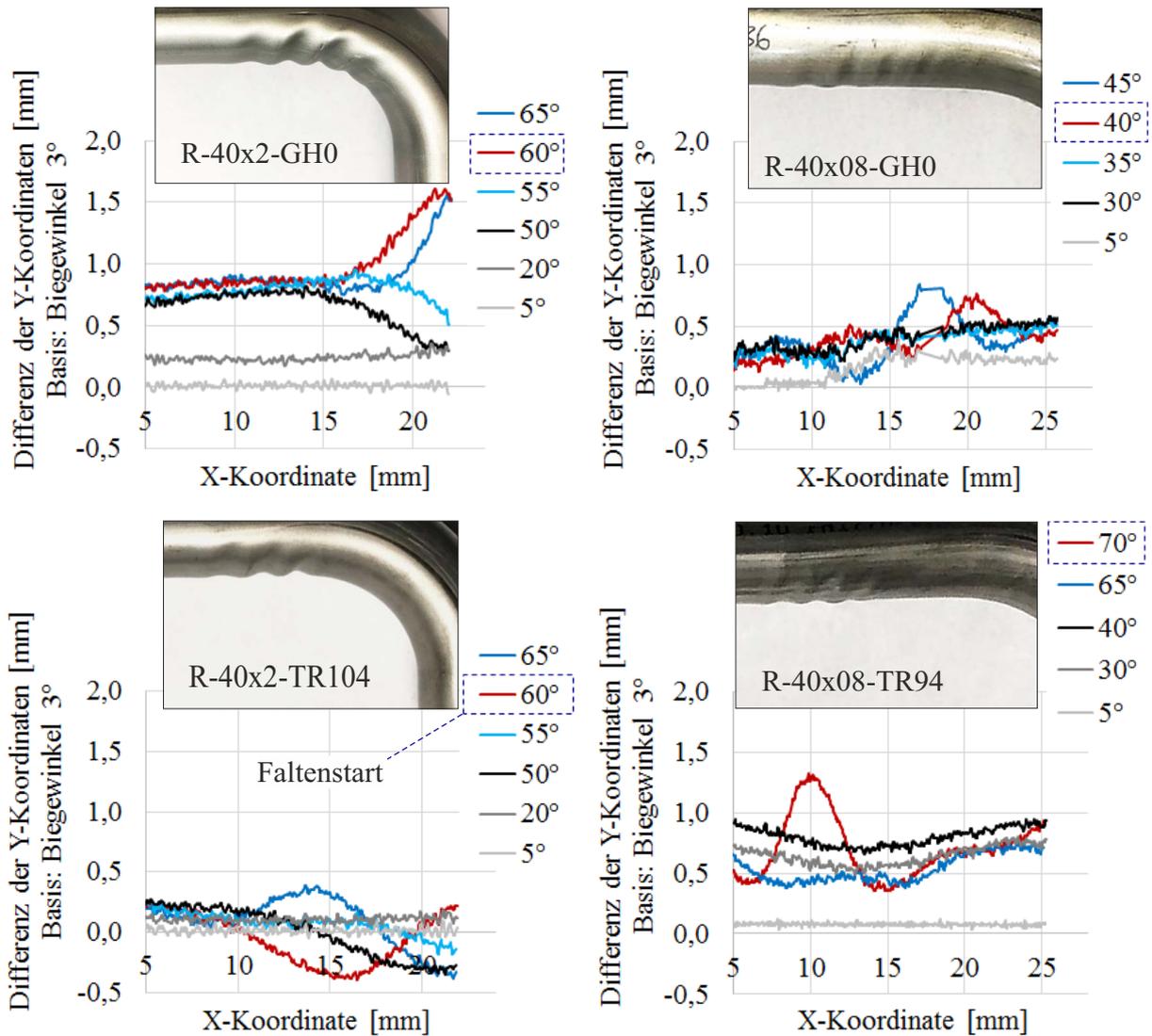


Abbildung 6.7: Mittels Laser-Liniensensor gemessene Rohrkontur am Innenbogen für die Proben R-40x2-GH0 und R-40x2-TR104 sowie R-40x08-GH0 und R-40x08-TR94 in Abhängigkeit von dem Biege Winkel.

Im Vorgriff auf Abschnitt 7.2 kann festgehalten werden, dass die Rohrkonturmessung als Eingangsgröße des Reglers zur Detektion von Primärfalten herangezogen werden konnte. Der Übergangspunkt zwischen Verlagerung und Faltenstart wurde durch Auswertung der in Tabelle 6.1 aufgeführten Biegeversuche bei Y-Differenzen zwischen 0,17 mm und 0,3 mm definiert. Der Bereich beschreibt den Übergang von dem stabilen, faltenfreien Prozess in den instabilen Zustand. Er wurde als Grenzen in den in Abschnitt 7.2 beschriebenen Fuzzy-Sets vorgesehen. Ab einer Y-Differenz von 0,17 mm leitete der Regler Gegenmaßnahmen ein.

## 6.2.4 Ergebnisse der Kraftmessungen

Die Kraftreaktionen der Dorne, des Faltenglätters und des Gegenhalters wurden für die Versuche R-40x1 mit den Berechnungen von FE-Simulationen und dem analytischen Modell nach HINKEL (2013) verglichen. Die Parameter der FE-Simulationen wurden entsprechend der praktischen Versuche eingestellt. Die Bestimmung der für das FE-Simulationsmodell benötigten Kenngrößen ist in Kapitel 5 beschrieben. Das Werkstoffverhalten wurde durch Fließkurven nach SWIFT (1952) beschrieben, die anhand von Zugversuchen ermittelt wurden. Reibungskoeffizienten wurden mit Rohrziehversuchen gemessen und nach COULOMB in dem Modell vorgesehen. Die Maschinensteifigkeit wurde durch Federelemente an den Achsen entsprechend den Messwerten in den FE-Simulationen berücksichtigt, ähnlich wie in der Untersuchung aus Abschnitt 4.2. Das verwendete FE-Simulationsprogramm *Pam Stamp Professional 2019.0* der ESI-GROUP, Neu-Isenburg, ist mit seinem explizit rechnenden Unterprogramm *Pam-Tube* spezialisiert auf Rohrbiegesimulationen von komplexen Bauteilen mit kleinen Biegeverhältnissen. Das Modell wurde mit Volumenelementen aufgebaut. Es wurde ein isotropes Verhalten nach VON MISES als Spezialfall von HILL 48 angenommen. Die Halbzeuge haben eine Länge von 500 mm und einen Außendurchmesser von 40 mm. Die Netzgröße beträgt 1,2 mm. Es wurde mit drei Elementen über der Wanddicke gerechnet. Die Werkzeuge wurden mit auf Federelementen gelagerten Starrkörperelementen (*Rigid Bodies*) modelliert. Der Dorn wurde als Mehrkörpersystem ausgelegt. Die Bewegung zwischen den Dornkugeln und dem Dornschaft wurde daher kinematisch durch Gelenke eingeschränkt.

In den FE-Simulationen wurde, wie in den praktischen Versuchen, die Gegenhalterzustellung variiert. Der Abstand zwischen Faltenglätterkavität und Gegenhalterkavität ist aus den praktischen Versuchen nicht bekannt. Um die FE-Simulationen den praktischen Versuchen zuzuordnen, wurden die gemessenen und berechneten Werte des Versuchs R-40x1-GH0 mit gleichen Normalkräften im Anfangsbereich (bei Biegewinkeln zwischen  $10^\circ$  und  $15^\circ$ ) gleichgesetzt. Die Verläufe der Gegenhalternormalkräfte am vorderen und hinteren Werkzeugende sind in Abbildung 6.8 dargestellt.

Die Gegenhalternormalkräfte am vorderen Ende nehmen mit fortschreitendem Biegewinkel ab, da sich der vordere Bereich des mitfahrenden Gegenhalters aus der Umformzone herausbewegte. Das hintere Ende bewegte sich mit fortschreitendem Prozess auf die Übergangsebene und damit auf die Umformzone zu. Die Normalkraft des hinteren Endes steigt mit zunehmendem Biegewinkel an. Die Ergebnisse der FE-Simulationen liegen unterhalb der Ergebnisse der praktischen Versuche. Die mit dem vorderen Kraftsensor gemessenen Gegenhalterkräfte nehmen bei Biegewinkeln  $< 10^\circ$  hohe Werte an, was durch einen Kontakt zur Biegeform verursacht werden kann. Der Messverlauf des vorderen Kraftsensors weist bei dem Versuch R-40x1-GH0 geringe Schwankungen auf, die durch die Faltenbildung verursacht werden können. Die Gegenhalternormalkraft zeigt bei dem Versuch R-40x1-GH02 keine Reaktionen auf die Falten. Die Gegenhalternormalkraft wurde nicht als Faltenindikator und Eingangsgröße für den Regler herangezogen.

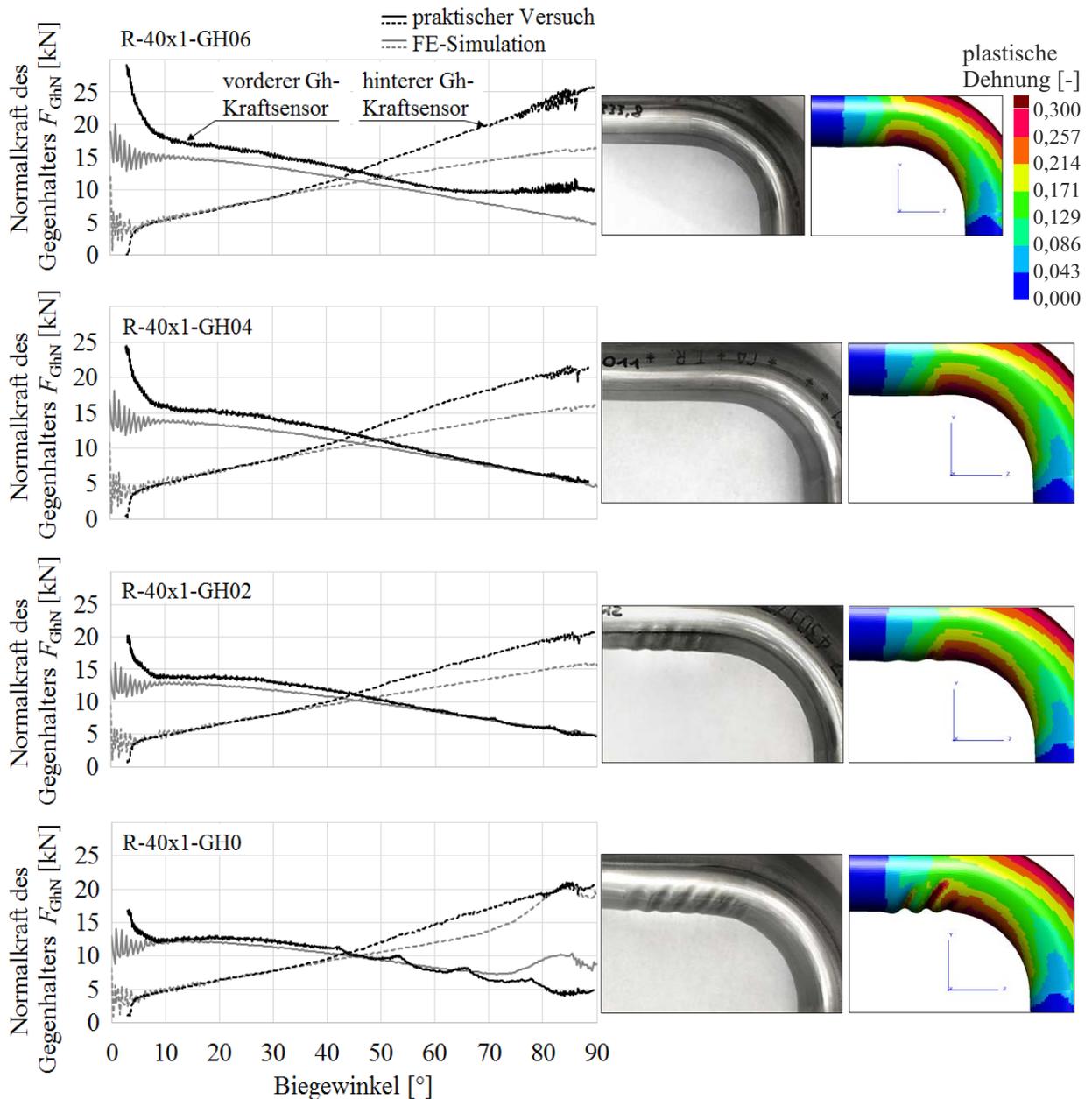


Abbildung 6.8: Vergleich der Verläufe der Gegenhalternormalkräfte am vorderen und hinteren Werkzeugende aus praktischen Versuchsergebnissen und Berechnungen von FE-Simulationen für die Proben R-40x1-GH06 (faltenfrei) bis R-40x1-GH0 (faltenbehaftet).

Die Verläufe der Dornlängskraft für die Versuche R-40x1-GH06 (faltenfrei) bis R-40x1-GH0 (faltenbehaftet) unter Variation der Gegenhalterzustellung sind in Abbildung 6.9 aufgeführt. Bei Gegenhalterzustellungen von 0 mm und 0,2 mm entstanden Primärfalten im geraden Rohrabschnitt. Nach dem analytischen Modell von HINKEL (2013) kann die Dornkraft in Abhängigkeit von der Gegenhalternormalkraft und der Dorneigenschaften berechnet werden, siehe Gleichung 2.21 und 2.22. Unterschieden werden die Dornkräfte bei einem, zwei oder drei Dorngliedern. Die Gegenhalternormalkraft ist aus den Ergebnissen

der praktischen Versuche bekannt. Mit zunehmender Gegenhalterzustellung nimmt das Gesamtniveau des Dornkraftverlaufs zu. Die berechneten Verläufe (FE-Simulationen und analytisches Modell) ähneln den Ergebnissen der praktischen Versuche. Die Ergebnisse des analytischen Modells liegen bei den Versuchen R-40x1-GH06 oberhalb und bei den Versuchen R-40x1-GH0 unterhalb der gemessenen Werte. Bilden sich Falten, kommt es zu Kraftspitzen, siehe Probe R-40x1-GH0 und R-40x1-GH02. Bei einem Vergleich der Versuche R-40x1-GH0 mit Abbildung 6.5 detektiert der Laser-Liniensensor bereits bei einem Biegewinkel von  $35^\circ$  Primärfalten. Der Dornkraftverlauf zeigt bei einem Biegewinkel von  $54^\circ$  kleine und bei  $67^\circ$  große Falten an. Die FE-Simulation der Probe R-40x1-GH02 weist im Gegensatz zu den praktischen Versuchen keine Reaktion der Dornkraft auf die Primärfalten auf.

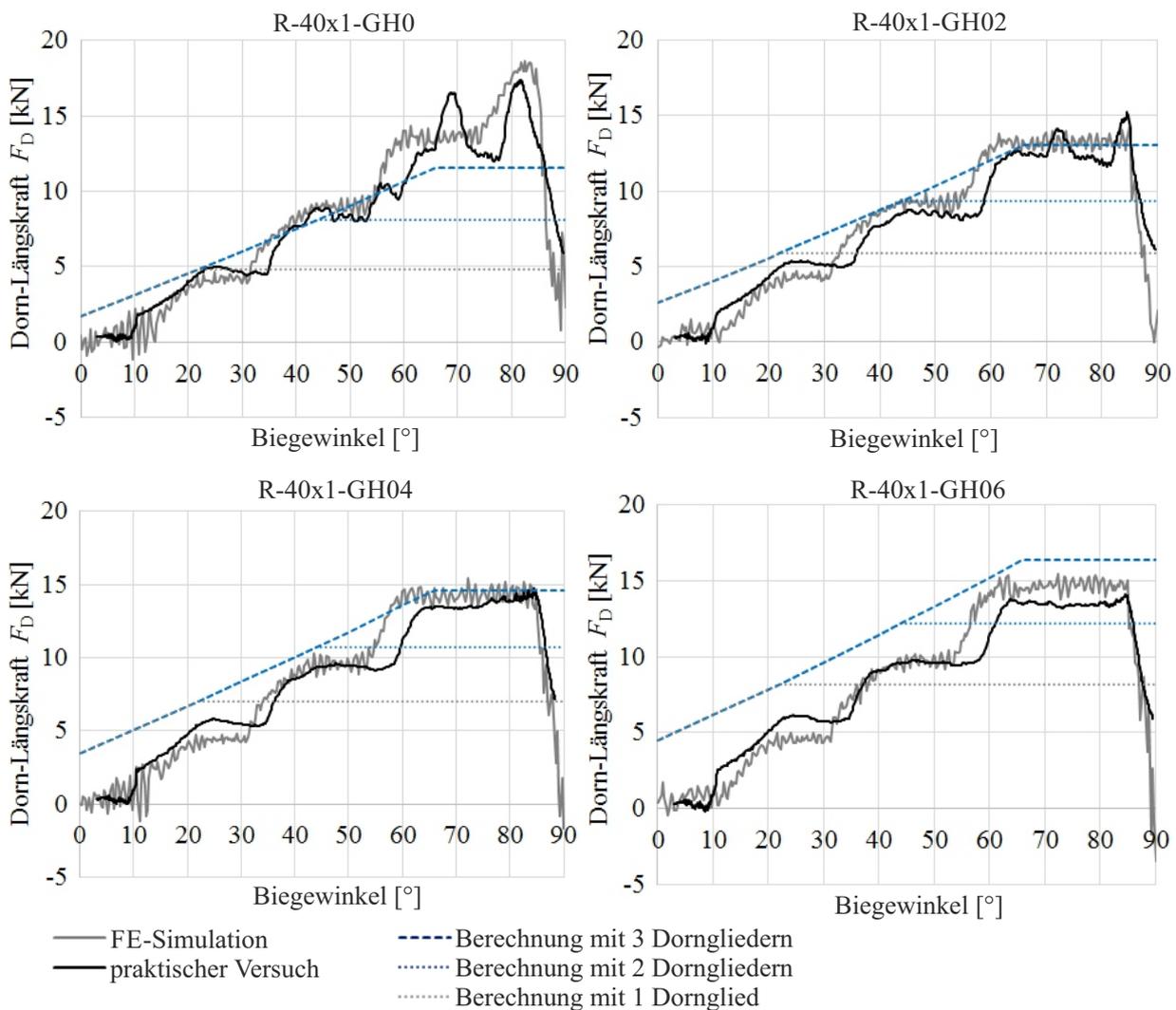


Abbildung 6.9: Vergleich der Verläufe der Dornlängskräfte aus praktischen Versuchsergebnissen, Berechnungen von FE-Simulationen sowie Berechnungen nach den Gleichungen von HINKEL (2013) für die Proben R-40x1-GH06 (faltenfrei) bis R-40x1-GH0 (faltenbehaftet).

Es wird angenommen, dass die Dornlängskraft auf Falten reagiert, die in den Bogenbereich geschoben werden. Die Dornlängskraft wurde, Abschnitt 7.2 vorgehend, als Faltenindikator im Bogenbereich für den Regler definiert. Falten signifikant sind Kraftabfälle, da Kraftanstiege auch bei faltenfreien Rohrbögen entstehen (siehe Abbildung 7.3). Als Instabilitätspunkt zwischen dem faltenfreien und faltenbehafteten Zustand wurde eine negative Steigung von  $-0,24 \text{ kN}/^\circ$  in den Dornkraftverläufen der drei Biegeaufgaben ausgewertet. Die Auswertung und Entwicklung der Fuzzy-Mengen sind in Abschnitt 7.2 beschrieben.

Abbildung 6.10 zeigt den Verlauf der Faltenglätternormalkraft der Versuche R-40x1-GH06 (faltensfrei) bis R-40x1-GH0 (faltensbehaftet). In dem linken Diagramm sind die in praktischen Versuchen gemessenen Verläufe dargestellt. Das rechte Diagramm zeigt die Ergebnisse der FE-Simulationen. Beide Diagramme enthalten die anhand des analytischen Modells berechneten Kraftwerte. Laut Gleichung 2.17 kann die Faltenglätternormalkraft aus der Differenz der Gegenhalternormalkraft und der aus dem ideellen Biegemoment resultierenden Kraft  $F_I$  berechnet werden, siehe Unterabschnitt 2.1.5. Die Gegenhalternormalkraft ist aus den Ergebnissen der praktischen Versuche bekannt.

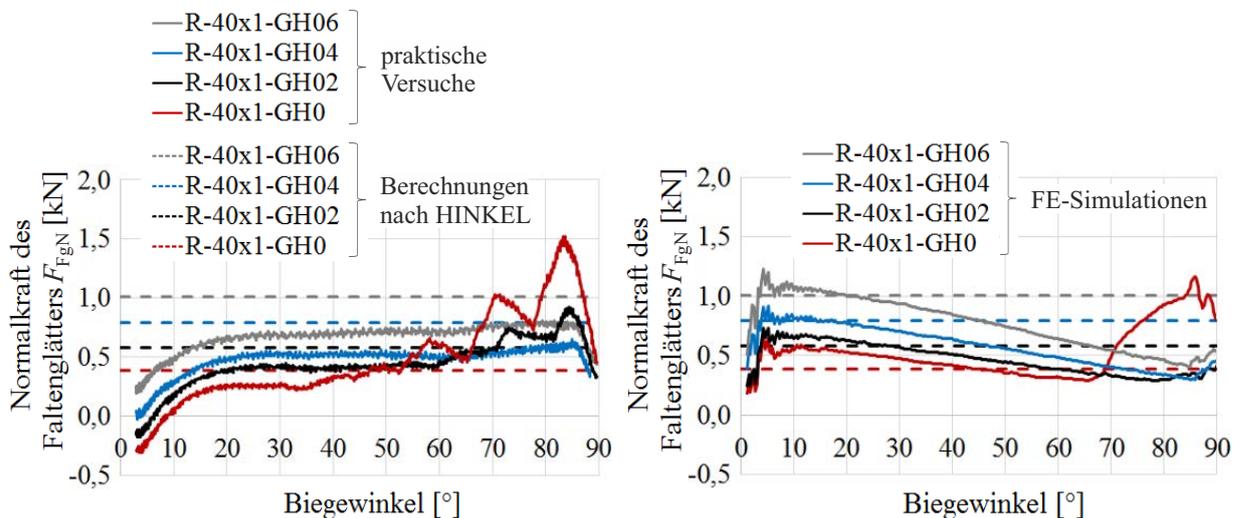


Abbildung 6.10: Vergleich der Verläufe der Faltenglätternormalkräfte aus praktischen Versuchsergebnissen, Berechnungen von FE-Simulationen sowie Berechnungen nach den Gleichungen von HINKEL (2013) für die Proben R-40x1-GH06 (faltensfrei) bis R-40x1-GH0 (faltensbehaftet).

Beide Diagramme zeigen, dass mit zunehmender Gegenhalterzustellung das Gesamtniveau der Faltenglätternormalkraft steigt. Die gemessenen Kraftverläufe der faltensbehafteten Rohrbögen weisen größer werdende Kraftanstiege und -abfälle auf. Diese Reaktion kann auf die Primärfalten zurückgeführt werden, unter der Annahme, dass die ausbeulende Rohrwand gegen den Faltenglätter drückt (siehe Abbildung 7.5). Bei dem Versuch R-40x1-GH0 zeigt der Kraftverlauf ab  $52^\circ$  eine Reaktion auf die Falten. Der Laser-Liniensensor detektierte diese Falten bereits ab einem Biegewinkel von  $35^\circ$ . Die Ergebnisse der FE-Simulationen liegen in der gleichen Größenordnung wie die Kraftverläufe der praktischen Versuche. Sie weisen anstelle von konstanten Kräften mit steigendem Biegewinkel abneh-

mende Kräfte auf. Der Versuch R-40x1-GH0 weist einen Kraftanstieg ab einem Biegewinkel von  $68^\circ$  auf.

Primärfalten können Änderungen in dem Normalkraftverlauf des Faltenglätters auslösen, siehe auch Abbildung 6.13. Die Faltenglätterkraft wurde als Eingangsgröße für den Regler zur Detektion von Primärfalten definiert. Falten in der Übergangsebene, die durch den Laser-Liniensensor nicht mehr erfasst wurden, konnten durch Kraftänderungen des Faltenglätters detektiert werden, siehe Unterabschnitt 8.3.5. Als Übergangspunkt in den instabilen Bereich lässt sich ein Kraftanstieg mit einer Steigung von mindestens  $0,028 \text{ kN}/^\circ$  definieren. Die Auswertung weiterer Grenzen der Fuzzy-Sets ist in Abschnitt 7.2 beschrieben.

Bei den Versuchen R-40x1-TR86 (faltenfrei) bis R-40x1-TR94 (faltenbehaftet) wurde die Transportgeschwindigkeit variiert. Die Verläufe der Dornlängskraft sind in Abbildung 6.11 dargestellt. Die faltenbehafteten Rohrbögen weisen Sekundärfalten im Bogenanfang auf. Die Kraftverläufe der Versuche R-40x1-TR90 und R-40x1-TR94 zeigen ab einem Biegewinkel von  $36^\circ$  negative Steigungswerte als Reaktion auf die Sekundärfalten. Die Rohrkonturen des Versuchs R-40x1-TR94 in Abbildung 6.7 zeigen erst ab einem Biegewinkel von  $65^\circ$  Falten, da der Laser-Liniensensor nur Falten im geraden Rohrbereich vor der Übergangsebene erfassen kann. Dies bestätigten die Messwerte des Versuchs R-40x1-TR90, bei dem ausschließlich Sekundärfalten entstanden, siehe Abbildung 6.11. Der gemessene Konturverlauf dieses Versuchs zeigte im Gegensatz zu dem Dornkraftverlauf keine Falten. Dadurch wird die Annahme unterstützt, dass Sekundärfalten, die im Bogenbereich entstehen, von dem Dornkraftsensor detektiert werden können.

Die FE-Simulation des Versuchs R-40x1-TR94 weist ähnlich wie der reale Rohrbogen Primär- und Sekundärfalten auf. Der Dornkraftverlauf liegt unterhalb des Verlaufs aus dem praktischen Versuch. In dem berechneten Versuch R-40x1-TR90 entstanden keine Falten, während sich im praktischen Versuch kleine Sekundärfalten bildeten. In Tabelle 6.2 sind die Faltenbewertungsfaktoren der FE-Simulationen im Vergleich zu den realen Rohrbögen aufgeführt.

Tabelle 6.2: Faltenbewertungsfaktoren der praktischen Versuche und FE-Simulationen aus Abschnitt 6.2 zur Ermittlung faltensignifikanter Messsysteme.

Probenkurzbezeichnung	Gegenhalterzustellung $\Delta s_{Gh} [mm]$	Transportfaktor $f_{v,Tr} [-]$	Faltenbewertungsfaktor $\Omega [10^{-3}]$	Faltenbewertungsfaktor FEM, $\Omega [10^{-3}]$
R-40x1-GH06	0,6	-	0	0
R-40x1-GH04	0,4	-	0	0
R-40x1-GH02	0,2	-	1,4	3,0
R-40x1-GH0	0	-	3,1	8,4
R-40x1-TR86	0,4	0,86	0	0
R-40x1-TR90	0,4	0,90	3,0	0
R-40x1-TR94	0,4	0,94	3,2	5,6

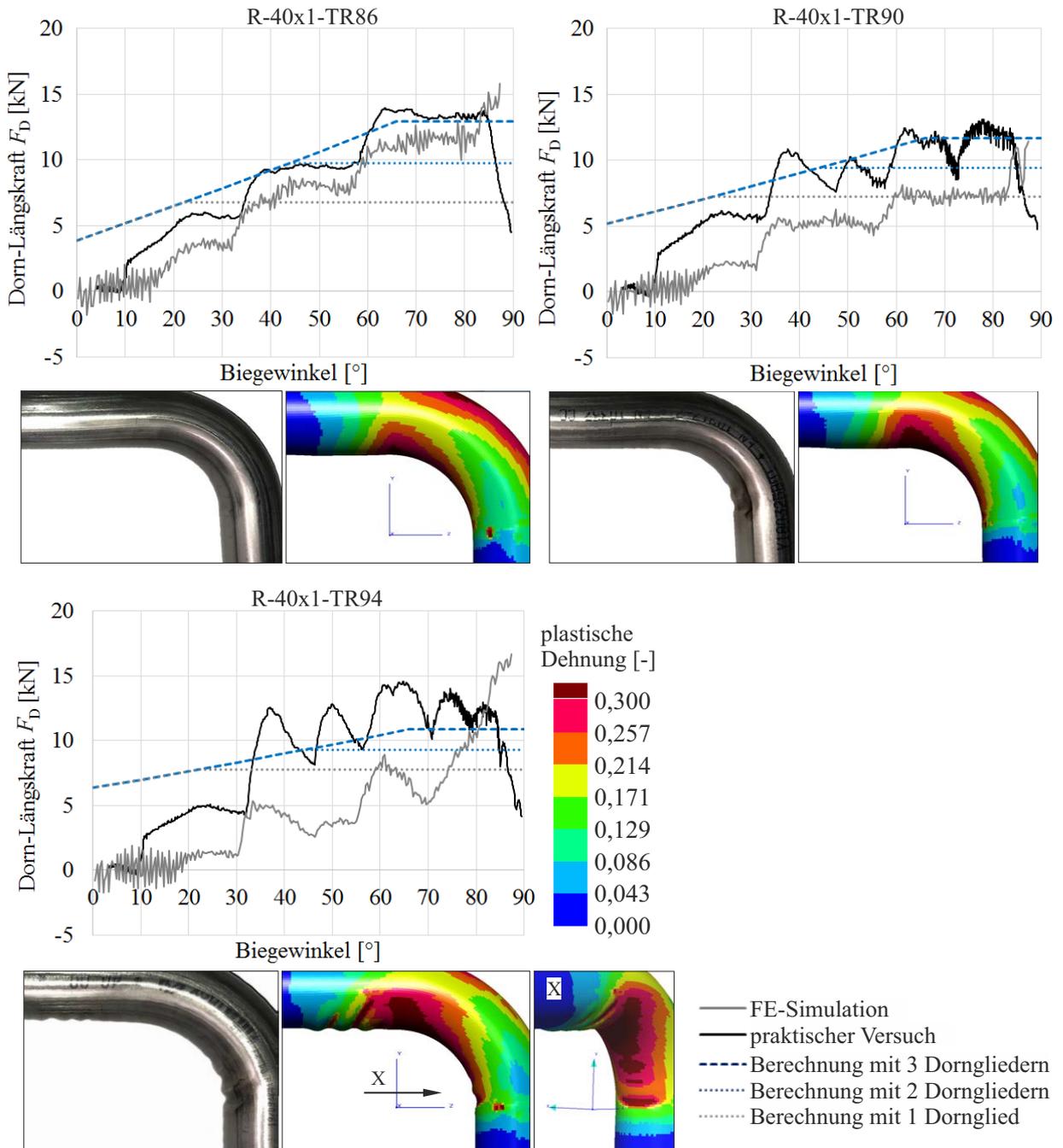


Abbildung 6.11: Vergleich der Verläufe der Dornlängskräfte aus praktischen Versuchsergebnissen, Berechnungen von FE-Simulationen sowie Berechnungen nach den Gleichungen von HINKEL (2013) für die Proben R-40x1-TR86 (faltenfrei) bis R-40x1-TR94 (faltenbehaftet).

In Abbildung 6.12 sind die Normalkraftverläufe des Faltenglätters für die Versuche R-40x1-TR86 (faltenfrei) bis R-40x1-TR94 (faltenbehaftet) dargestellt.

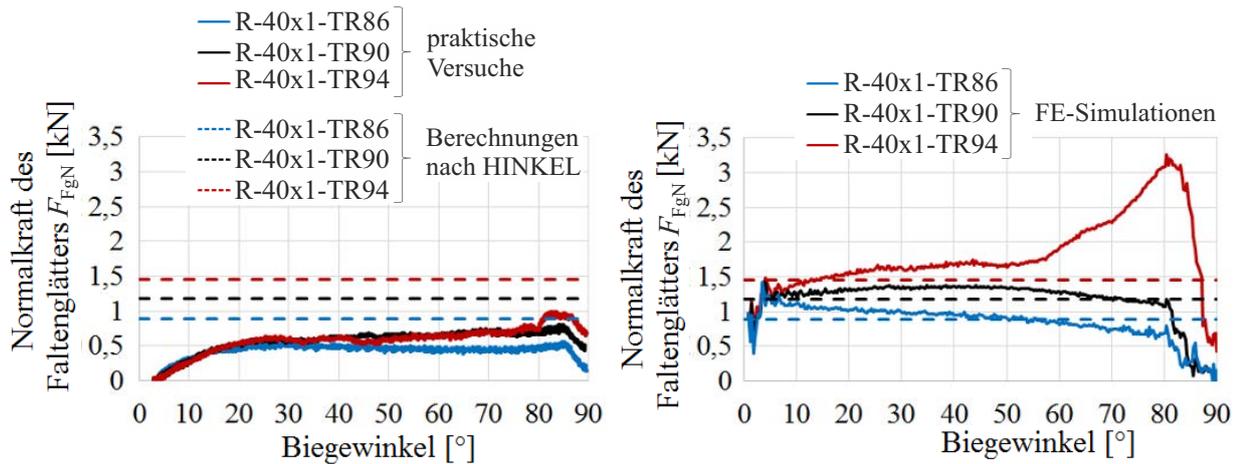


Abbildung 6.12: Vergleich der Verläufe der Faltenglätternormalkräfte aus praktischen Versuchsergebnissen, Berechnungen von FE-Simulationen sowie Berechnungen nach den Gleichungen von HINKEL (2013) für die Proben R-40x1-TR86 (faltenfrei) bis R-40x1-TR94 (faltenbehaftet).

Der Verlauf der Faltenglätternormalkraft weist geringe Reaktionen auf die Faltenbildung auf. Die FE-Simulation R-40x1-TR94 weist aufgrund der primären Falten ab  $58^\circ$  einen Kraftanstieg auf. Die Primärfalten dieses Versuchs sind in der FE-Simulation größer als am realen Rohrbogen. Die Normalkräfte der faltenbehafteten Rohrbögen sind ab einem Biegewinkel von  $15^\circ$  größer als die der faltenfreien Rohrbögen. Dies können die durch den Transport überlagerten Druckspannungen verursachen, die zu einer Aufdickung der Rohrwand führen.

In Abbildung 6.13 sind die Kraftreaktionen der Versuche mit einer Rohrwanddicke von 2 mm dargestellt. Bei den Versuchen R-40x2-GH0 mit einer Gegenhalterzustellung von 0 mm bildeten sich große Falten vom geraden Rohrabschnitt bis in den Bogenbereich. Sowohl die Dorn- als auch die Faltenglätterkraft zeigen deutliche Reaktionen auf die Faltenbildung. Faltsignifikante Steigungen werden ab Biegewinkeln von  $49^\circ$  (Dornkraft) und  $32^\circ$  (Faltenglätterkraft) erreicht. Unter Variation der Transportgeschwindigkeit bildeten sich ausschließlich Primärfalten im geraden Rohrbereich. Die Dornkraftverläufe zeigen ein sinkendes Kraftniveau bei steigender Geschwindigkeit, weisen aber keine Reaktionen auf die Faltenbildung auf. Die Verläufe der Faltenglätternormalkraft zeigen bei den Versuchen R-40x2-TR100 und R-40x2-TR104 Anstiege und Abfälle, die auf die Faltenbildung zurückgeführt werden können. Der Übergangspunkt in den faltenbehafteten Bereich wurde bei einem Biegewinkel von  $57^\circ$  erreicht. Der Laser-Liniensensor erfasste die Falten zu einem ähnlichen Zeitpunkt bei  $60^\circ$ , siehe Abbildung 6.7.

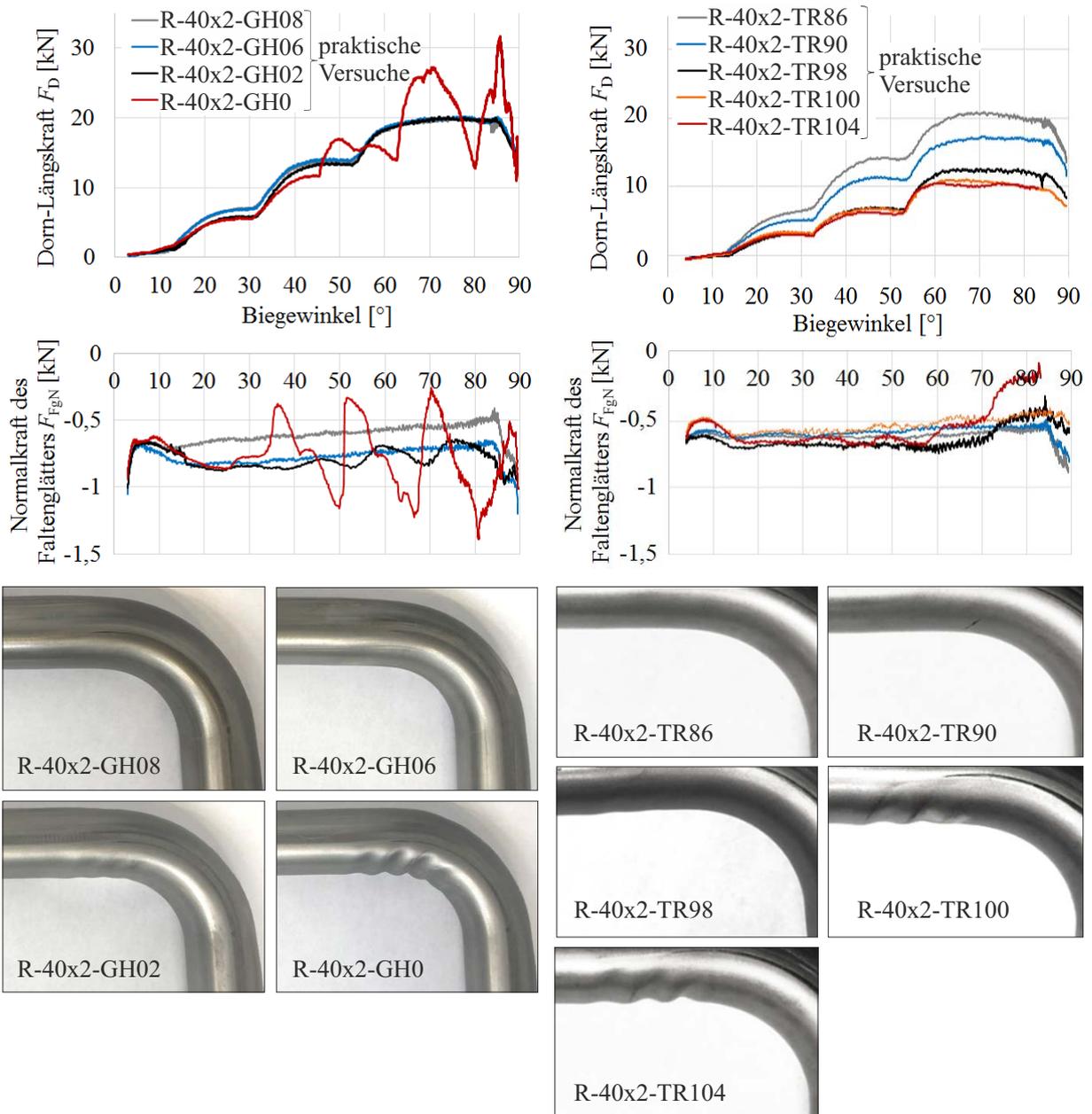


Abbildung 6.13: Vergleich der Verläufe der Dorn- und Faltenglätterkräfte aus praktischen Versuchsergebnissen für die Proben R-40x2-GH08 (faltenfrei) bis R-40x2-GH0 (faltenbehaftet) sowie R-40x2-TR86 (faltenfrei) bis R-40x2-TR104 (faltenbehaftet).

Die Kraftverläufe der Versuche mit einer Rohrwanddicke von 0,8 mm sind in Abbildung 6.14 dargestellt. Bei den dünnwandigen Rohren bildeten sich Primärfalten aus, die weitestgehend keine faltensignifikanten Kraftreaktionen auslösten. Sie wurden von der Rohrkonturmessung detektiert (siehe Abbildung 6.7). Bei den Versuchen R-40x08-TR94 entstanden die größten Falten, die einen Anstieg der Faltenglätternormalkraft verursachten. Falten-signifikante Steigungen wurden ab einem Biege Winkel von 72° erreicht. Ab-

bildung 6.7 zeigt, dass der Laser-Liniensensor bei den Versuchen R-40x08-GH0 Falten ab einem Biegewinkel von  $40^\circ$  erfasste. Bei den Versuchen R-40x08-TR94 wurden erste Anzeichen von Falten ab einem Biegewinkel von  $65^\circ$  sichtbar.

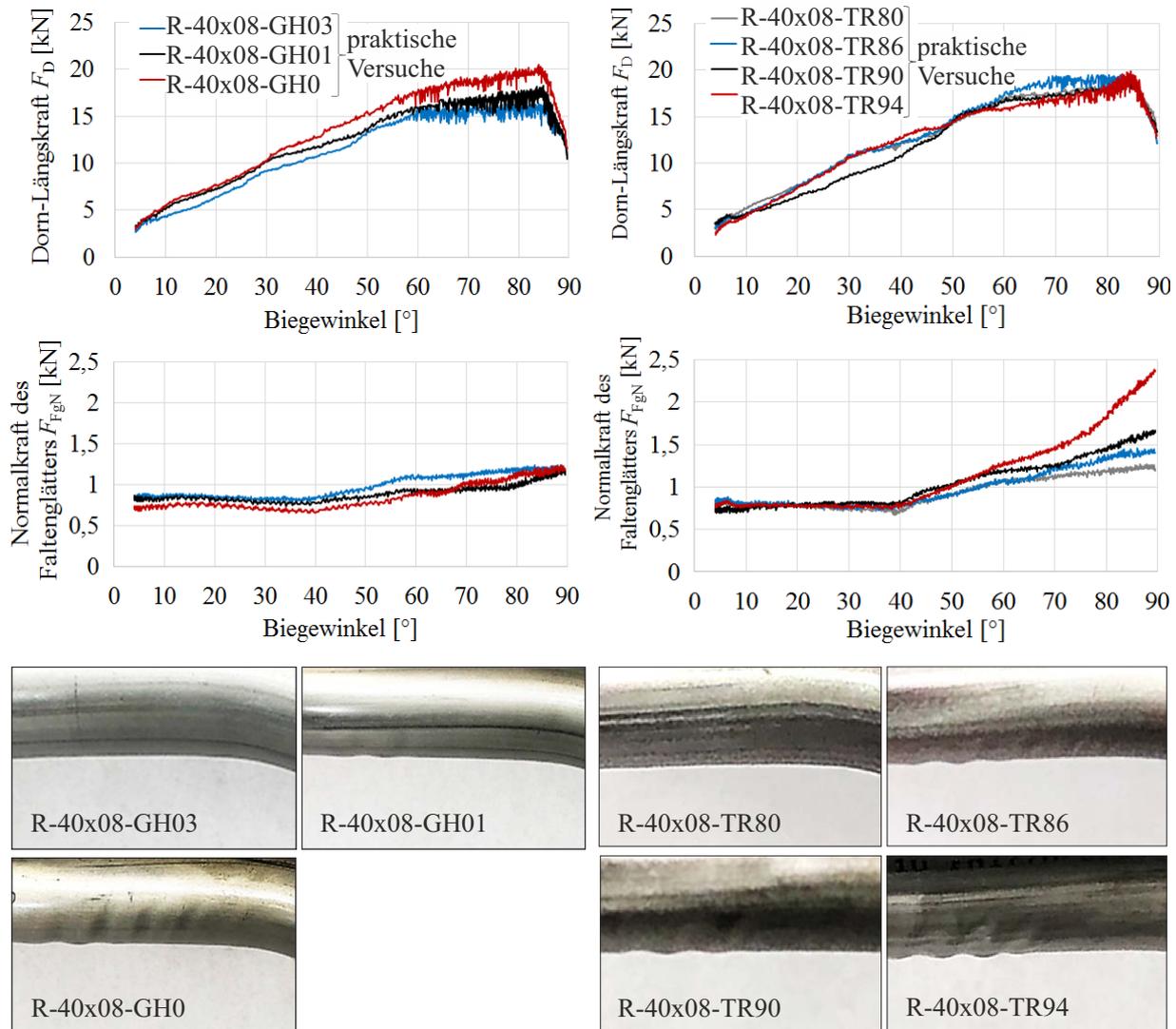


Abbildung 6.14: Vergleich der Verläufe der Dorn- und Faltenglätterkräfte aus praktischen Versuchsergebnissen für die Proben R-40x08-GH03 (faltenfrei) bis R-40x08-GH0 (faltenbehaftet) sowie R-40x08-TR80 (faltenfrei) bis R-40x08-TR94 (faltenbehaftet).

# 7 Regelungsmethode zur Faltenkorrektur

Im Folgenden wird die Entwicklung des Reglers beschrieben. Zugehörigkeitsfunktionen für die Fuzzy-Mengen wurden für die Ein- und Ausgangsgrößen des Reglers formuliert. Produktionsregeln als Regelbasis wurden anhand von Kennfeldern geprüft. Der Fuzzy-Regler wurde unter Verwendung numerischer Integration programmiert, um die Rechenzeit zu verringern. Die Methode zur Entwicklung des Reglers wurde abschließend zusammengefasst und ein Ablaufplan zur Anwendung erstellt.

## 7.1 Vorgehen für den Reglerentwurf

Zur Entwicklung des Reglerentwurfs gilt es, die Basis für das Prozessmodell mittels unscharfer Mengen und Produktionsregeln zu erstellen. Die Fuzzy-Logik verarbeitet Regelungsprobleme mittels unscharfer Mengen. Voraussetzungen sind Produktionsregeln, die die Zuordnung von Stellgrößen zu Messgrößen linguistisch beschreiben. Als Eingangsgrößen dienen die gemessenen Ist-Werte der Faltenausprägung. Deren Differenz zur Soll-Geometrie ermöglicht die Quantifizierung durch linguistische Begriffe, wie z. B. keine, kleine und große Faltenausprägung. Die Zugehörigkeitsgrade zu den unscharfen Mengen beschreiben bspw. den Anteil kleiner Faltenausprägung und den Anteil großer Faltenausprägung. Basis der Inferenz ist die Regelbasis aus Produktionsregeln. Die Regelbasis wurde anhand von experimentellen Untersuchungen entwickelt, siehe Abschnitt 6.2. Die Ergebnisse der Inferenz sind unscharfe Stellgrößen, die durch die Defuzzifizierung in Stellgrößen für die Aktoren gewandelt werden. Die Aktoren beeinflussen Werkzeugkräfte oder Achsenwege im Prozess. Die Produktionsregeln beschreiben den Kausalzusammenhang zwischen den Ausprägungen von Eingangs- und Ausgangsgrößen unter Berücksichtigung derer Grenzen. Hierzu wurden die Ergebnisse aus Abschnitt 6.2 hinsichtlich der Entwicklung der unscharfen Mengen der Eingangsgrößen ausgewertet. Produktionsregeln und unscharfe Ausgangsgrößen sowie die Defuzzifizierungsmethode wurden anhand der Gegenhalterzustellung und der Transportgeschwindigkeit entwickelt. Die Kombinationen der Ein- und Ausgangsgrößen wurden in Form von Kennfeldern geprüft. Damit konnte instabiles Reglerverhalten unabhängig von der Maschine ausgeschlossen werden. Als Ergebnis wurde ein stabiler Regler gefunden.

Vorgreifend auf Kapitel 9 lässt sich festhalten, dass die Absolutwerte für die Grenzen der Fuzzy-Sets des Reglers durch die Auswertung der praktischen Biegeversuche berechnet

wurden. Dadurch wurden Erfahrungen mit dem Biegeprozess in die Regelung aufgenommen, was einen Vorteil der Fuzzy-Regelung darstellt. Die Fuzzy-Sets sind für ein Spektrum an Biegeaufgaben geeignet und bleiben unverändert in dem Regler hinterlegt. Dadurch erhalten gleiche Kombinationen an Eingangsgrößen die gleichen Ausgangsgrößen. Die Biegeaufgaben haben unterschiedliche Eingangsgrößen verursacht. Der Regler reagierte entsprechend der Eingangsgrößen individuell auf die Biegeaufgaben. Bei Überschreiten der Instabilitätsgrenze von  $x_1 = 0,17$  mm Faltenhöhe leitete der Regler Gegenmaßnahmen ein. Die Gegenmaßnahmen konnten zunächst sehr gering oder direkt groß sein. Der nicht-lineare, statische Regler konnte auf die nichtlinearen Änderungen des Werkstoffflusses reagieren und die Biegebauteile in den Gutteilbereich führen.

Der Laser-Liniensensor hat den Vorteil, dass er eine direkte Messung der Rohrkontur im Bereich der Primärfalten ermöglicht. Primärfalten entstehen besonders bei dünnwandigen Biegeaufgaben. Sekundärfalten wurden indirekt durch die Kraftmessung am Dorn erfasst. Falten in der Übergangsebene können vor allem bei dickwandigen Biegeaufgaben entstehen und wurden indirekt durch die Messung der Faltenglätternormalkraft detektiert. Durch die statischen Fuzzy-Sets ist der Regler für ein breites, aber begrenztes Spektrum an Biegeaufgaben geeignet. Unterschiede in Geometrien und Werkstoffen können andere Grenzen der Fuzzy-Sets erfordern. Von besonderer Bedeutung ist die Instabilitätsgrenze, siehe die Abbildungen 7.1, 7.4 und 7.7. Bei großen Wanddickenfaktoren von  $W > 50$  (dünnwandigen Rohren) kann ein Herabsetzen der Grenze erforderlich sein. Gleichungen zur näherungsweise Berechnung der Instabilitätsgrenze können aus Anhang A.3 abgeleitet werden. Die Grenzen wurden dazu nicht nur in Kombination, sondern für jede Biegeaufgabe separat ermittelt.

## 7.2 Formulierung der Eingangs-Fuzzy-Sets

Die Eingangs-Fuzzy-Mengen wurden durch Auswertung der Biegeversuche aus Tabelle 6.1 bestimmt. Zu den Eingangsgrößen gehört die Faltenhöhe, gemessen im geraden Rohrabchnitt vor der Übergangsebene, die Änderung der Dornlängkraft und die Änderung der Faltenglätternormalkraft.

### 7.2.1 Faltenhöhe

Die Kontur eines Rohrbogens, siehe Abbildung 6.5, kann sich während des Biegens verlagern, ausbeulen und mit fortschreitendem Biegewinkel größer werdende Falten bilden. Mit steigender Verlagerung steigt das Faltenrisiko, da die Rohrwand Freiraum zum Ausbeulen bekommt. Der Prozess gelangt bei Überschreiten einer kritischen Verlagerungs- oder Faltenhöhe ( $f_h = 0,17$  mm) in den instabilen Bereich. Diese Grenzhöhe und weitere Grenzen der Eingangsgröße "Faltenhöhe" wurden durch die Auswertung der Faltenhistorien der Biegeaufgaben bestimmt, siehe Anhang A.3. Während des iterativen Einstellprozesses des Reglers an der Biegemaschine wurden drei Grenzen (von insgesamt 45 Grenzen) angepasst. Im Folgenden werden die Fuzzy-Mengen der Eingangsgröße "Faltenbildung" beschrieben.

In Tabelle 6.1 sind die nach Gleichung 2.4 ermittelten Faltenbewertungsfaktoren der Versuchseinstellungen aufgeführt. Die Versuche wurden den drei Kategorien „große Falten“, „kleine Falten“ und „keine Falten“ in Anlehnung an die Faltenbewertungsfaktoren subjektiv zugeordnet. Rohrbögen mit einem Bewertungsfaktor von  $\Omega = 0$  gehören der Kategorie „keine Falten“ an. „Kleine Falten“ sind einem Bewertungsfaktor von  $0 < \Omega < 0,002$  zugeordnet. Mit dem Ziel der Faltenverhinderung wurde der Wert 0,002 vergleichsweise niedrig gewählt. Es wurden Rohrbögen mit Faltenbewertungsfaktoren von bis zu  $\Omega = 0,0079$  gebogen. Ab einer Bewertung von  $\Omega \geq 0,002$  gehören die Rohrbögen der Kategorie „große Falten“ an.

Die Fuzzy-Mengen der linguistischen Variable Faltenhöhe  $f_h = x_1$  sind in Abbildung 7.1 über die allgemeine Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_{Fa}(x_1)$  definiert.

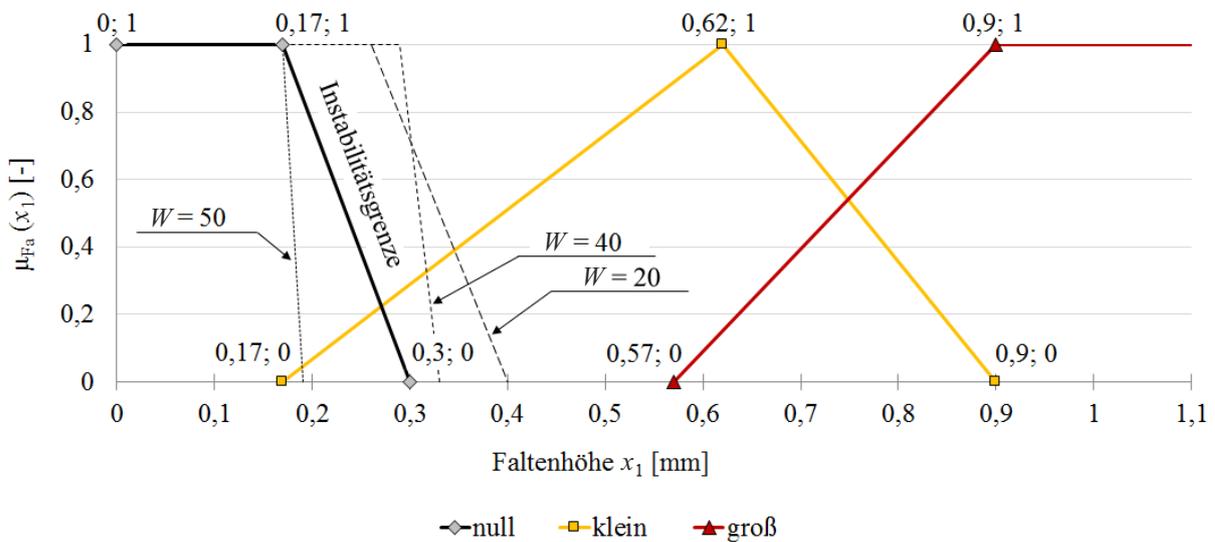


Abbildung 7.1: Zugehörigkeitsfunktionen für die Fuzzy-Mengen der Eingangs-Variable Faltenhöhe  $x_1 = f_h$  und drei separat ausgewerteten Instabilitätsgrenzen, die sich mit zunehmender Wanddicke zu größeren Falten- bzw. Verlagerungshöhen verschieben.

Die Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_{Fa,n}(x_1)$  gilt für die Fuzzy-Menge „null“, die Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_{Fa,k}(x_1)$  beschreibt die Fuzzy-Menge „klein“ und die Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_{Fa,g}(x_1)$  ist der Fuzzy-Menge „groß“ zugeordnet. Die Grenzwerte wurden durch Auswertung der Faltenhöhen aus Anhang A.3 festgelegt. Betrachtet wurden Biegewinkel zwischen  $35^\circ$  und  $80^\circ$ . Dadurch konnten Verlagerungen, die sich hauptsächlich bis zu einem Biegewinkel von  $30^\circ$  aufbauten, weitestgehend herausgefiltert werden, siehe Anhang A.3. Plötzliche Verlagerungen aufgrund des Dornrückzugs am Ende der Biegung wurden nicht berücksichtigt, sowie Ausreißer bei den gemessenen Faltenhöhen, die beispielsweise aufgrund von Reflexionen über 40 % von den anderen Messwerten abwichen.

### Kategorie „keine Falten“

Für den linken Grenzwert der Kategorie „keine Falten“ wurden faltenfreie Rohrbögen betrachtet. Die Faltenhöhe stellt hier eine Rest-Verlagerungshöhe ohne wellenförmige Kontur dar. Der Grenzwert  $x_1 = 0,17$  mm entspricht dem Instabilitätspunkt der Rohrwand. Der Mittelwert der Faltenhöhen der faltenfreien Rohrbögen beträgt  $x_1 = 0,24$  mm. In Biegeversuchen zur iterativen Anpassung der Fuzzy-Sets wurde dieser Wert auf die minimale, gemessene Faltenhöhe  $x_1 = 0,17$  mm herabgesetzt. Eine Reaktion des Reglers erfolgt dadurch früher, sodass die Sensibilität des Reglers gegenüber der Faltenbildung erhöht wurde. Auf der rechten Seite wurde die Menge mit  $x_1 = 0,4$  mm als Maximalwert der Faltenhöhe aller Rohrbögen mit  $\Omega = 0$  begrenzt. Dieser Wert wurde in Biegeversuchen zur iterativen Anpassung der Fuzzy-Sets auf den nächstkleineren Wert von  $x_1 = 0,3$  mm herabgesetzt.

Wird die Instabilitätsgrenze und damit der Faltenstart für jede der drei Biegeaufgaben ( $W = 50$ ,  $W = 40$ ,  $W = 20$ ) separat bestimmt, entstehen die in Abbildung 7.1 dargestellten Verläufe. Bei der dünnwandigen Biegeaufgabe ( $W = 50$ ) wird die Instabilitätsgrenze bei einer kleineren Verlagerung erreicht und die Rohrwand beult aus. Bei den dickwandigeren Biegeaufgaben ( $W = 40$ ,  $W = 20$ ) bleibt die Rohrwand länger stabil und hält größeren Verlagerungen stand. Die Biegeaufgaben  $W = 40$  und  $W = 50$  haben Wanddicken von 1,0 mm und 0,8 mm. Dieser kleine Wanddickenunterschied scheint große Auswirkungen auf die Stabilität der Rohrwand zu haben. Die Untersuchung der Gleichung nach SCHAPITZ (1963) in Abbildung 4.21 bestätigt den großen Einfluss der Wanddicke auf das Ausbeulverhalten.

Kleine Falten traten bei den Biegeaufgaben  $W = 40$  und  $W = 50$  auf. Große Falten dominierten bei  $W = 20$ . Eine Auswertung aller Biegeversuche in Kombination führte zu den in Abbildung 7.1 dargestellten Zugehörigkeitsfunktionen.

### Kategorie „kleine Falten“

Der ermittelte Grenzwert von  $x_1 = 0,36$  mm als kleinste Faltenhöhe aller Versuche der Kategorie „kleine Falten“ wurde entsprechend des linken Grenzwertes auf  $x_1 = 0,17$  mm herabgesetzt, um die Überschneidung von „klein“ mit „null“ zu vergrößern und damit einen sanfteren Übergang bei der Erkennung von faltenfreien und faltenbehafteten Rohren zu erzeugen. Der Wert  $x_1 = 0,62$  mm stellt den Mittelwert der Faltenhöhen dar, die während der Biegeversuche der Kategorie „kleine Falten“, gemessen wurden.

### Kategorie „große Falten“

Der Grenzwert für große Falten wurde aus dem Mittelwert der maximalen Faltenhöhen aller Versuche der Kategorie „große Falten“ berechnet. Der Mittelwert liegt bei  $x_1 = 0,96$  mm und wurde auf  $x_1 = 0,9$  mm abgerundet, da der Wert bei Verwendung der absoluten Maximalwerte überschätzt wird. Die gemessene, maximale Faltenhöhe kleiner Falten liegt bei  $x_1 = 0,85$  mm und wurde auf  $x_1 = 0,9$  mm angehoben. Auf der linken Seite ist eine Beschränkung der Fuzzy-Menge „groß“ bei  $x_1 = 0,57$  mm erfolgt. Hierbei handelt es sich um die kleinste gemessene Faltenhöhe der Rohrbögen mit Faltenbewertungsfaktoren von  $\Omega \geq 0,002$ .

## 7.2.2 Änderung der Dorn-Längskraft

Der Verlauf der Dorn-Längskraft birgt, wie in Abschnitt 6.2 beschrieben, das Potenzial, auf Falten im Bogenbereich mit signifikanten Kraftanstiegen und –abfällen zu reagieren. Die Absoluthöhe der Dornlängskraft war dabei nicht entscheidend. Sie ist von den Geometrien des Rohres und des Dorns, sowie den Prozesseinstellungen abhängig. Die Kraftänderung zeigt dagegen die Steigung des Kraftanstiegs und –abfalls an, sodass Aussagen über das Auftreten von Falten getroffen werden können. Typischerweise weist der Kraftverlauf eines faltenfreien Rohres Kraftanstiege und Bereiche mit annähernd konstanter Kraft auf, wie in Abbildung 7.2 dargestellt. Während des Biegevorgangs gerät das Rohr nach und nach in Kontakt mit den drei Dorngliedern. Für jedes Dornglied ergeben sich ein Kraftanstieg und ein Plateau. Beim Zurückziehen des Dornes  $5^\circ$  vor dem Ende der Biegung nimmt die Dorn-Längskraft ab. Die Kraftänderungsverläufe unterliegen einem Rauschen, das die Auswertung hinsichtlich der Steigungsbestimmung zweier Messwerte verfälscht. Aus diesem Grund wurde eine Datenreduktion durchgeführt, indem nur jeder zehnte Datenpunkt ausgewertet wurde.

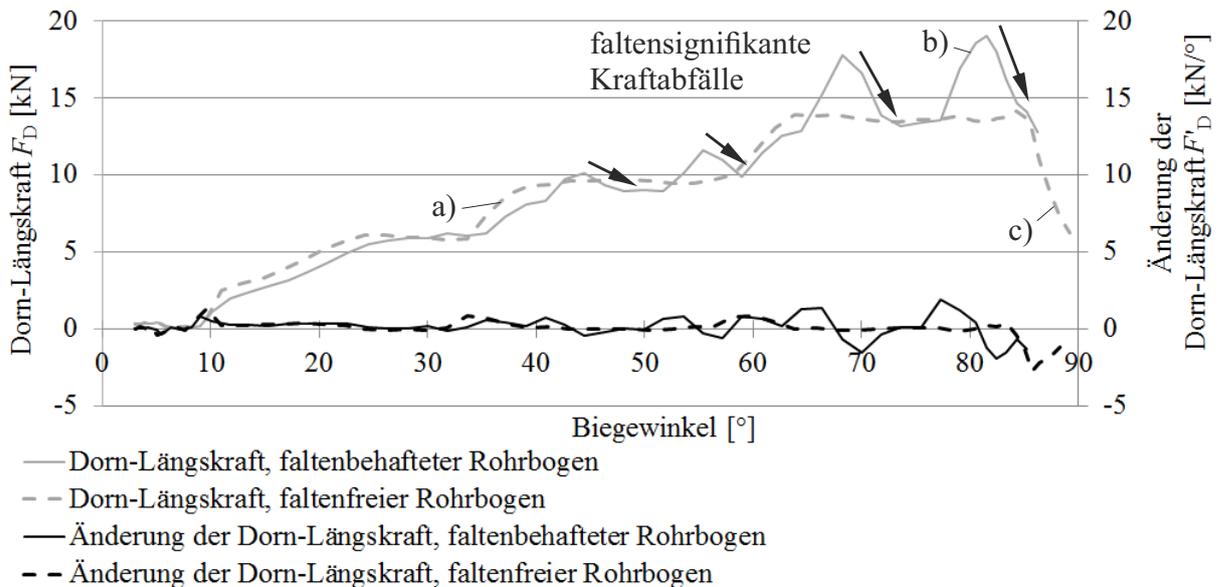


Abbildung 7.2: Vergleich des Verlaufs der Dorn-Längskraft und der Kraftänderung eines faltenbehafteten und eines faltenfreien Rohrbogens. Drei gekennzeichnete Stadien des Kraftverlaufs (a, b und c) sind in Abbildung 7.3 erläutert.

Die Kraftverläufe faltenbehafteter Rohrbögen lassen sich durch Falten erklären, die im Bogenbereich zwischen die Dornglieder gedrückt werden, siehe Abbildung 7.3. Sie ziehen durch den kontinuierlich fortschreitenden Biegevorgang die Dornglieder auseinander, sodass die Dornlängskraft ansteigt. Bei einer kritischen Längskraft werden die Falten herausgezogen. Es kommt zu einer schlagartigen Entlastung der Dornglieder und damit zu einem Kraftabfall.

Dieser Kraftabfall ist für die Erkennung von Falten geeignet. Der vorherige Kraftanstieg ist nicht immer von den Anstiegen in den Kraftverläufen faltenfreier Rohrbögen zu unterscheiden und wurde nicht als Kriterium zur Faltdetektion herangezogen.

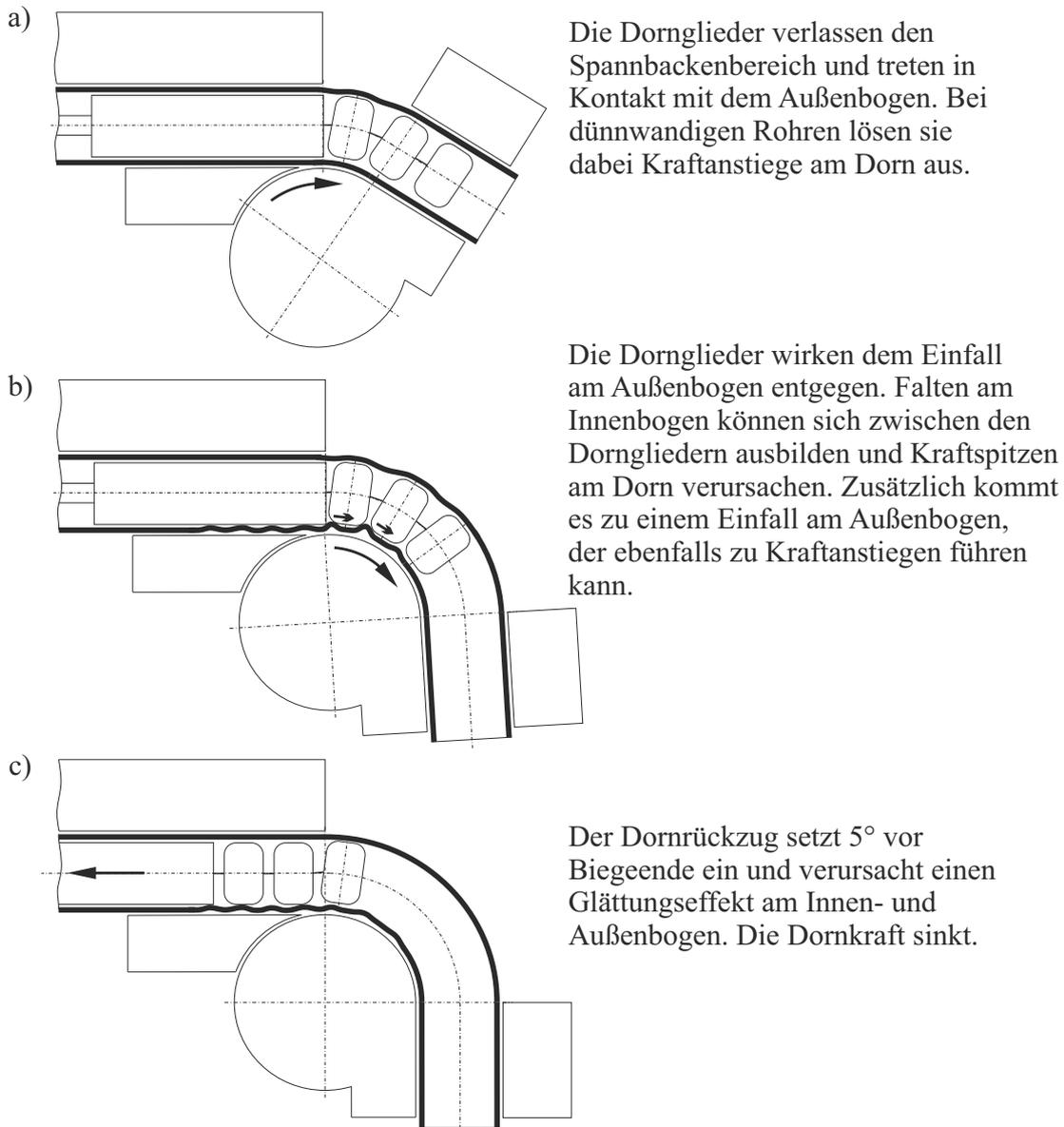


Abbildung 7.3: Stadien des Verlaufs der Dorn-Längskraft beim Rotationszugbiegen. Gekennzeichnet sind die Stadien in dem Kraftverlauf in Abbildung 7.2.

Um die Kraftänderung  $F'_D$  zu berechnen, wird die Differenz zweier aufeinanderfolgender Messwerte der Dornlängskraft ( $F_{D,i}$  und  $F_{D,i-1}$ ) auf die Differenz der zugehörigen Biegewinkel ( $\alpha_i$  und  $\alpha_{i-1}$ ) bezogen.

$$F'_D = \frac{F_{D,i} - F_{D,i-1}}{\alpha_i - \alpha_{i-1}} \quad (7.1)$$

Im Bereich der Kraftplateaus ist die Kraftänderung sehr gering. Stellt sich ein Kontakt zwischen Dornglied und Rohr ein oder setzen sich Falten zwischen die Dornglieder, nimmt die Kraftänderung positive Werte an. Werden die Falten zwischen den Dorngliedern herausgezogen, nimmt die Kraftänderung die zur Faltdetektion herangezogenen negativen Werte an. Messwerte, die ab einem Biegewinkel von  $85^\circ$  aufgezeichnet wurden, wurden aufgrund des Dornrückzugs in der Auswertung nicht berücksichtigt.

Die Biegeversuche wurden, wie in Unterabschnitt 7.2.1 beschrieben, anhand der Faltenbewertungsfaktoren in die Kategorien „keine Falten“, „kleine Falten“ und „große Falten“ eingeteilt. In Abbildung 7.4 sind die Zugehörigkeitsfunktionen der drei Kategorien über der Eingangsgröße Änderung der Dornlängskraft  $F'_D = x_2$  dargestellt. Die allgemeine Form der Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_D(x_2)$  beinhaltet die einzelnen Zugehörigkeitsfunktionen  $\mu_{D,ng}(x_2)$  für die Fuzzy-Menge „negativ groß“,  $\mu_{D,nk}(x_2)$  für die Fuzzy-Menge „negativ klein“ und  $\mu_{D,n}(x_2)$  für die Fuzzy-Menge „normal“.

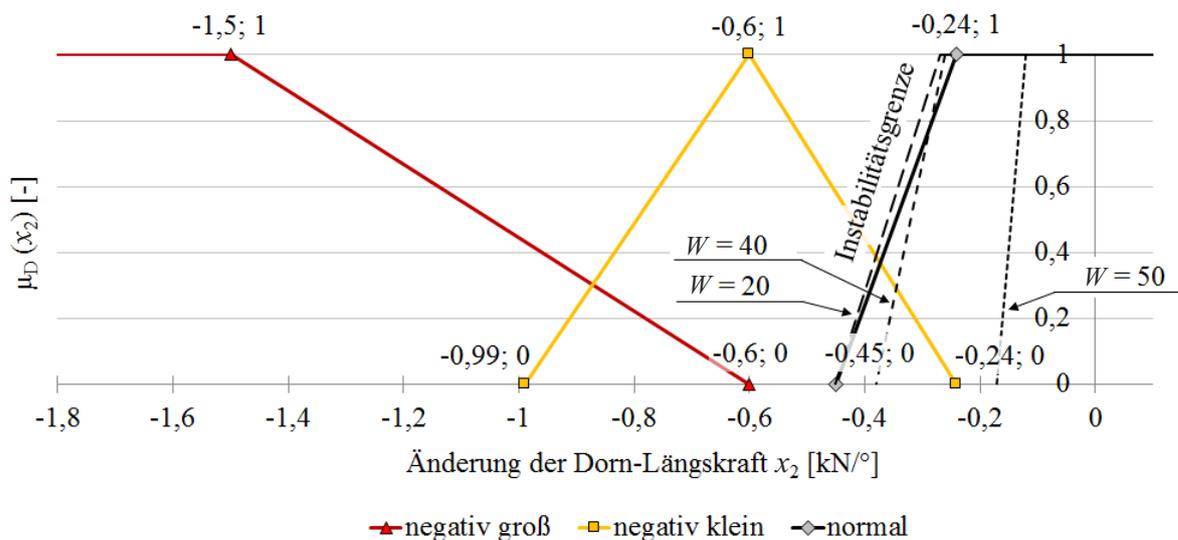


Abbildung 7.4: Zugehörigkeitsfunktionen für die Fuzzy-Mengen der Eingangs-Variable Änderung der Dorn-Längskraft mit  $x_2 = F'_D$ .

### Kategorie „keine Falten“

Die Fuzzy-Menge „normal“ wird zur Erkennung faltenfreier Rohrbögen benötigt. Der Mittelwert der Kraftänderungen  $x_2 = -0,24 \text{ kN/}^\circ$  definiert die maximale Zugehörigkeit der Kategorie „keine Falten“. Das betragsmäßig größte Minimum der Kraftänderungen dieser Kategorie  $x_2 = -0,45 \text{ kN/}^\circ$  begrenzt den faltenfreien Kraftabfall nach links. Zur rechten Seite ist die Menge offen. Steigungen im positiven Bereich sind, wie oben beschrieben, nicht zur Faltdetektion geeignet.

Die Instabilitätsgrenze und damit der Faltenstart wurde zusätzlich für jede der drei Biegeaufgaben ( $W = 50$ ,  $W = 40$ ,  $W = 20$ ) separat bestimmt. Bei den Rohrbögen der dünnwandigen Biegeaufgabe ( $W = 50$ ) wurden geringe Kraftänderungen gemessen. Die Grenze faltenfreier Rohrbögen lag im Mittel bei  $x_2 = -0,12 \text{ kN/}^\circ$ . Die Kraftänderungen konnten den Falten nicht eindeutig zugeordnet werden, siehe Unterabschnitt 6.2.4. Die Messung der Faltenhöhe  $x_1$  ergab bei dieser Biegeaufgabe Ergebnisse mit eindeutigem Faltenbezug. Bei den dickwandigeren Biegeaufgaben ( $W = 40$ ,  $W = 20$ ) haben sich Kraftanstiege und -abfälle gebildet, die auf die Faltenbildung zurückgeführt werden konnten. Die Steigungen der Kraftabfälle betragen bei den faltenfreien Rohrbögen im Mittel  $x_2 = -0,26 \text{ kN/}^\circ$  ( $W = 40$ ) und  $x_2 = -0,27 \text{ kN/}^\circ$  ( $W = 20$ ). Sie scheinen durch die weniger nachgiebige Rohrwand auch im faltenfreien Zustand größere Kraftänderungen am Dorn auszulösen, beispielsweise durch den Einfall am Außenbogen. Der Faltenstart verlagert sich dadurch zu größeren Kraftänderungen.

### Kategorie „kleine Falten“

Die Fuzzy-Menge „negativ klein“ bildet eine Dreiecksfunktion, die zur Erkennung von kleinen Falten dient. Ihre Grenzwerte bestehen aus dem minimalen ( $x_2 = -0,99 \text{ kN/}^\circ$ ) und dem maximalen Wert ( $x_2 = -0,24 \text{ kN/}^\circ$ ) der Kraftänderungen der Kategorie „kleine Falten“. Die maximale Zugehörigkeit liegt bei einem Steigungswert von  $x_2 = -0,6 \text{ kN/}^\circ$ , dem Mittelwert aller ausgewerteten Kraftänderungen dieser Kategorie.

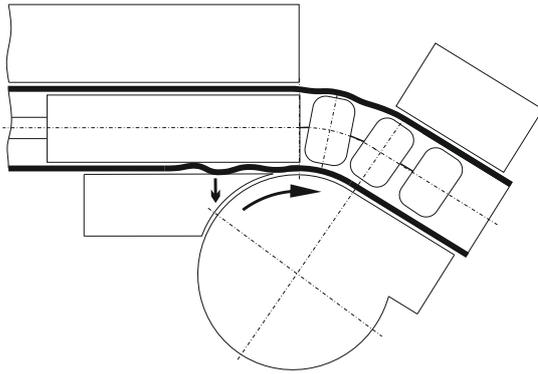
### Kategorie „große Falten“

Bei der Fuzzy-Menge „negativ groß“ handelt es sich um Kraftverläufe mit steilen Abfällen, verursacht durch große Falten. Die maximale Zugehörigkeit der Kategorie „große Falten“ liegt bei  $x_2 = -1,5 \text{ kN/}^\circ$ , dem betragsmäßig größten Wert der Kraftänderung und damit dem größten Kraftabfall. Zur rechten Seite ist die Fuzzy-Menge durch den Wert  $x_2 = -0,6 \text{ kN/}^\circ$ , dem betragsmäßig kleinsten Wert der Kraftabfälle aus der Kategorie „große Falten“, begrenzt.

## 7.2.3 Änderung der Faltenglätternormalkraft

Die Auswertung der Faltenglätternormalkraft zur Erkennung von Falten erfolgt ähnlich zu der Auswertung der Dorn-Längskraft in Unterabschnitt 7.2.2. Die Höhe der Faltenglätternormalkraft wird maßgeblich durch die Positionierung des Faltenglätters und des Gegenhalters bestimmt. Aus den Verläufen der Kraftänderung dagegen können Rückschlüsse auf die Faltenbildung gezogen werden, siehe die Abbildungen 7.5 und 7.6. Die Kraftänderungsverläufe unterliegen einem Rauschen, das ähnlich wie bei der Dornlängskraft durch eine Datenreduktion auf jeden zehnten Messwert reduziert wird.

Ein typischer Kraftverlauf einer faltenfreien Biegung steigt zu Beginn an und bleibt auf einem konstanten Niveau, siehe Abbildung 7.6. Ein leichter prozessbedingter Kraftanstieg ist möglich. Im Kraftverlauf der Rohrbiegung mit Falten sind deutliche Anstiege und Abfälle zu erkennen. Ein großer Kraftanstieg ist als Indikator für die Erkennung von Falten geeignet.



Falten können besonders bei dickwandigen Rohren Kraftanstiege und -abfälle in der Faltenglätternormalkraft verursachen.

Abbildung 7.5: Mögliche Ausprägung der Faltenbildung unter der Annahme, dass Anstiege und Abfälle in der Faltenglätternormalkraft durch Falten ausgelöst werden.

In Biegeversuchen zur Erprobung und iterativen Anpassung der Regelung wurde die Wechselwirkung zwischen Gegenhalterzustellung und Faltenglätternormalkraft deutlich. Nähere Erläuterungen zu dem Einsatz der Eingangsgrößen folgen in Kapitel 8. Die Eingangsgröße Änderung der Faltenglätternormalkraft  $F'_{\text{FGN}} = x_3$  bedarf folgender Einschränkungen.

- Nur wenn der Gegenhalter steht, darf die Eingangsgröße  $x_3$  aktiviert werden, da das Zustellen des Gegenhalters Kraftänderungen am Faltenglätter auslöst.
- Zur Faltdetektion werden nur Anstiege der Faltenglätternormalkraft verwendet, da der Gegenhalter, wenn er zum Stehen kommt, einen verzögerten, steilen Abfall in der Faltenglätterkraft auslöst.

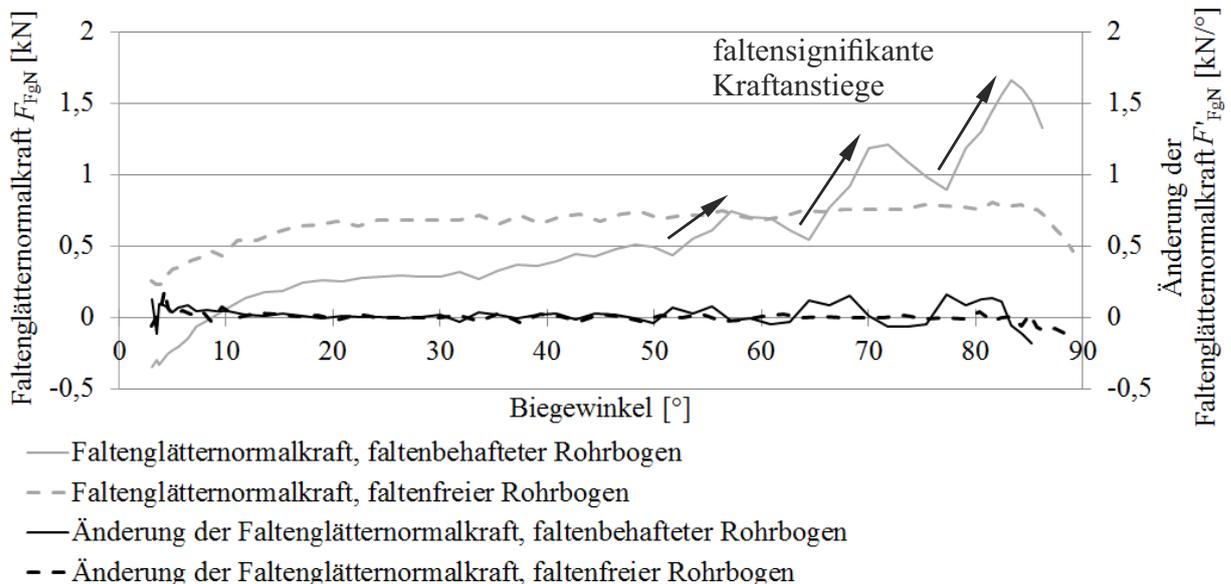


Abbildung 7.6: Vergleich des Verlaufs der Faltenglätternormalkraft und der Kraftänderung eines faltenbehafteten und eines faltenfreien Rohrbogens.

Ausreißer der Messungen wurden ebenso aus der Auswertung ausgeschlossen wie Versuche, bei denen keine Falten durch den Verlauf der Faltenglätternormalkraft detektiert wurden, obwohl Falten am Rohr erkennbar waren. Die Änderung der Faltenglätternormalkraft  $F'_{\text{FgN}} = x_3$  kann analog zu Gleichung 7.1 wie folgt berechnet werden:

$$F'_{\text{FgN}} = \frac{F_{\text{FgN},i} - F_{\text{FgN},i-1}}{\alpha_i - \alpha_{i-1}} \quad (7.2)$$

Abbildung 7.7 zeigt die Zugehörigkeitsfunktionen der Kategorien „keine Falten“, „kleine Falten“ und „große Falten“ über der Eingangsgröße  $x_3$ . Die allgemeine Form der Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_{\text{FN}}(x_3)$  beinhaltet die Zugehörigkeitsfunktionen  $\mu_{\text{FN},n}(x_3)$  für die Fuzzy-Menge „normal“,  $\mu_{\text{FN},pk}(x_3)$  für die Fuzzy-Menge „positiv klein“ und  $\mu_{\text{FN},pg}(x_3)$  für die Fuzzy-Menge „positiv groß“.

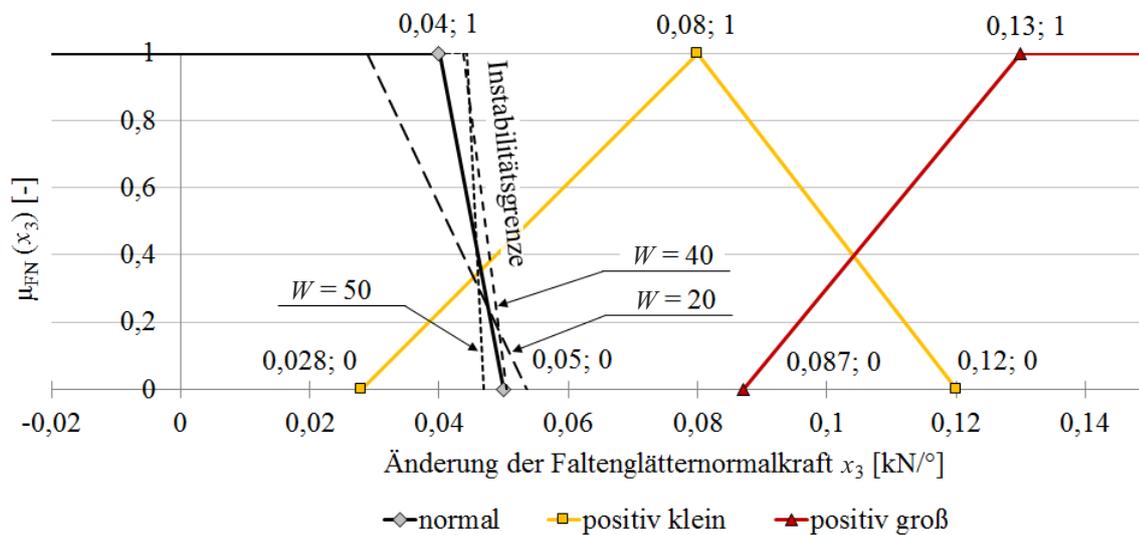


Abbildung 7.7: Zugehörigkeitsfunktionen für die Fuzzy-Mengen der Eingangs-Variable Änderung der Faltenglätternormalkraft mit  $x_3 = F'_{\text{FgN}}$ .

### Kategorie „keine Falten“

Die maximale Zugehörigkeit der Kategorie „keine Falten“ reicht bis zu einem Grenzwert von  $x_3 = 0,04 \text{ kN/}^\circ$ . Ein Überschreiten dieses Wertes signalisiert Falten. Er stellt den Mittelwert der größten Steigungswerte der faltenfreien Rohrbögen dar, während  $x_3 = 0,05 \text{ kN/}^\circ$  dem gerundeten Maximalwert entspricht.

Die Instabilitätsgrenzen der einzelnen Biegeaufgaben ( $W = 50$ ,  $W = 40$ ,  $W = 20$ ) liegen nah beieinander. Sie entsprechen den Kraftänderungen, die die faltenfreien Rohrbögen der Biegeaufgaben am Faltenglätter auslösten. Die maximalen Steigungen der faltenfreien Rohrbögen lagen bei  $x_3 = 0,047 \text{ kN/}^\circ$  ( $W = 50$ ),  $x_3 = 0,050 \text{ kN/}^\circ$  ( $W = 40$ ) und  $x_3 = 0,053 \text{ kN/}^\circ$  ( $W = 20$ ). Die faltenbehafteten Rohrbögen mit den Wanddickenfaktoren  $W = 40$  und  $W = 20$  verursachten Kraftanstiege mit Steigungen bis zu  $x_3 = 0,13 \text{ kN/}^\circ$ , siehe Unterabschnitt 6.2.4. Die Änderung der Faltenglätternormalkraft stellt für diese Biegeaufgaben eine geeignete Messgröße zur Detektion der Falten dar. Die Kraftverläufe

der Biegeaufgabe  $W = 50$  wiesen kontinuierliche Anstiege ohne eindeutigen Faltenbezug auf, die stellenweise die Grenze in die Kategorie "kleine Falten" überschritten.

#### **Kategorie „kleine Falten“**

Die Fuzzy-Menge „positiv klein“ umfasst Rohrbögen mit kleinen Falten. Die Dreiecksfunktion wurde anhand des minimalen ( $x_3 = 0,028 \text{ kN/}^\circ$ ) und maximalen Steigungswertes ( $x_3 = 0,12 \text{ kN/}^\circ$ ) sowie des Mittelwerts ( $x_3 = 0,08 \text{ kN/}^\circ$ ) aus allen Versuchen der Kategorie „kleine Falten“ festgelegt.

#### **Kategorie „große Falten“**

Die Fuzzy-Menge „positiv groß“ beschreibt den Bereich des Kraftanstiegs, der mit großen Falten verbunden ist. Unter Vernachlässigung von Ausreißern befindet sich das Maximum des Kraftanstiegs der Kategorie „großen Falten“ im Mittel bei  $x_3 = 0,13 \text{ kN/}^\circ$ , was eine größtmögliche Zugehörigkeit zu dieser Menge bedeutet. Der kleinste Steigungswert bei großen Falten liegt bei  $x_3 = 0,05 \text{ kN/}^\circ$ . Zur Abgrenzung kleiner und großer Falten wurde die Begrenzung zur linken Seite auf den nächstgrößeren Wert  $x_3 = 0,087 \text{ kN/}^\circ$  gelegt.

## **7.3 Formulierung der Ausgangs-Fuzzy-Sets**

Die Ausgangs-Fuzzy-Mengen wurden anhand der Einstelldaten der Biegeversuche aus Tabelle 6.1 bestimmt. Die Parameter Gegenhalterzustellung und Transportgeschwindigkeit wurden variiert, wodurch Rohrbögen mit unterschiedlichen Falten produziert wurden. Die Abhängigkeiten der Parametereinstellungen bezogen auf die resultierende Faltenbildung werden in den Ausgangs-Fuzzy-Sets dargestellt.

### **7.3.1 Gegenhalterzustellung**

In Tabelle 6.1 sind Gegenhalterachsenpositionen und auf eine Nullposition bezogene Gegenhalterzustellungen eingetragen. Die Nullposition der Gegenhalterachse wurde den Versuchen zugeteilt, bei denen der Gegenhalter die geringste Kraft auf das Rohr ausübte und dadurch die größten Falten entstanden. Alle anderen Achsenpositionen einer Biegeaufgabe beziehen sich auf diese Position als Referenz. Größtenteils wurde die Achsenposition in 0,2 mm-Schritten variiert. Unter der Voraussetzung, dass der Gegenhalter in jedem Versuch anliegt, steigt mit größer werdender Achsenposition die Gegenhalternormalkraft auf das Rohr.

Bei den Biegeversuchen faltenfreier Rohrbögen lag eine Gegenhalterzustellung vor, die geeignet war, um Falten zu verhindern. Diese Position galt es durch den Regler für beliebige Biegeaufgaben zu erreichen. Jeder faltenbehafteten Biegung konnte entsprechend Tabelle 6.1 ein Wert  $\Delta s_{\text{Gh}}$  zugeordnet werden, um den die Achse verfahren werden sollte, sodass die Erhöhung der Gegenhalternormalkraft die Falten verhindert. Die Werte  $\Delta s_{\text{Gh}}$  bildeten die Grenzen der Fuzzy-Sets.

Die dosierte Zustellung des Gegenhalters ermöglicht ein Verhindern von Falten unter gleichzeitiger Beachtung des Rissrisikos. Eine unnötig hohe Zustellung hätte hohe Werkzeugkräfte sowie hohen Werkzeugverschleiß und hohe Dehnungen am Rohraußenbogen zur Folge.

Die Fuzzy-Mengen für die linguistische Variable Gegenhalterzustellung  $\Delta s_{\text{Gh}} = y_1$  werden wie in Abbildung 7.8 definiert. Die Zugehörigkeitsfunktionen der einzelnen Fuzzy-Mengen,  $\mu_{\text{Gh,nk}}(y_1)$  für „negativ klein“,  $\mu_{\text{Gh,n}}(y_1)$  für „null“,  $\mu_{\text{Gh,pk}}(y_1)$  für „positiv klein“ und  $\mu_{\text{Gh,pg}}(y_1)$  für „positiv groß“ werden in der Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_{\text{Gh}}(y_1)$  zusammengefasst.

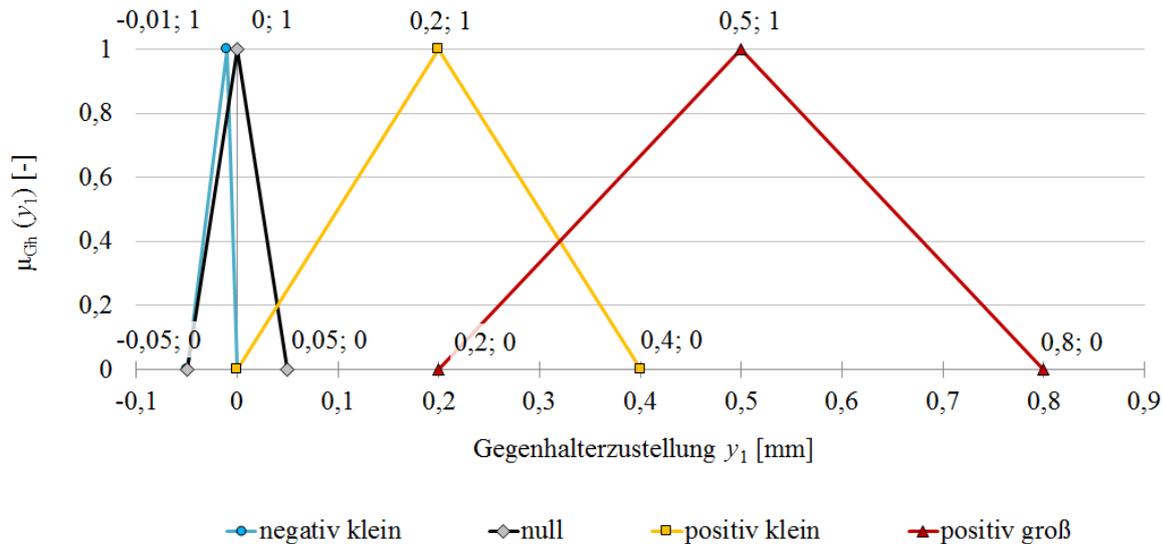


Abbildung 7.8: Zugehörigkeitsfunktionen für die Fuzzy-Mengen der Ausgangs-Variable Gegenhalterzustellung  $y_1 = \Delta s_{\text{Gh}}$ .

Die Fuzzy-Menge „negativ klein“ ermöglicht es, den Gegenhalter mit sehr kleinen Abständen vom Rohr zu entfernen. Dadurch werden die Werkzeuge und das Rohr entlastet. Dies ist nur dann möglich, wenn kein Faltenrisiko besteht und der Prozess stabil läuft.

Im Bereich der Fuzzy-Menge „null“ steht der Gegenhalter. Zugeordnet wurde eine Dreiecksfunktion mit den Grenzen  $y_1 = -0,05$  mm und  $y_1 = 0,05$  mm.

Um kleinen Falten entgegenzuwirken, wird die Fuzzy-Menge „positiv klein“ definiert. Die zugehörigen Zustellungen lösen eine Erhöhung der Gegenhalternormalkraft aus. Da bereits eine Parametervariation von 0,2 mm faltenbehaftete Rohrbögen in faltenfreie überführen konnte, wird die maximale Zugehörigkeit der Fuzzy-Menge auf diesen Wert gelegt. Auf der linken Seite wird sie mit dem Zustellwert  $y_1 = 0$  mm begrenzt, damit genügend Überlappung zur Fuzzy-Menge „null“ vorhanden ist und ein kontinuierlicher Übergang der Mengen ermöglicht wird. Rechts begrenzt ein Zustellwert von  $y_1 = 0,4$  mm die Menge zu größeren Werten, da der Einfluss von Zustellungen des Gegenhalters  $y_1 > 0,2$  mm schnell zu erhöhtem Verschleiß führen kann.

Für den Extremfall der Bildung von großen Falten greift die Gegenhalterzustellung der Fuzzy-Menge „positiv groß“ stark in den Prozess ein. Die maximale Zugehörigkeit liegt

bei  $y_1 = 0,5$  mm. Eine große Zustellung kann große Falten reduzieren oder verhindern. Die Rissgefahr steigt bei einer plötzlichen und großen Zustellung. Die Fuzzy-Menge wird durch die Zustellwerte  $y_1 = 0,2$  mm und  $y_1 = 0,8$  mm begrenzt. Durch die Wahl der Grenzen kann aufgrund der Defuzzifizierung eine maximale Zustellung von  $y_1 = 0,5$  mm erreicht werden.

Sobald der Fuzzy-Regler eine Gegenhalterzustellung  $\Delta s_{Gh}$  ermittelt hat, wird sie an der Biegemaschine umgesetzt. Die Maschine benötigt dazu die neue Soll-Position der Gegenhalterachse (g-Achse, siehe Abbildung 2.5). Die Soll-Position der Gegenhalterachse berechnet sich aus der aktuellen Achsenposition  $s_{Gh,i}$  und der Gegenhalterzustellung  $\Delta s_{Gh}$ .

$$s_{Gh,i+1} = s_{Gh,i} + \Delta s_{Gh} \quad (7.3)$$

Zu Beginn des Biegevorgangs muss der Maschinenbediener manuell eine geeignete Gegenhalterposition einstellen. Die notwendigen Einstellregeln sind in Unterabschnitt 8.1.1 erläutert.

### 7.3.2 Änderung der Transportgeschwindigkeit

Der Transport entspricht der Vorschubeinheit der Biegemaschine. Er ermöglicht das Einbringen von überlagerten Zug- oder Druckspannungen während des Biegens. Der Geschwindigkeitsfaktor bildet nach Gleichung 4.2 den Quotienten aus der Geschwindigkeit des Transportes und der Rohrgeschwindigkeit. Der Geschwindigkeitsfaktor, bei dem keine Kraftüberlagerung stattfindet, liegt unter 1, da die tatsächliche Rohrgeschwindigkeit geringer als die berechnete Rohrgeschwindigkeit ist (Abbildung 4.4). Nach Abschnitt 6.2 kann das Überlagern von Zugspannungen Falten verhindern.

Für die faltenfreien Versuche der Rohre 40x1 und 40x2 lag der Transportfaktor bei  $f_{v,Tr} = 0,86$ . Bei der Rohrgröße 40x0,8 lagen faltenfreie Rohrbögen bei  $f_{v,Tr} = 0,80$  vor. Von diesen Startwerten aus wurde der Transportfaktor in Schritten von  $\Delta f_{v,Tr} = 0,04$  variiert und die Faltenbildung der Versuche dokumentiert. Der Transportfaktor nimmt Einfluss auf den Werkstofffluss des gesamten Rohrquerschnitts. Die Festlegung der Grenzen erfolgte konservativ, um Kraftsprünge zu vermeiden. Eine Reduzierung der Geschwindigkeit um den Faktor 0,04 konnte faltenbehaftete Biegungen in faltenfreie Biegungen überführen.

Folgende Zugehörigkeitsfunktionen wurden für die linguistische Variable Änderung der Transportgeschwindigkeit  $\Delta f_{v,Tr} = y_2$  festgelegt, siehe Abbildung 7.9. Für die Fuzzy-Menge „stark verkleinern“ ist die Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_{Tr,sv}(y_2)$  definiert,  $\mu_{Tr,v}(y_2)$  steht für die Fuzzy-Menge „verkleinern“. Weiterhin beschreibt die Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_{Tr,n}(y_2)$  die Fuzzy-Menge „null“ und  $\mu_{Tr,l}(y_2)$  die Fuzzy-Menge „leicht vergrößern“.

Die maximale Zugehörigkeit der Fuzzy-Menge „stark verkleinern“ wurde auf  $y_2 = -0,06$  gelegt und wirkt großen Falten entgegen. Begrenzt wird sie auf der linken Seite mit  $y_2 = -0,09$  und auf der rechten Seite mit  $y_2 = -0,03$ . Durch Anwendung der Schwerpunktmethod ist gewährleistet, dass eine maximale Erhöhung des Transports von  $y_2 = -0,06$  erreichbar ist.

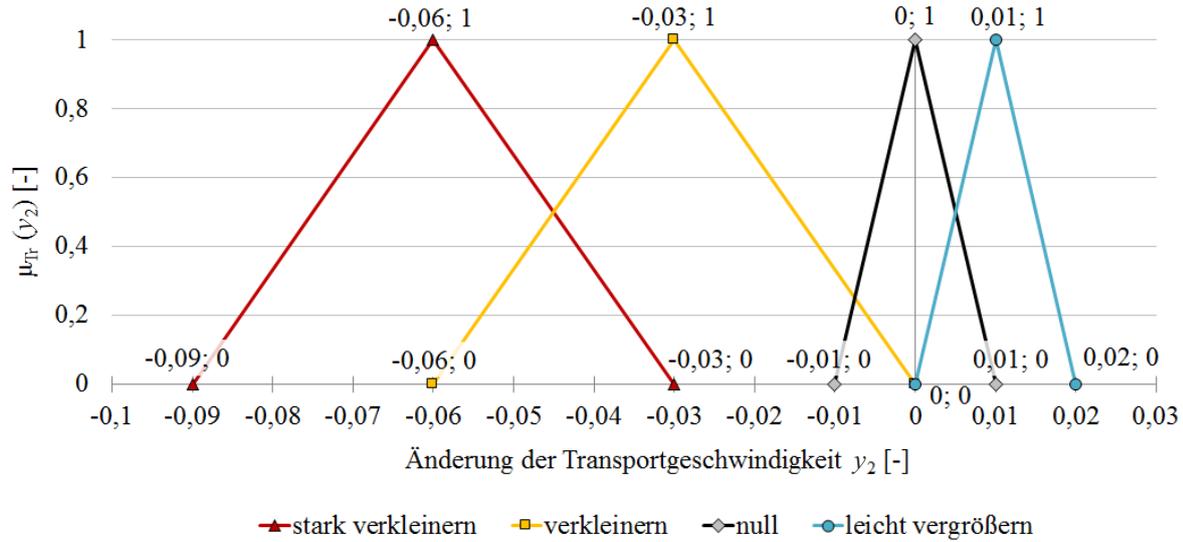


Abbildung 7.9: Zugehörigkeitsfunktionen für die Fuzzy-Mengen der Ausgangs-Variable Änderung der Transportgeschwindigkeit  $y_2 = \Delta f_{v,Tr}$ .

Die Fuzzy-Menge „klein“ wirkt kleinen Falten durch geringe Zugüberlagerung entgegen. Die maximale Zugehörigkeit der Dreiecksfunktion liegt bei  $y_2 = -0,03$ . Zur linken Seite ist die Menge durch  $y_2 = -0,06$  begrenzt, um genügend Überschneidung und damit einen fließenden Übergang zur Fuzzy-Menge „stark verkleinern“ zu gewährleisten. Der Grenzwert der rechten Seite beträgt  $y_2 = 0$ , da alle Werte zwischen  $y_2 = -0,03$  und  $y_2 = 0$  zu einer Verkleinerung des Transportfaktors führen.

Bei der Fuzzy-Menge „null“ bleibt die Transportgeschwindigkeit konstant. Die Grenzwerte zu beiden Seiten liegen bei  $y_2 = \pm 0,01$ , da diese geringen Änderungen wenig Einfluss auf die Faltenausprägung nehmen.

Durch die Fuzzy-Menge „leicht vergrößern“ kann die Geschwindigkeit der Transporteinheit vergrößert und damit überlagerte Zugspannungen reduziert werden. Das Rohr und die Werkzeuge werden dadurch entlastet. Die größte Zugehörigkeit liegt bei  $y_2 = 0,01$ , sodass ein kleinschrittiges Herantasten des Reglers bis zur Grenze der Faltenbildung möglich ist. Begrenzt wird die Fuzzy-Menge durch die Werte  $y_2 = 0$  und  $y_2 = 0,02$ . Dadurch ist eine maximale Vergrößerung von  $y_2 = 0,01$  unter Anwendung der Schwerpunktmethod bei der Defuzzifizierung möglich.

Um die Änderung der Transportgeschwindigkeit an der Biegemaschine umzusetzen, wird der neue Soll-Wert für den verbleibenden Transportweg  $l_{Tr,i+1}$  benötigt. Dieser kann nach Gleichung 7.4 aus dem neuen Transportfaktor  $f_{v,Tr,i+1}$  und dem verbleibenden Rohrweg  $\widehat{l}_{b,Rest}$  berechnet werden.

$$l_{Tr,i+1} = f_{v,Tr,i+1} \cdot \widehat{l}_{b,Rest} \quad (7.4)$$

Der neue Transportfaktor setzt sich nach Gleichung 7.5 aus dem aktuellen Transportfaktor und seiner Änderung zusammen.

$$f_{v,Tr,i+1} = f_{v,Tr,i} + \Delta f_{v,Tr,i} \quad (7.5)$$

Der verbleibende Rohrweg kann nach Gleichung 7.6 in Abhängigkeit von dem erreichten ( $\alpha_{\text{aktuell}}$ ) und zu erreichenden Biegewinkel ( $\alpha$ ) berechnet werden.

$$\widehat{l}_{b,\text{Rest}} = \pi \cdot R \cdot \frac{(\alpha - \alpha_{\text{aktuell}})}{180^\circ} \quad (7.6)$$

## 7.4 Formulierung der Produktionsregeln und Prüfen der Regler-Kennfelder

Die Regelbasis besteht aus Produktionsregeln, welche die Eingangs-Fuzzy-Mengen aus Abschnitt 7.2 mit den Ausgangs-Mengen aus Abschnitt 7.3 verknüpfen. Als Grundlage für die Regelbasis dienen die Erfahrungswerte aus den in Abschnitt 6.2 beschriebenen Biegeversuchen. Ebenso kann eine Regelbasis auf dem Erfahrungswissen von Maschinenbedienern aufgebaut werden. Produktionsregeln können neben dem Einsatz in Fuzzy-Reglern als Wissensbasis unterschiedlicher Anwendungen, wie beispielsweise CBR-Systemen, dienen, siehe Abschnitt 7.6. Ein Auszug aus der Regelbasis ist in Tabelle 7.1 gegeben. Die vollständige Regelbasis umfasst 27 Produktionsregeln und ist dem Anhang, Tabelle A.1, beigelegt.

Tabelle 7.1: Auszug aus den Produktionsregeln der Regelbasis.

	Faltenhöhe $x_1$		Änderung der Dornlängskraft $x_2$		Änderung der Faltenglätt- normalkraft $x_3$		Gegenhalter- zustellung $y_1 = \Delta s_{Gh}$		Änderung der Transport- geschwindigkeit $y_2 = \Delta f_{v,Tr}$
WENN	null	UND	negativ groß	UND	positiv klein	DANN	null	UND	stark verkleinern
WENN	null	UND	normal	UND	normal	DANN	negativ klein	UND	leicht vergrößern
WENN	klein	UND	negativ klein	UND	positiv klein	DANN	null	UND	verkleinern
WENN	klein	UND	normal	UND	positiv groß	DANN	positiv groß	UND	null
WENN	groß	UND	negativ groß	UND	normal	DANN	null	UND	stark verkleinern
WENN	groß	UND	negativ klein	UND	positiv groß	DANN	positiv groß	UND	null

Kennfelder sollen im Folgenden die Wechselwirkungen zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen des Fuzzy-Reglers veranschaulichen, die durch die Produktionsregeln definiert wurden. Bereiche, in denen die Ausgangsgrößen Extremwerte erreichen, konnten dadurch überprüft werden. Eine Einschätzung und theoretische Prüfung des Reglerverhaltens unabhängig von der Maschine konnte erfolgen.

In den Kennfeldern wurde jeweils eine Ausgangsgröße ( $y_1$  oder  $y_2$ ) über die drei Eingangsgrößen ( $x_1$ ,  $x_2$  und  $x_3$ ) aufgetragen. Ein Kennfeld besitzt drei Dimensionen, sodass jeweils eine der drei Eingangsgrößen auf einen charakteristischen Wert festgelegt wurde. Da jede Eingangsgröße über drei Fuzzy-Mengen verfügt, wurden drei charakteristische Werte festgelegt, für die je ein Kennfeld erstellt wurde. Es ergeben sich 18 im Anhang (Abbildung A.3 und A.4) befindliche Kennfelder für die in Tabelle 7.2 aufgeführten Eingangswerte. Zur Erläuterung der Produktionsregeln sind im Folgenden die wichtigsten Kennfelder dargestellt.

Tabelle 7.2: Für die Kennfelder festgesetzte Eingangswerte, bei denen jeweils die Zugehörigkeitsfunktion  $\mu(x) = 1$  für eine bestimmte Fuzzy-Menge definiert ist.

Eingangswert	Fuzzy-Menge	Eingangswert	Fuzzy-Menge	Eingangswert	Fuzzy-Menge
$x_1 = 0,17 \text{ mm}$	null	$x_2 = -0,24 \text{ kN/}^\circ$	normal	$x_3 = 0,13 \text{ kN/}^\circ$	positiv groß
$x_1 = 0,62 \text{ mm}$	klein	$x_2 = -0,60 \text{ kN/}^\circ$	negativ klein	$x_3 = 0,08 \text{ kN/}^\circ$	positiv klein
$x_1 = 0,90 \text{ mm}$	groß	$x_2 = -1,50 \text{ kN/}^\circ$	negativ groß	$x_3 = 0 \text{ kN/}^\circ$	normal

Die Kennfelder werden durch die Produktionsregeln zusammen mit der Inferenz für einen Ausgangswert bei Kenntnis von drei scharfen Eingangswerten geformt. Ein Feld aus ineinander übergehenden Ausgangsgrößen bildet sich aus den sich überlappenden Fuzzy-Mengen der Eingangsgrößen.

Für die Formulierung der Produktionsregeln werden die folgenden Annahmen zugrunde gelegt. Die Rissgefahr wird durch den Einsatz des Transportes gegen das Auftreten von Falten erhöht, da Zugkräfte über den gesamten Rohrquerschnitt direkt induziert werden. Der Gegenhalter übt Zugkräfte über die Reibung auf das Rohr aus, was eine geringere Steigerung der Rissgefahr verursacht. Der Einsatz des Gegenhalters wird in den Produktionsregeln bevorzugt.

Zeigen die Rohrkontur  $x_1$  oder die Faltenglätternormalkraft  $x_3$  faltensignifikante Verläufe an, handelt es sich um Primärfalten im geraden Rohrabschnitt vor der Übergangsebene. In den Produktionsregeln dominiert der Gegenhalter als Stellgröße in diesen Fällen. Das linke Kennfeld in Abbildung 7.10 zeigt, dass ein Anstieg der Faltenhöhe eine steigende Zustellung des Gegenhalters verursacht, solange der Dorn keine oder nur geringe Falten detektiert.

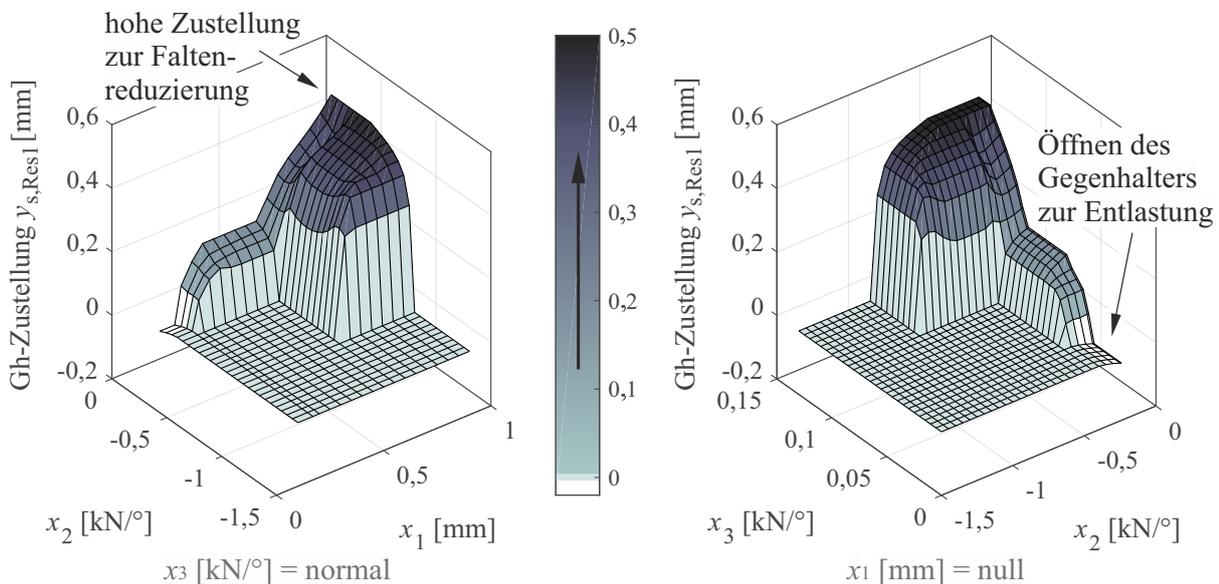


Abbildung 7.10: Kennfelder der Ausgangsgröße Gegenhalterzustellung  $y_1$  in Abhängigkeit von den Eingangsgrößen Faltenhöhe  $x_1$  sowie Änderung der Dorn-Längskraft  $x_2$  und Faltenglätternormalkraft  $x_3$  (unter Festsetzung jeweils einer Eingangsgröße entsprechend Tabelle 7.2).

Werden große Falten von dem Dorn erfasst, bleibt der Gegenhalter in Position, um die Transportachse als Stellgröße nicht zu behindern. In dem rechten Kennfeld in Abbildung 7.10 ist ein gleiches Reglerverhalten bei steigender Änderung der Faltenglätternormalkraft dargestellt.

Sekundärfalten werden in den Bogenbereich gezogen oder bilden sich dort, und können durch die Eingangsgröße Änderung der Dorn-Längskraft  $x_2$  erfasst werden. Sie haben dann eine detektierbare Faltengröße erreicht und befinden sich nicht länger im geraden Rohrabschnitt, was eine Reduzierung der Falten erschwert. Eine Verringerung der Transportgeschwindigkeit birgt das Potenzial, in kurzer Zeit viel Material aus der Umformzone zu ziehen und den Falten entgegen zu wirken. Eine Einflussnahme auf den Werkstofffluss im Bogenbereich ist durch die Gegenhalterzustellung nur über Reibkräfte möglich. Werden durch Änderungen in der Dorn-Längskraft große Falten detektiert, wird in erster Linie die Transportgeschwindigkeit entsprechend der Produktionsregeln reduziert, siehe Abbildung 7.11.

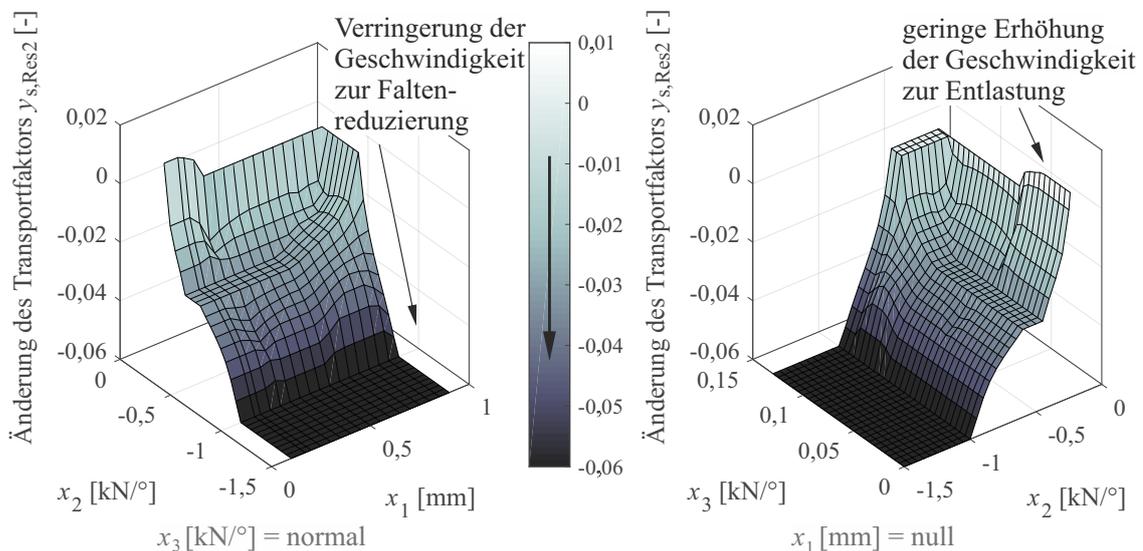


Abbildung 7.11: Kennfelder der Ausgangsgröße Änderung des Transportfaktors  $y_2$  in Abhängigkeit von den Eingangsgrößen Faltenhöhe  $x_1$  sowie Änderung der Dorn-Längskraft  $x_2$  und Faltenglätternormalkraft  $x_3$  (unter Festsetzung jeweils einer Eingangsgröße entsprechend Tabelle 7.2).

Wenn alle Eingangsgrößen große Falten signalisieren, greifen die Stellgrößen Gegenhalterzustellung  $y_1$  und Transportgeschwindigkeit  $y_2$  gleichermaßen. Würden beide Stellgrößen ihre maximal mögliche Reaktion auf große Falten auslösen, kann dies zu einer schlagartigen Rissgefahr führen. Zudem können sie sich gegenseitig in ihrer Auswirkung auf den Werkstofffluss behindern. Das Zusammenspiel beider Ausgangsgrößen bei Faltdetektion ist in Abbildung 7.12 dargestellt.

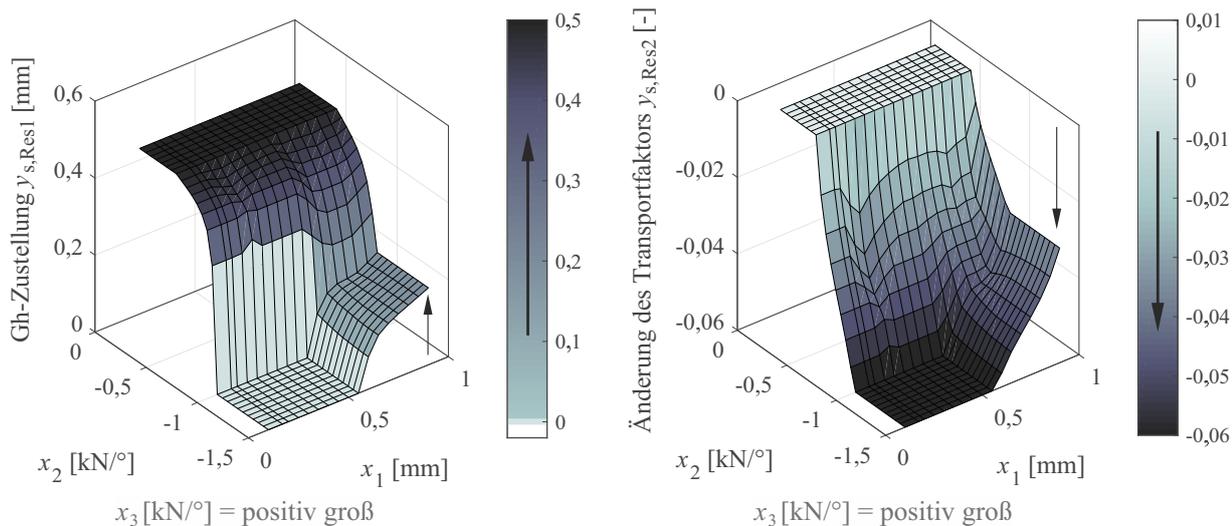


Abbildung 7.12: Kennfelder beider Ausgangsgrößen in Abhängigkeit von den Eingangsgrößen Faltenhöhe  $x_1$  und Änderung der Dornlängskraft  $x_2$  unter Festsetzung der Änderung der Faltenglätternormalkraft  $x_3 =$  positiv groß.

In den Produktionsregeln ist vorgesehen, dass beide Stellgrößen bei gleichzeitiger Reaktion nur in den Fuzzy-Mengen „positiv klein“ und „verkleinern“ den großen Falten entgegenwirken können, siehe Pfeilmarkierungen in Abbildung 7.12. Diese Fuzzy-Mengen gehören der Kategorie „kleine Falten“ an.

Werden von allen Eingangsgrößen keine faltensignifikanten Verläufe gemessen, wird der Prozess durch die Stellgrößen entlastet. Die Gegenhalterzustellung befindet sich in dem Bereich der Fuzzy-Menge „negativ klein“. Die Änderung der Transportgeschwindigkeit wird durch die Fuzzy-Menge „leicht vergrößern“ bestimmt. Sobald die Messwerte mindestens einer Eingangsgröße auf Falten schließen lassen, werden den Gegebenheiten entsprechende Regeln aktiviert, die der Faltenbildung entgegenwirken.

## 7.5 Programmierung des Fuzzy-Reglers

Die Programmierung beruht auf dem in Abschnitt 7.1 beschriebenen Aufbau und den Berechnungsschritten eines Fuzzy-Reglers. Die Rechenoperationen wurden in der Software *MATLAB R2016b* des Entwicklers THE MATHWORKS INC., Natick, USA, in Form von Funktionen umgesetzt, die gegenüber Skripten geringere Rechenzeiten aufweisen. Der Inhalt dieses Kapitels betrifft Implementierungen, die über die typischen Berechnungen eines Fuzzy-Reglers hinausgehen. Abbildung 7.13 zeigt den Aufbau der Funktionen (A bis G) des Regler-Programmes. Die Funktionen werden zur Berechnung scharfer Ausgangswerte nach dem Einlesen scharfer Eingangswerte automatisch aufgerufen.

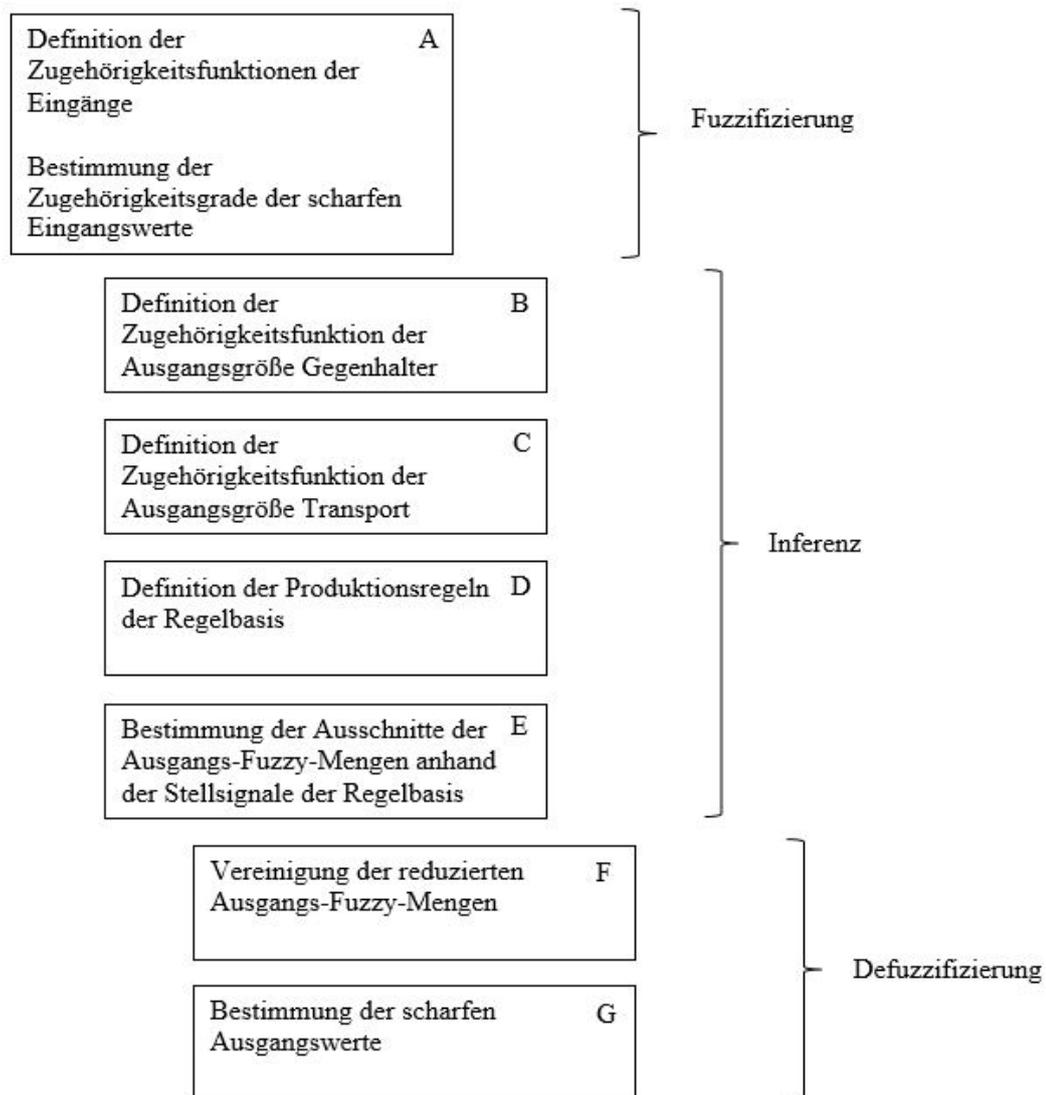


Abbildung 7.13: Aufbau der Funktionen zur Programmierung des Fuzzy-Reglers.

Mit jedem Einlesen von Eingangswerten wurde das Programm des Fuzzy-Reglers während des Biegens als Schleife durchlaufen und der Prozess auf Falten geprüft. Die Einhaltung der Grenzen, die Aufzeichnung relevanter Daten und das wiederholte Aufrufen des Programmes erfolgten automatisch. Im Folgenden wird die angewandte Schwerpunktsberechnung, die Aufzeichnung der Daten und die festgelegten Begrenzungen beschrieben.

### 7.5.1 Verwendung numerischer Variablen und numerischer Integration

Die Zugehörigkeitsfunktionen der Ausgangs-Fuzzy-Mengen Gegenhalterzustellung  $\mu_{\text{Res}}(y_1)$  und Transportgeschwindigkeit  $\mu_{\text{Res}}(y_2)$  sind mittels kontinuierlicher Variablen definiert. Im Rahmen der Programmierung werden die Intervalle  $y_1 = [-0, 1...1]$  und  $y_2 = [-0, 09...$

$0, 02]$ , bestehend aus unendlich vielen, infinitesimal kleinen Zahlenschritten, in eine endliche Anzahl an Stützstellen überführt.

Bei der Defuzzifizierung wurde die Flächen-Schwerpunkt-Methode angewandt. Die dazu erforderliche Integration kann durch die Intervallschachtelung numerisch erfolgen. Die numerische Integration wird anhand der Trapezregel nach HANKE-BOURGEOIS (2009) approximiert. In Abbildung 7.14 sind ein Funktionsverlauf und dessen Approximation dargestellt.

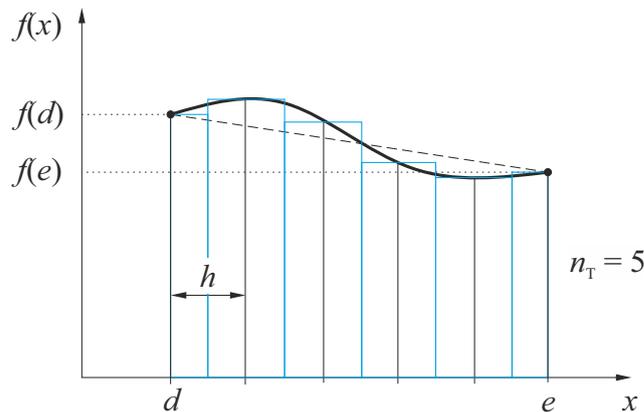


Abbildung 7.14: Prinzipskizze zur Berechnung der Trapezregel mit Stützstellen  $d$ ,  $e$  und äquidistanter Schrittweite  $h$ , DEUFLHARD & HOHMANN (2002).

Durch eine Sehne als Verbindungsgerade können zwei Funktionswerte  $f(d)$  und  $f(e)$  an den Stützstellen  $d$  und  $e$  verbunden und der Funktionsverlauf angenähert werden. Es entsteht eine Trapezfläche als Näherung der tatsächlichen Fläche, die von der Funktion aufgespannt wird. Um den Fehler zu verkleinern, kann das Intervall  $[d, e]$  in Teilintervalle der Anzahl  $n_T$  geteilt werden. Die äquidistante Schrittweite  $h$  kann nach Gleichung 7.7 berechnet werden.

$$h = \frac{e - d}{n_T} \quad (7.7)$$

Die zusammengesetzte Trapezregel nach HANKE-BOURGEOIS (2009) für das Intervall  $[d, e]$  und die Funktion  $f(y)$  lautet

$$T_{n_T}[f(y)] = \frac{h}{2} \cdot f(d) + h \cdot \sum_{i=1}^{n_T-1} f(d + i \cdot h) + \frac{h}{2} \cdot f(e). \quad (7.8)$$

Der Fehler, der durch die Approximation entsteht, kann durch Gleichung 7.9 angenähert werden.

$$E_{n_T}[f(y)] = \frac{e - d}{12} \cdot \|f''(y)\|_{[d,e]} \cdot h^2 \quad (7.9)$$

Der Ausdruck  $\|\cdot\|_{[d,e]}$  bezeichnet die Maximumnorm. Die Norm berechnet das betragsmäßige Maximum der zweiten Ableitung der Funktion  $f(y)$  in dem Intervall  $[d, e]$ . Nach ISKE (2018) kann  $\|f''(y)\|_{[d,e]} := \max_{[d,e]} |f''(y)|$  definiert werden.

Die scharfen Ausgangswerte für die Gegenhalterzustellung  $y_{s, \text{Res1}}$  und die Transportgeschwindigkeit  $y_{s, \text{Res2}}$  wurden nach Gleichung 7.8 berechnet. Sowohl für den Zähler als

auch für den Nenner wurde die numerische Integration angewandt. Für die Gegenhalterzustellung wurde die Schrittweite  $h_{\text{Gh}} = 0,001$  und für die Transportgeschwindigkeit die Schrittweite  $h_{\text{Tr}} = 0,0001$  unter Beachtung der Rechenzeit und des Approximationsfehlers gewählt.

Der Approximationsfehler wurde nach Gleichung 7.9 berechnet. Dazu wurden die folgenden Annahmen getroffen. Die Ausgangs-Fuzzy-Mengen bestehen aus einem ansteigenden, einem konstanten und einem abfallenden Bereich. Die für den konstanten Bereich berechnete zweifache Ableitung ist, ebenso wie der zugehörige Fehler, gleich 0. Nach der Dreiecksfunktion in Gleichung 2.40 lassen sich die Funktionen  $f(y)$  des Anstiegs und des Abfalls einer Fuzzy-Menge aufstellen. Tabelle 7.3 zeigt die zur Berechnung des Approximationsfehlers aufgestellten Funktionen und deren Ableitungen, getrennt nach Integral des Zählers, Integral des Nenners, Kurvenanstieg sowie Kurvenabfall.

Tabelle 7.3: Berechnung des Approximationsfehlers durch numerische Integration für eine Dreiecksfunktion nach Abbildung 2.18.

	$f(y)$	$f'(y)$	$f''(y)$	$E_{n_T}(h)$
Zähler, Anstieg	$y \cdot \frac{y-a}{b-a}$	$\frac{2y-a}{b-a}$	$\frac{2}{b-a}$	$\frac{b-a}{12} \cdot h^2 \cdot \frac{2}{b-a} = \frac{h^2}{6}$
Zähler, Abfall	$y \cdot \frac{c-y}{c-b}$	$\frac{c-2y}{c-b}$	$\frac{-2}{c-b}$	$\frac{c-b}{12} \cdot h^2 \cdot \frac{2}{c-b} = \frac{h^2}{6}$
Nenner, Anstieg	$\frac{y-a}{b-a}$	$\frac{1}{b-a}$	0	$\frac{b-a}{12} \cdot h^2 \cdot 0 = 0$
Nenner, Abfall	$\frac{c-y}{c-b}$	$\frac{-1}{c-b}$	0	$\frac{c-b}{12} \cdot h^2 \cdot 0 = 0$

Die resultierenden Gleichungen zur Berechnung des Approximationsfehlers nach Tabelle 7.3 weisen nach Herauskürzen der Grenzen  $a$ ,  $b$  und  $c$  als einzige beeinflussende Variable die äquidistante Schrittweite  $h$  auf. Dadurch kann der Approximationsfehler für beliebige Grenzen in Abhängigkeit von der gewählten Schrittweite berechnet werden. Bei der Schrittweite der Ausgangsgröße Gegenhalterzustellung beträgt der Fehler  $E_{n_T}[f(y)] = 1,67 \cdot 10^{-7}$ . Bei der Schrittweite der Ausgangsgröße Änderung der Transportgeschwindigkeit beträgt der Fehler  $E_{n_T}[f(y)] = 1,67 \cdot 10^{-9}$ .

## 7.5.2 Aufzeichnung relevanter Daten

Das Regelungsprogramm enthält sowohl Eingangs- als auch Ausgangsgrößen, deren Historien für eine Untersuchung des Reglerverhaltens von Bedeutung sind. Zur Dokumentation der Daten wurden Matrizen definiert, in denen mit jedem Programmdurchlauf Werte gespeichert wurden. Die Matrizen wurden nach Ablauf des Prozesses als Text-Datei abgespeichert und mit der Software *MATLAB R2016b* des Entwicklers THE MATHWORKS INC., Natick, USA, sowie *Excel 2013* der MICROSOFT CORPORATION, Redmond, USA, weiterverarbeitet und analysiert.

## 7.5.3 Begrenzungen der Ausgangsgrößen

Greifen Regler in Umformprozesse an hydraulischen Maschinen ein, besteht ein Gefährdungspotenzial durch ungewollte Reaktionen der geregelten Maschinenachsen. Die durch das Regelungsprogramm berechneten scharfen Ausgangsgrößen wurden mit Filtern belegt, um plötzliche, große Veränderungen an den Maschinenachsen zu vermeiden. Bestand zwischen zwei aufeinanderfolgend berechneten Gegenhalterzustellungen  $y_{s,Res,1}$  eine Differenz  $\geq 0,3$  mm oder  $\leq -0,3$  mm, lag das Risiko eines Ausreißers in den Eingangsgrößen vor. Die Änderung der Ausgangsgröße wurde unter dieser Bedingung auf 0,1 mm beschränkt. Mit jedem Durchlauf konnte sich die Ausgangsgröße an den berechneten Sollwert annähern. Handelte es sich um einen Ausreißer, wurde dieser durch den nächsten berechneten Wert korrigiert, ohne eine plötzliche, große Änderung an der hydraulischen Achse umzusetzen. Für den Geschwindigkeitsfaktor des Transports  $y_{s,Res2}$  wurde im Programm eine maximale Differenz von  $\pm 0,04$  hinterlegt und eine reduzierte Veränderung von  $\pm 0,005$  vorgesehen. Die Kraftreaktionen auf den Dorn und den Faltenglätter wiesen bis zu einem Biegewinkel von  $12^\circ$  ein erhöhtes Rauschen und Schwankungen auf. Grund dafür kann der Werkzeugkontakt sein, der erst durch das Anlegen des Rohres am Gegenhalter definiert wird. Durch den Regler berechnete Ausgangsgrößen wurden erst ab einem Biegewinkel von  $12^\circ$  an der Gegenhalterachse umgesetzt. Ab einem Biegewinkel von  $85^\circ$  sollte der Dornrückzug beginnen. Durch ein Verschleifen der Achsenbewegungen wurden bereits ab einem Biegewinkel von  $80^\circ$  ein Kraftabfall am Dorn und Schwankungen in der Faltenglätterkraft erfasst. Die Ausgangsgrößen wurden bis zu einem Biegewinkel von  $80^\circ$  an der Gegenhalterachse umgesetzt. Danach blieb die Gegenhalterposition bis zum Erreichen des Endbiegewinkels von  $90^\circ$  konstant.

## 7.6 Methode und Ablaufplan zur Faltenkorrektur

In den vorherigen Kapiteln wird die Entwicklung einer Fuzzy-Regelung zur Faltenkorrektur beim Rotationszugbiegen beschrieben. Aus dem Vorgehen zur Entwicklung der Regelung lässt sich eine Methode ableiten, die auf andere Verfahren zur Problemlösung übertragbar ist. Um gespeichertes Wissen für die Produktion nutzbar zu machen, bedarf es nach SCHMID et al. (2010) und KOPFER (2016) eines Wissenstransfers. Dieser

Bestandteil eines Systems zur Problemlösung stellt eine Beziehung zwischen dem vorhandenen Wissen und den beeinflussbaren Größen eines Prozesses her. Abbildung 7.15 zeigt den Ablauf und die Arbeitsschritte zur Erarbeitung des Wissenstransfers.

In der Ausgangssituation ist eine Wissensextraktion und –speicherung in Form einer Wissensbasis erfolgt. Daten, wie die Ergebnisse aus praktischen Versuchen und FE-Berechnungen sowie das Erfahrungswissen von Maschinenbedienern, werden extrahiert und in einer Datenbank gespeichert. Es folgt eine Klassifizierung der Ein- und Ausgangsgrößen eines Prozesses in Form von Fuzzy-Sets auf Basis des vorhandenen Wissens. Die Erstellung von Produktionsregeln verknüpft die Größen untereinander, sodass Kennfelder erzeugt werden können, die deren Wechselwirkung beschreiben. Die vorliegenden Ein- und Ausgangsgrößen eines Prozesses sowie deren Abhängigkeiten können als Grundlage unterschiedlicher Systeme zur Problemlösung dienen.

Der Fuzzy-Regler stellt ein statisches, nichtlineares System zur Problemlösung dar. Er hat den Vorteil bei stark wechselnden Parametern und nicht linearen Abhängigkeiten eingesetzt werden zu können. Zudem können in seiner Regelbasis im Vergleich zu anderen Regelungsmethoden Erfahrungswerte aufgenommen und berücksichtigt werden. Die Rückführung der Regelgröße erfolgt über In-situ-Messsysteme. Dadurch kann der Regler die Führungsgröße kontinuierlich anpassen. Der Fuzzy-Regler kann ohne Änderung der Fuzzy-Sets und der Regelbasis auf ein Spektrum an unterschiedlichen Maschinen, Halbzeugen und Prozessen übertragen werden. Der Regler kann außerhalb des Spektrums durch die Anpassung der Fuzzy-Sets eingesetzt werden. Anpassungen der Grenzen der Fuzzy-Sets können anhand der Werte in Anhang A.3 näherungsweise abgeleitet werden. Durch die Übertragbarkeit kann der Fuzzy-Regler die Bauteilqualität beliebiger Biegeaufgaben verbessern. Als Voraussetzung lassen sich zum einen die In-situ-Messsysteme definieren. Zum anderen muss die Möglichkeit gegeben sein, in den Prozess eingreifen und die Stellgrößen in der Regelstrecke umsetzen zu können.

Sind die Voraussetzungen eines Fuzzy-Reglers nicht gegeben, kann ein Case-based reasoning-System (CBR), beschrieben in Unterabschnitt 4.1.3, eingesetzt werden. Das CBR-System ist ein maschinelles Lernverfahren zur Problemlösung. Maschinenbediener bekommen Einstellempfehlungen, die sie nach einer erfolgten Biegung an der Maschine umsetzen. Dadurch ist der automatische Eingriff in den Prozess nicht erforderlich. Ein CBR-System besteht aus einer Fall-Datenbank. Jeder Fall beschreibt die Wirkung einer Kombination aus Eingangsgrößen auf das Produktergebnis bzw. eine Kombination der Ausgangsgrößen. Die Fall-Datenbank kann nach einem Wissenstransfer aus den entwickelten Kennfeldern aufgebaut werden. In-situ-Messsysteme sind nicht erforderlich. Ein großer Vorteil des Systems ist, dass mit jeder Biegung ein neuer Fall abgelegt werden kann, sodass die Datenbank wächst und an Erfahrung zunimmt. Die Fälle passen sich immer besser an die vorliegende Maschine, das Halbzeug und den Prozess an. Nachteilig ist, dass eine direkte Übertragbarkeit nicht gegeben ist. Passen die Kennfelder nicht zu den vorliegenden Gegebenheiten, müssen erst passende Fälle gesammelt und gespeichert werden, bis eine erfolgreiche Problemlösung einsetzen kann. Eine kontinuierliche Anpassung von Regelgrößen während des Prozesses ist nicht gegeben.

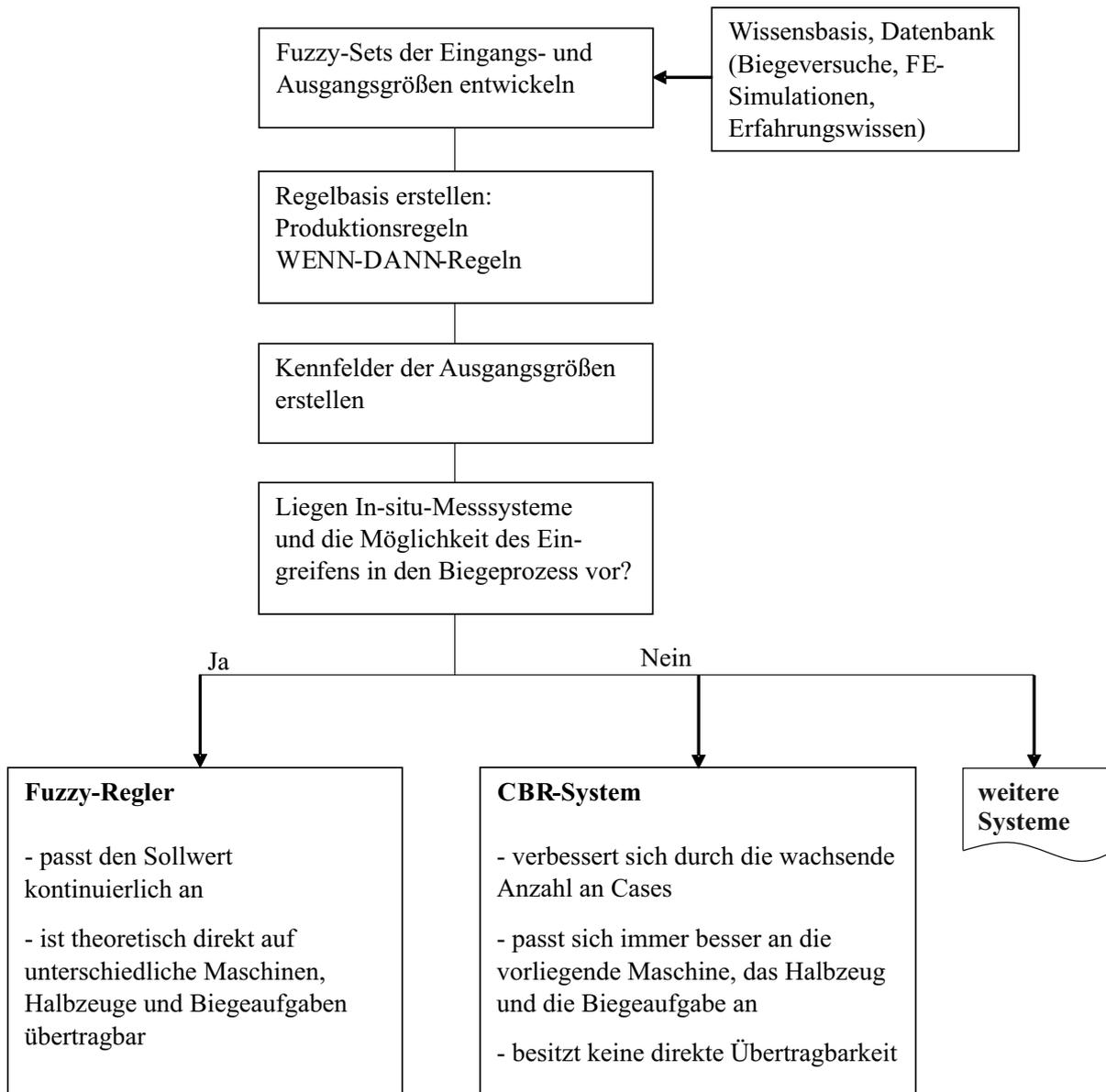


Abbildung 7.15: Arbeitsschritte zur Erarbeitung eines Systems zur Problemlösung unter Anwendung der Faltenkorrektur beim Rotationszugbiegen.

Die beschriebene Methode besteht zum einen aus der Wissensextraktion und –speicherung zur Generierung einer Wissensbasis und zum anderen aus dem Wissenstransfer anhand von Fuzzy-Sets, Produktionsregeln und Kennfeldern. Dadurch können Zusammenhänge zwischen vorhandenem Prozesswissen und beeinflussbaren Größen eines Prozesses hergestellt werden. Neben den oben genannten Anwendungsverfahren können weitere Systeme zur Problemlösung mit den Informationen gespeist werden, die anhand dieser Methode gewonnen werden.

## 8 Einbindung und Erprobung der Regelungsmethode

In dem folgenden Kapitel werden zum einen die Implementierung des Fuzzy-Reglers an der Biegemaschine und zum anderen praktische Biegeversuche zur Erprobung beschrieben. Neben der Montage der Rotationszugbiegewerkzeuge wurden Sensoren an der Biegemaschine montiert und mit dem MES verbunden. Die Sensoren dienen zur Erfassung der Regler-Eingangsgrößen und der Ist-Positionen von Maschinenachsen. Regler-Ausgangsgrößen konnten durch den Datenaustausch zwischen dem in Abschnitt 7.5 beschriebenen Regelungsprogramm und dem MES an der Maschine umgesetzt werden. In praktischen Versuchen unterschiedlicher Biegeaufgaben konnten mit Hilfe des Reglers faltenfreie Rohrbögen hergestellt werden.

### 8.1 Werkzeugaufbau und Sensoranordnung

Praktische Biegeversuche wurden an der lehrstuhleigenen Biegemaschine TN 120 (Unterabschnitt 4.1.2) zur Untersuchung des programmierten Fuzzy-Reglers durchgeführt. Der Werkzeugaufbau und die Sensoranordnung entsprachen dem in Abschnitt 6.2 beschriebenen Aufbau. Zum Einsatz kamen ein Laser-Liniensensor, positioniert hinter dem Faltenglätter, ein Kraftsensor in der Dornstange, zwei Kraftmessdosen in der Gegenhalteraufnahme und eine Kraftmessdose in der Faltenglätteraufnahme. Darüber hinaus wurden ein induktiver Winkelaufnehmer *ASM PRMAG 20* der AUTOMATION SENSORIK MESSTECHNIK GMBH, Moosinning, zur Erfassung des Biegewinkels an der Biegeachse und ein induktiver Wegaufnehmer SM222.4 der SCHREIBER MESSTECHNIK GMBH, Oberhaching, als Feintaster zur Erfassung der Position der Gegenhalterachse eingesetzt. Die Regelgröße wurde an dem Hydraulikzylinder der Gegenhalterachse (g-Achse, Abbildung 2.5) umgesetzt. Das 4/3-Wege-Servoventil des Hydraulikzylinders wurde dazu von der SPS der Biegemaschine getrennt und über das MES (siehe Unterabschnitt 4.4.2) gesteuert. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 8.1 dargestellt.

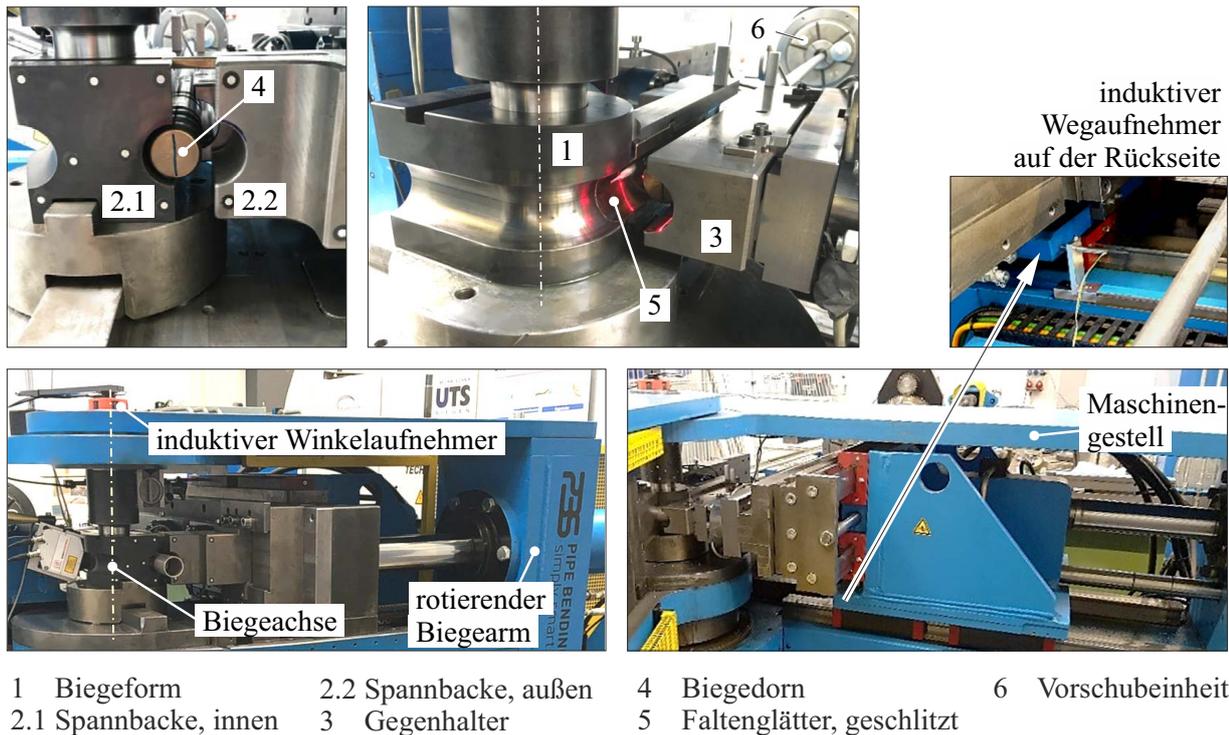


Abbildung 8.1: Detailansichten der Werkzeuge an der Biegemaschine. Induktiver Wegaufnehmer zur Erfassung der Ist-Position der Gegenhalterachse. Induktiver Winkelaufnehmer, der die Drehwinkeldifferenz zwischen dem Biegearm und dem Maschinengestell ermittelt.

In die Steuerung der Transportachse (y-Achse, Abbildung 2.5), die über einen Elektromotor erfolgt, kann nicht außerhalb der SPS der Biegemaschine eingegriffen werden. Dadurch wurde die Ausgangsgröße Transportgeschwindigkeit nicht an der Maschinenachse umgesetzt. Die durch den Fuzzy-Regler berechneten Ausgangsgrößen für die Transportgeschwindigkeit wurden dokumentiert und insbesondere in Unterabschnitt 8.3.3 ausgewertet. Weiterhin wurde das Reglerverhalten mittels FE-Simulation in Anhang A.1 bei Primär- und Sekundärfalten unter Einsatz beider Stellgrößen erprobt. Der Fuzzy-Regler setzt, unabhängig von den Gegebenheiten an der Biegemaschine, die Gegenhalterzustellung bevorzugt zur Faltenverhinderung ein, da der Einsatz der Transportachse eine höhere Rissgefahr verursacht.

### 8.1.1 Ausgangspositionen der Werkzeuge

Der Rotationszugbiegeprozess kann im Vorfeld näherungsweise ausgelegt werden, siehe Abbildung 8.2. Die Ergebnisse können zur Einordnung der Ausgangspositionen der Gegenhalter- und Transportachse herangezogen werden. Der Fuzzy-Regler berechnet in Abhängigkeit von der Faltenbildung geeignete Änderungen der Gegenhalter- und der Transportachse. Dadurch kann auf individuelle Einflüsse reagiert werden, die von der analytischen Auslegung nicht berücksichtigt werden.

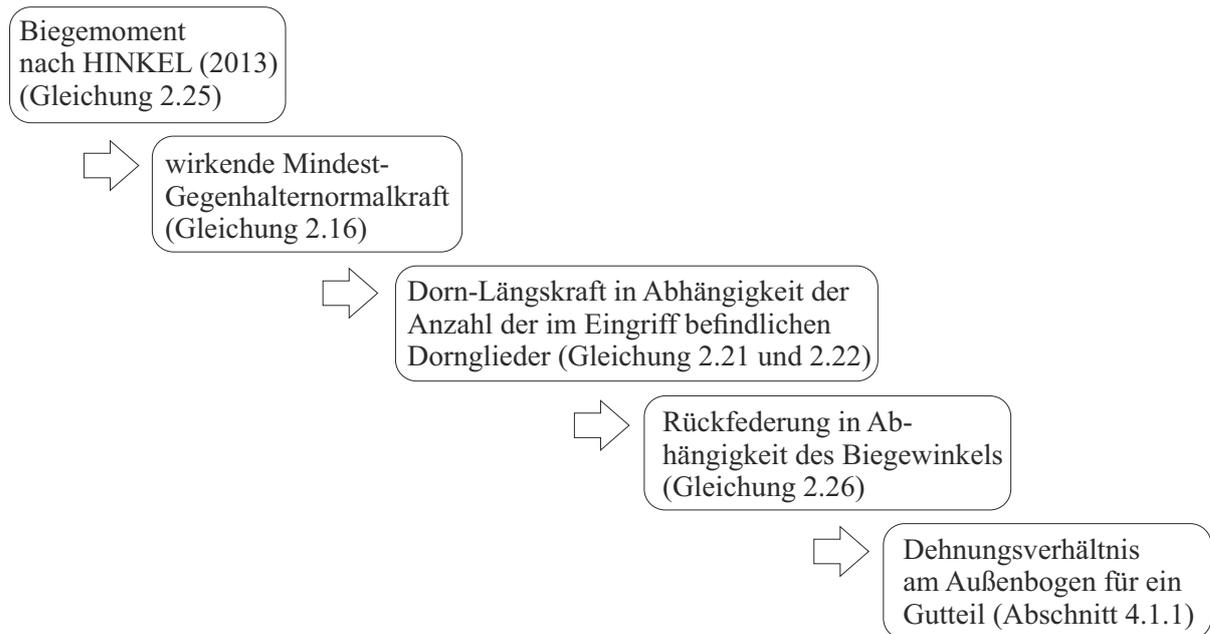


Abbildung 8.2: Ablaufskizze zur Auslegung der Prozessgrößen des Rotationszugbiegens.

Die Startposition des Gegenhalters beeinflusst die Gegenhalternormalkraft. Liegt eine Normalkraft  $F_{\text{GhN}} > F_I$  an (größer als die aus dem Umformprozess resultierende Querkraft  $F_I$ , siehe Unterabschnitt 2.1.5), wirkt eine Normalkraft  $F_{\text{FgN}}$  auf den Faltenglätter. Sie wirkt auf die Rohrwand am Innenbogen und kann Falten verhindern. Dickwandige Rohre sind nach Unterabschnitt 4.4.2 stabiler und benötigen eine niedrigere Faltengläternormalkraft als dünnwandige Rohre. Der Gegenhalter muss vor Biegebeginn auf Kontakt (Normalkraft  $> 0$  kN) gefahren werden. Die für die Untersuchung gewählten Startpositionen des Gegenhalters sind in Tabelle 8.1 aufgeführt.

Tabelle 8.1: Gewählte Gegenhalter-Vorspannkraft in Abhängigkeit von der Rohrgeometrie.

Rohrgeometrie $D \times s$	Gegenhalter-Vorspannkraft
40 x 1	10 kN
40 x 0,8	20 kN
40 x 2	7,5 kN

In der Startposition des Biegeprozesses war das Rohr zwischen innerer und äußerer Spannbacke gespannt. Das andere Rohrende konnte frei nachlaufen. Der Faltenglätter wurde konventionell positioniert (Abschnitt 4.3). Der Dorn wurde in Längsrichtung an der Übergangsebene ausgerichtet. Der Drehmittelpunkt des ersten Dorngliedes lag in der Übergangsebene. Der induktive Wegaufnehmer zur Erfassung der Gegenhalterposition wurde nach Anfahren der Startposition auf 0 gesetzt, um die Referenzposition für die Reglerausgangsgröße festzulegen.

### 8.1.2 Ermittlung der Faltenhöhe mittels Laser-Liniensensor

Die Messdaten des Laser-Liniensensors wurden in der Software *ScanControl Configuration Tools* der MICRO-EPSILON GMBH & CO. KG, Ortenburg, verarbeitet und in *MATLAB R2016b* des Entwicklers THE MATHWORKS INC., Natick, USA, mittels einer Text-Datei eingelesen. Abbildung 8.3 zeigt die übertragenen Variablen, die analog zu den in Unterabschnitt 6.2.3 ausgewerteten Faltenhöhen definiert wurden.

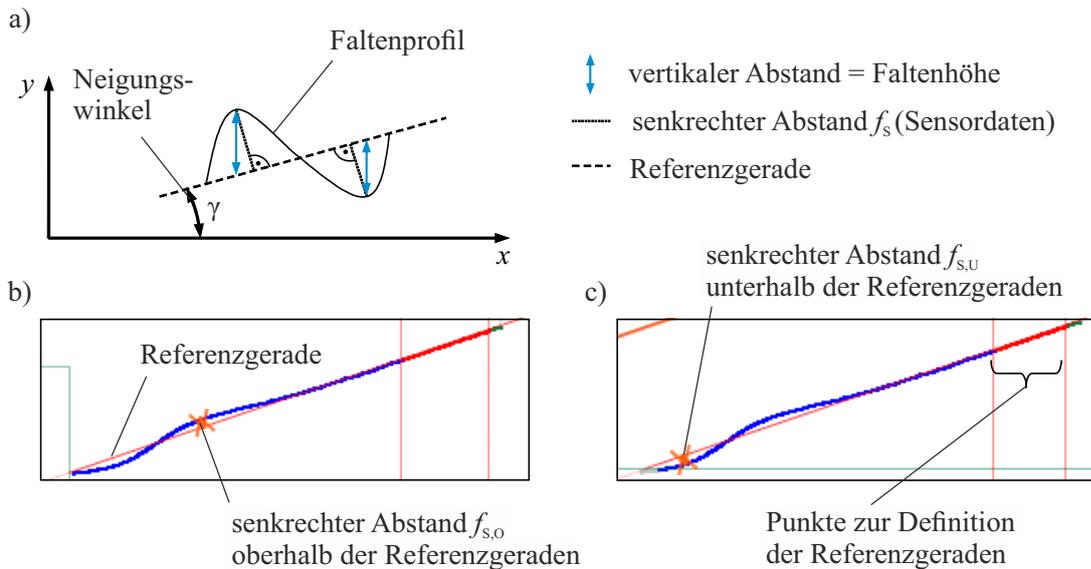


Abbildung 8.3: a) Skizze zur Ermittlung der Faltenhöhe  $f_h$  aus den Sensordaten, welche der Faltenhöhe aus den Abbildungen 6.4 und 6.5 (als Differenz der y-Koordinaten) entspricht. b) Profil mit dem von der Software *ScanControl Configuration Tools* angezeigten maximalen Abstand oberhalb der Referenzgeraden (Faltenberg) und c) unterhalb der Referenzgeraden (Faltental).

Die maximalen senkrechten Abstände oberhalb und unterhalb der Referenzgeraden  $f_{s,o}$  und  $f_{s,u}$  sowie der Neigungswinkel  $\gamma$  wurden in einer Matrix gelistet. Das Regelungsprogramm las bei einem Durchlauf die letzte Zeile mit den aktuellen Messwerten aus.

Die Referenzgerade wurde in den Anfangsbereich der Messpunkte gelegt. Der maximale senkrechte Abstand oberhalb der Referenzgeraden bildete die Variable des Faltenbergs. Der maximale senkrechte Abstand unterhalb der Referenzgeraden bildete die Variable des Faltentals. Deren Summe wurde anhand des Neigungswinkels  $\gamma$  in die maximale Faltenhöhe

$$f_h = \cos(\gamma) \cdot (f_{s,o} + f_{s,u}) \quad (8.1)$$

umgerechnet. Die Messdaten des Laser-Liniensensors wurden mit 5 Hz abgetastet und übertragen. Die Anordnung des Laser-Liniensensors ist in Abbildung 8.4 dargestellt.



Abbildung 8.4: a) Positionierung des Laser-Liniensensors an der Biegemaschine hinter der Biegeform. b) Rückseite des Faltenglätters und der Faltenglätteraufnahme mit Aussparung. c) Innenseite des Faltenglätters mit Aussparung und eintretendem Laserstrahl.

Der Neigungswinkel wurde durch die Lage des Laser-Liniensensors verursacht. Er war zum einen in einem Winkel  $\alpha_S > 30^\circ$  zur Rohrlängsachse positioniert, damit der Laser an der Biegeform vorbei möglichst weit in Richtung der Umformzone misst. Zum anderen war der Sensor um seine eigene Achse gedreht, um eine störungsfreie Messung durch den Schlitz unter Beachtung des Ein- und Ausfallwinkels des Lasers zu gewährleisten.

## 8.2 Programmentwicklung zur rechnergestützten Versuchsdurchführung

Einen großen Bestandteil der Kommunikation zwischen dem Programm des Fuzzy-Reglers und der Biegemaschine bildete das Messerfassungssystem (MES) durch die Software *DIA-dem Advanced Edition 2020 mit DAC Bundle* der NATIONAL INSTRUMENTS GERMANY GMBH, München. Die Dorn-Längskraft, die Faltenglätterquerkraft und der Biegewinkel wurden mit einer Frequenz von 5 Hz bei einer Biegegeschwindigkeit von durchschnittlich  $1,5^\circ/s$  aufgezeichnet und in dem Reglerprogramm gespeichert. Ausgelöst durch ein Triggersignal des MES las das Programm die Variablen des Laser-Liniensensors aus und berechnete die in Unterabschnitt 8.1.2 beschriebene maximale Faltenhöhe  $f_h$ . Unter Einhaltung der in Unterabschnitt 7.5.3 beschriebenen Grenzen wurde aus den Eingangsgrößen eine Gegenhalterzustellung als Ausgangsgröße ermittelt. Betrug diese null, blieb der Gegenhalter in seiner Position. Sofern die Ausgangsgröße von null abwich, wurde die aktuelle Gegenhalterposition (Ist-Position) durch den induktiven Wegaufnehmer erfasst und an das MES übertragen. Durch Summieren beider Größen nach Gleichung 7.3 wurde eine neue Gegenhalterposition (Soll-Position) gebildet, die an der Achse umgesetzt wurde. Der Regelprozess wurde so lange durchlaufen, bis ein Abbruchkriterium erfüllt war, z.B. das

Erreichen des Endbiegewinkels. Eine schematische Darstellung der Datenübertragung für den Einsatz des Reglers an der Biegemaschine ist in Abbildung 8.5 gegeben.

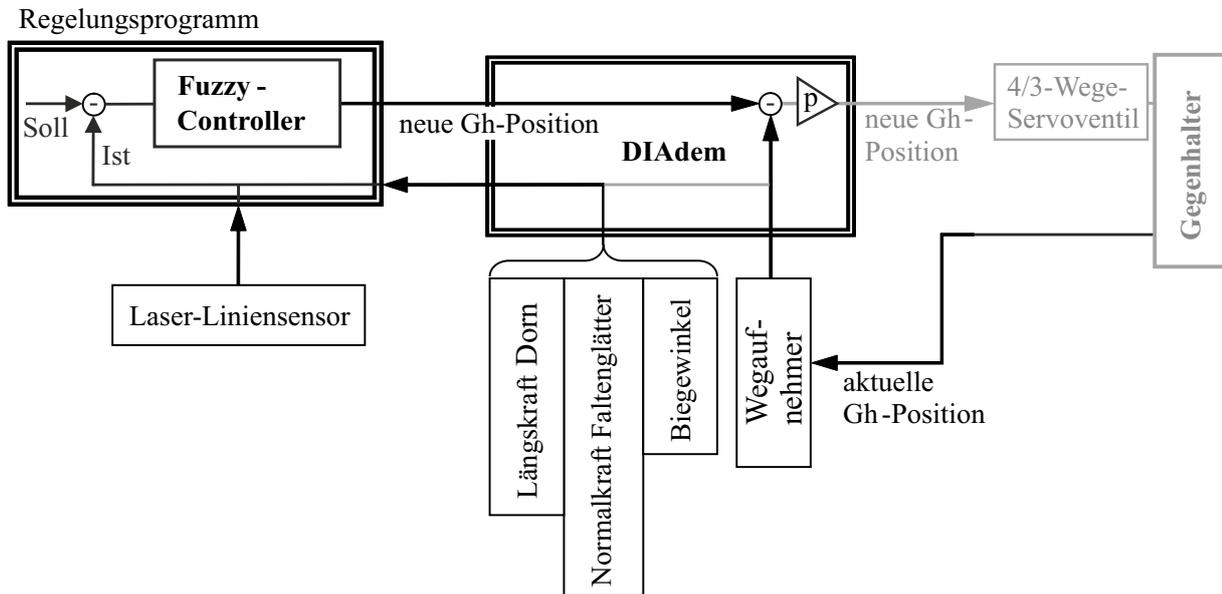


Abbildung 8.5: Prinzipskizze der Datenübertragung zur Implementierung des Fuzzy-Reglers an der Biegemaschine.

Die Umsetzung der Regelgröße erfolgte über den in Unterabschnitt 4.4.2 beschriebenen Analog/ Digital-Umwandler PCIe 6014. Signale einer der digitalen Ausgänge lösten an dem elektrischen Ventil der Maschinenachse ein Umschalten aus, sodass der Hydraulikzylinder über die Software *DIAdem Advanced Edition 2020* anstelle der Maschinen-SPS geregelt werden konnte. Ein analoger Ausgang wurde genutzt, um eine definierte Spannung an das Ventil zu übertragen und die berechnete Positionsänderung der Gegenhalterachse durchzuführen. Die Spannung wurde durch einen P-Regler als Baustein des MES ermittelt. Der P-Regler führte mit einer Frequenz von 50 Hz Abgleiche von der Führungsgröße (Soll-Wert) und der Regelgröße (Ist-Wert) durch und verstärkte diese. Geeignete Werte für die Verfahrgeschwindigkeit und die Frequenz der umzusetzenden Soll-Werte wurden unter Beachtung der in praktischen Versuchen entstandenen Kraftspitzen gewählt. Dadurch konnte ein Aufschwingen der Maschinenachse verhindert werden. Die Übertragungsfrequenz der Soll-Werte wurde mit 1,4 Hz festgelegt. Die Achsenbeschleunigung wurde durch eine Begrenzung der maximalen zeitlichen Spannungsänderung des analogen Spannungsausgangs auf 0,3 V/s beschränkt.

Zum Schutz der Sensoren wurden in dem MES Kraftgrenzen für die Dornkraft, die Faltenglätterkraft sowie die Gegenhalterkräfte hinterlegt. Bei Überschreiten der Grenzen hätte der Gegenhalter nicht weiter in Richtung des Rohres zugestellt werden können, sondern wäre bis zum Biegeende in seiner Position verblieben. Es handelte sich um eine Sicherheitsmaßnahme, die bei den praktischen Versuchen nicht zum Einsatz kommen musste. Die Gegenhalterzustellung wurde bei den Einfahrversuchen zusätzlich zu den Kraftgrenzen mit einem Maximalweg begrenzt, um eine Kollision zwischen dem Gegenhalter und der Biegeform zu verhindern.

Die Schnittstelle zwischen *MATLAB R2016b* und *DIAdem Advanced Edition 2020* erforderte ein eigenes Skript, welches in der Programmiersprache *Visual Basic* innerhalb der *DIAdem*-Umgebung aufgesetzt wurde. Die zu übertragenden Größen mussten in dem Skript als Variablen definiert werden. Sie wurden bei jedem Reglerdurchlauf überschrieben, aber als wachsende Matrix in *MATLAB R2016b* gespeichert. Zu den Übertragungsgrößen gehörte der Biegewinkel, die Faltenglätterkraft und die Dornkraft. Die im Reglerprogramm berechnete Gegenhalterzustellung  $\Delta s_{Gh}$  wurde an *DIAdem Advanced Edition 2020* zurückgeschrieben.

## 8.3 Versuchsergebnisse

Die Validierungsversuche begannen mit einem iterativen Einstellprozess des Reglers. Frequenzen und Geschwindigkeiten wurden aufeinander abgestimmt. Nachdem die Bauteilqualität und das Maschinenverhalten keine Fehler zeigten, wurden Variationen hinsichtlich Biegegeschwindigkeiten, Wanddickenfaktoren, Bogenanzahl und Werkstoff durchgeführt. Zudem wurden Versuche durchgeführt, in denen die Einflüsse der drei Eingangsgrößen getrennt voneinander untersucht wurden. Der Versuchsplan der praktischen Validierungsversuche ist in Tabelle 8.2 gegeben. Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse beschrieben.

Tabelle 8.2: Versuchsplan praktischer Biegeversuche zur iterativen Anpassung und Validierung des Fuzzy-Reglers an der Rotationszugbiegemaschine TN 120.

Probenkurzbezeichnung	Faltenbewertungsfaktor $\Omega [10^{-3}]$	Informationen zu Reglereinstellungen
R-40x1-A01 bis -A03	2,18	faltenbehaftete Referenzbiegungen ohne Umsetzung der Ausgangsgrößen an der Biegemaschine
R-40x1-A04	0 (mit leichten Wellen)	Einstellprozess Regelung Stand 1, rein auf Basis des Laser-Liniensensors
R-40x1-A05	4,65	Einstellprozess Regelung Stand 2, rein auf Basis des Laser-Liniensensors
R-40x1-A06 bis -A08	0	Einstellprozess Regelung Stand 3, rein auf Basis des Laser-Liniensensors
R-40x1-A09 bis -A11	0	Regelung Stand 3 unter Berücksichtigung aller Eingangsgrößen
R-40x1-A12	0	Geschwindigkeitserhöhung um 65%
R-40x1-A13	0	Geschwindigkeitserhöhung um 130%
R-40x1-A14	10,31	Auswertung der Dorn-Eingangsgröße, faltenbehaftete Biegung ohne Aktivierung der Regelung
R-40x1-A15	0 (mit leichten Wellen)	Regelung Stand 3, rein auf Basis des Faltenglätters
R-40x08-B01	3,89	faltenbehaftete Referenzbiegungen ohne Umsetzung der Ausgangsgrößen an der Biegemaschine
R-40x08-B02	0	Regelung Stand 3 (Begrenzung des Gegenhalterverfahrwegs +1,2 mm)
R-40x08-B03	1,77	Regelung Stand 3 (Begrenzung des Gegenhalterverfahrwegs +1,35 mm)
R-40x08-B04	0	Regelung Stand 3 (Begrenzung des Gegenhalterverfahrwegs +1,35 mm)
R-40x2-C01	7,81	faltenbehaftete Referenzbiegungen ohne Umsetzung der Ausgangsgrößen an der Biegemaschine
R-40x2-C02	0	Regelung Stand 3 (Begrenzung des Gegenhalterverfahrwegs +1 mm)
R-40x2-C03	0	Regelung Stand 3 (Begrenzung des Gegenhalterverfahrwegs +1 mm)
R-40x2-C04	0 (mit leichten Wellen)	Regelung Stand 3 (Begrenzung des Gegenhalterverfahrwegs +1 mm)

### 8.3.1 Iterativer Einstellprozess

In praktischen Biegeversuchen wurden faltenbehaftete Rohrbögen produziert. Gebogen wurden Rohre aus dem Werkstoff X5CrNi18-10 (Werkstoffnummer 1.4301) mit einem Außendurchmesser von 40 mm, einer Wanddicke von 1 mm und einem Biegeradius von 60 mm. Die Ausgangsgrößen des Fuzzy-Reglers wurden zunächst dokumentiert und ausgewertet, ohne sie an der Maschinenachse umzusetzen. Dies ermöglichte die Untersuchung des Reglerverhaltens bei unterschiedlichen Faltenhöhen. Abbildung 8.6 zeigt den Verlauf der drei Eingangsgrößen und der beiden Ausgangsgrößen bei Biegungen mit faltenbehafteten Rohrbögen. Der Fuzzy-Regler greift bei diesen Versuchen nicht in den Biegeprozess ein. Er wird durchlaufen und berechnet zu den eingehenden Messwerten die Ausgangsgrößen  $y_{s,Res1}$  und  $y_{s,Res2}$ .

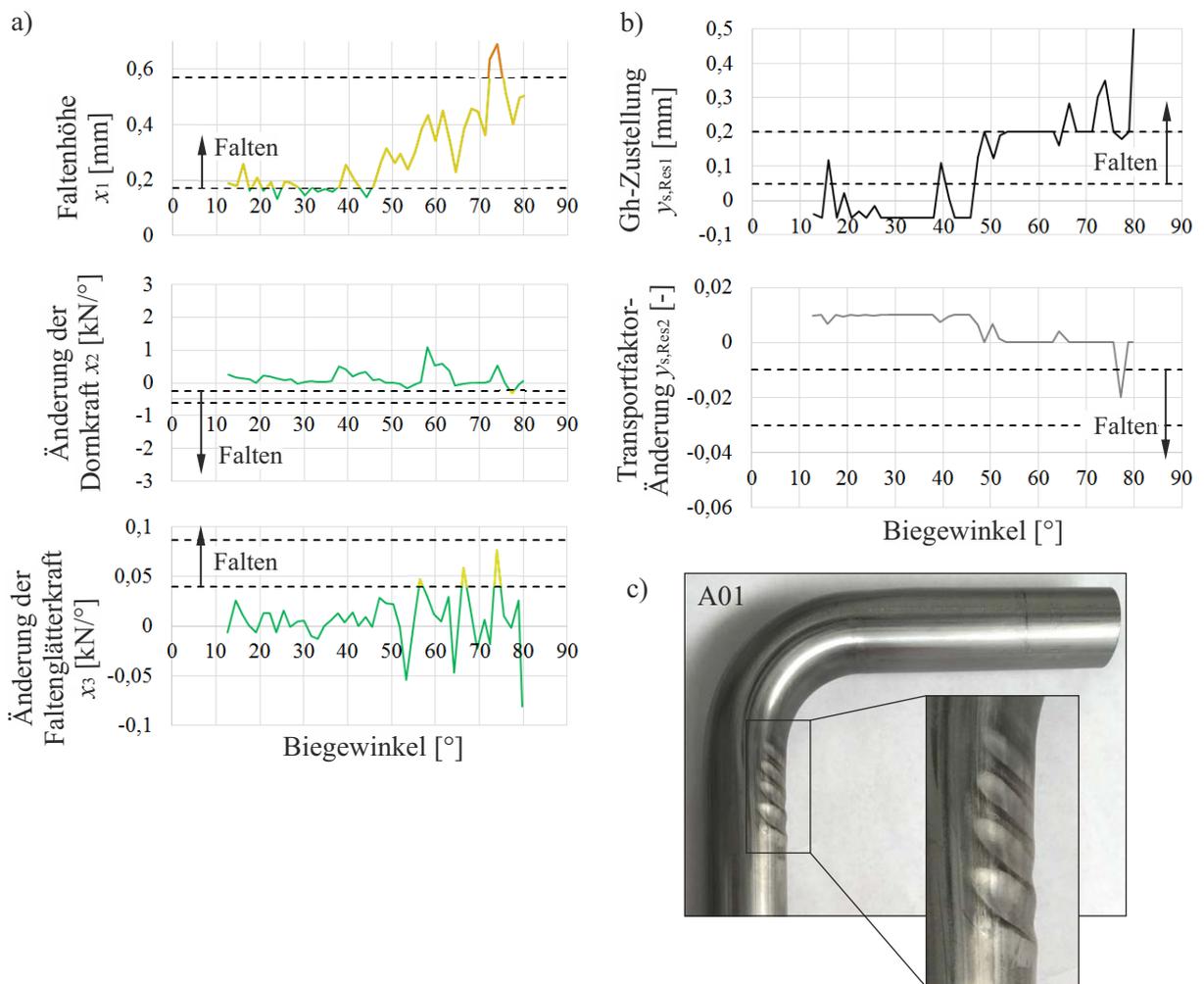


Abbildung 8.6: Darstellung des Verlaufs der a) Eingangs- und b) Ausgangsgrößen des Fuzzy-Reglers über den Verlauf des Biegewinkels für die Probe R-40x1-A01 ohne Umsetzung der Ausgangsgrößen an der Maschine. c) Abbildung des Biegeergebnisses mit Primärfalten.

Die untersuchte Biegung zeigt einen zunehmenden Verlauf der Faltenhöhe ab einem Biege-  
winkel von  $37^\circ$ , siehe Abbildung 8.6 a). Der Verlauf der Dornkraftänderung liegt in ei-  
nem Bereich, der keine Falten anzeigt. Der Verlauf der Kraftänderung des Faltenglätters  
detektiert Falten ab einem Biege Winkel von  $57^\circ$ . Die durch den Fuzzy-Regler berech-  
neten Ausgangsgrößen sind in Abbildung 8.6 b) dargestellt. Die Gegenhalterzustellung  
 $\Delta s_{\text{Gh}} = y_{\text{s,Res1}}$  zeigt einen steigenden Verlauf. Dieser entspricht dem erwarteten Verlauf  
nach einem Abgleich mit den gemessenen Eingangsgrößen und den Produktionsregeln.  
Die Änderung der Transportgeschwindigkeit liegt weitgehend im unveränderten Bereich,  
da sie von der Dornkraftänderung dominiert wird, die hier keinen signifikanten Verlauf  
für Falten anzeigt.

Praktische Biegeversuche wurden anschließend mit aktiviertem Fuzzy-Regler durchge-  
führt, sodass die berechneten Ausgangsgrößen  $y_{\text{s,Res1}}$  an der Gegenhalterachse umgesetzt  
wurden. Die Biegeergebnisse wiesen kleinere Falten auf. Änderungsiterationen wurden an  
dem Programm des Reglers (Stand 1) durchgeführt, siehe Tabelle 8.2. Damit der Gegen-  
halter sich in der faltenfreien Anfangsphase der Biegung nicht zu weit vom Rohr entfernte  
und immer ein ausreichender Kontakt gegeben war, konnte die Position minimal der Start-  
position entsprechen (Regelung Stand 2). Bei der Startposition  $s_{\text{Gh}} = 0 \text{ mm}$  wurde der  
Gegenhalter auf Kontakt zum Rohr gefahren ( $F_{\text{GhN}} > 0 \text{ kN}$ , hier  $F_{\text{GhN}} = 10 \text{ kN}$ ). In  
weiteren Iterationen wurden die Übertragungsfrequenz des Soll-Wertes an das elektrische  
Ventil der Hydraulikachse und die Verfahrgeschwindigkeit variiert. Ein Kompromiss aus  
einer möglichst schnellen Umsetzung ohne Aufschwingen der Maschinenachse konnte in  
der Regelung Stand 3 gefunden werden, siehe auch Abschnitt 8.2.

Bei den im Folgenden beschriebenen Versuchsergebnissen mit aktiviertem Fuzzy-Regler  
(Regelung Stand 3) und Umsetzung der Ausgangsgrößen  $y_{\text{s,Res1}}$  an der Biegemaschine  
wurde das Programm des Fuzzy-Reglers nicht mehr verändert.

### 8.3.2 Rohrbögen mit einem Wanddickenfaktor von $W = 40$

Bei Rohrbögen aus dem Werkstoff X5CrNi18-10 (Werkstoffnummer 1.4301) mit einem Außendurchmesser von 40 mm, einer Wanddicke von 1 mm und einem Biegeradius von 60 mm wurde die Gegenhalterachse aktiv entsprechend der Ausgangsgrößen des Fuzzy-Reglers zu- und abgestellt. Abbildung 8.7 zeigt auf der linken Seite die Eingangsgrößen und auf der rechten Seite die Ausgangsgrößen über den Biegewinkel. Die Faltenhöhe als Eingangsgröße aus dem Laser-Liniensensor weist abwechselnd kurzzeitig Falten auf und kehrt wieder in den faltenfreien Bereich zurück. Die Verläufe der Kraftänderungen zeigen keine Falten an. Der Verlauf der Gegenhalterzustellung entspricht dem Verlauf der Faltenhöhe. Der Gegenhalter wird wiederholt um einen kleinen Betrag vorgefahren, bleibt dann wieder stehen oder fährt leicht auf.

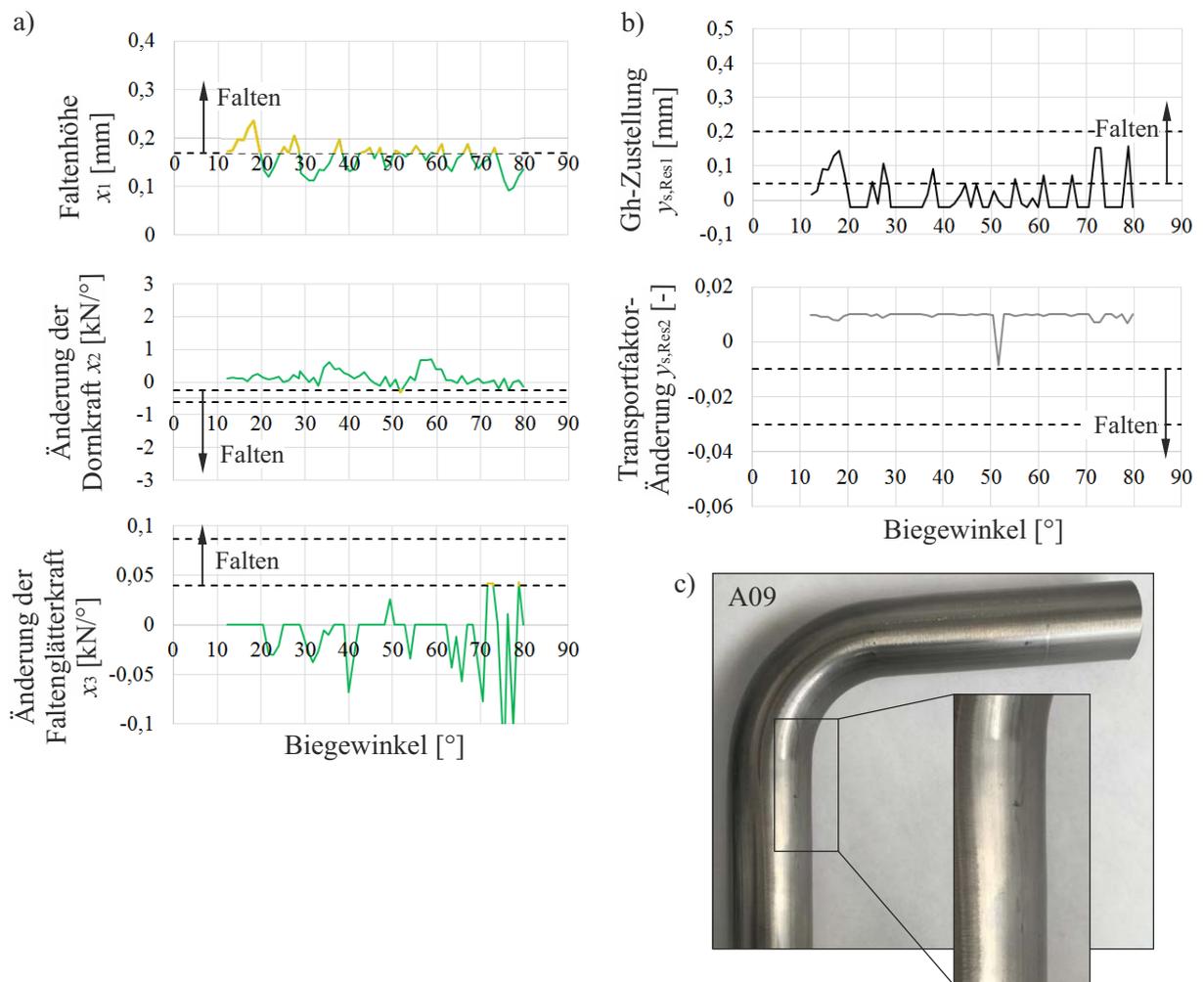


Abbildung 8.7: Darstellung des Verlaufs der a) Eingangs- und b) Ausgangsgrößen des Fuzzy-Reglers über den Verlauf des Biegewinkels für die Probe R-40x1-A09 inklusive Umsetzung der Ausgangsgrößen an der Maschine. c) Abbildung des faltenfreien Rohrbogens als Biegeergebnis.

Abbildung 8.8 zeigt den Verlauf des Gegenhalterverfahrenswegs, angefangen bei der Startposition  $s_{Gh} = 0$  mm. Der Gegenhalter fährt bei Faltdetektion auf das Rohr zu. Werden keine Falten erfasst, entlastet der Gegenhalter in kleineren Wegschritten. Die Gegenhalterposition pendelte sich bei einer für die Biegung geeigneten Position von  $s_{Gh} = 0,6$  mm ein. Unterhalb dieses Wertes kommt es zur Faltenbildung. Oberhalb dieses Wertes entstehen unnötig hohe Werkzeugkräfte. Dies kann zu erhöhtem Werkzeugverschleiß insbesondere am Faltenglätter und am Dorn führen und birgt eine erhöhte Gefahr der Rissbildung.

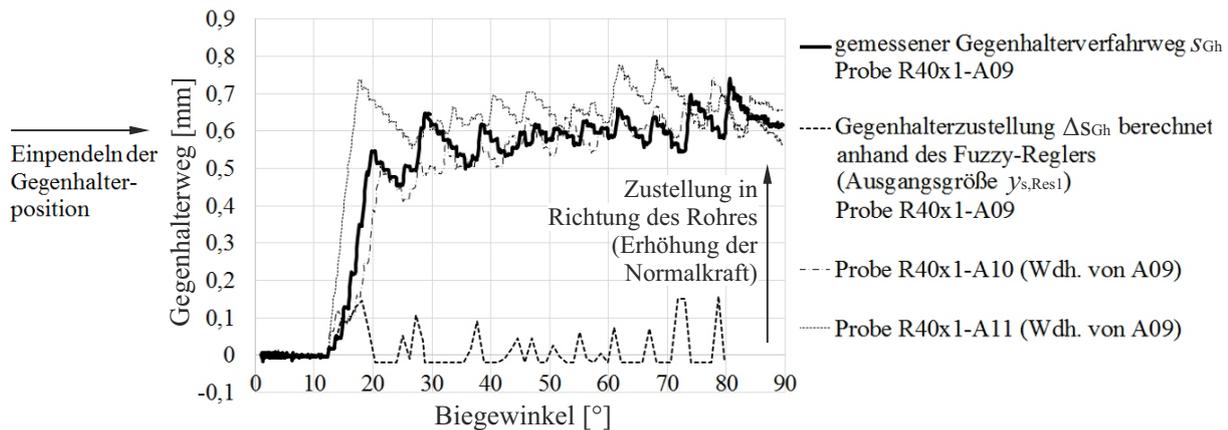


Abbildung 8.8: Verläufe des Gegenhalterwegs  $s_{Gh}$  und der Gegenhalterzustellung  $\Delta s_{Gh}$  der Probe R-40x1-A09. Verläufe des Gegenhalterwegs  $s_{Gh}$  der Proben R-40x1-A10 und -A11. Die Gegenhalterposition pendelt sich auf einem geeigneten Wert ein, sodass eine Balance zwischen zu hohen Gegenhalternormalkräften und der Bildung von Falten gefunden werden kann.

Die Biegeschwindigkeit betrug durchschnittlich  $1,5^\circ/\text{s}$ . Eine Erhöhung der Geschwindigkeit um 65 % und 130 % ergab ebenfalls faltenfreie Rohrbögen. Die Verläufe der Gegenhalterposition sind ebenfalls in Abbildung 8.8 dargestellt.

### 8.3.3 Einzelbetrachtung der Eingangsgrößen

Um die Einflüsse der Eingangsgrößen getrennt voneinander untersuchen zu können, wurden Biegeversuche durchgeführt, bei denen die Berechnung der Ausgangsgrößen jeweils mit nur einer Eingangsgröße erfolgte. Die Biegeaufgabe entsprach der im vorherigen Kapitel beschriebenen. Die Primärfalten der vergleichsweise dünnwandigen Rohrbögen ( $W = 40$ ) werden von dem Laser-Liniensensor früh detektiert. Wird die vom Laser-Liniensensor gemessene Faltenhöhe ausschließlich zur Berechnung der Ausgangsgröße herangezogen, können faltenfreie Rohrbögen produziert werden. Abbildung 8.9 zeigt die Verläufe der Reglergrößen.

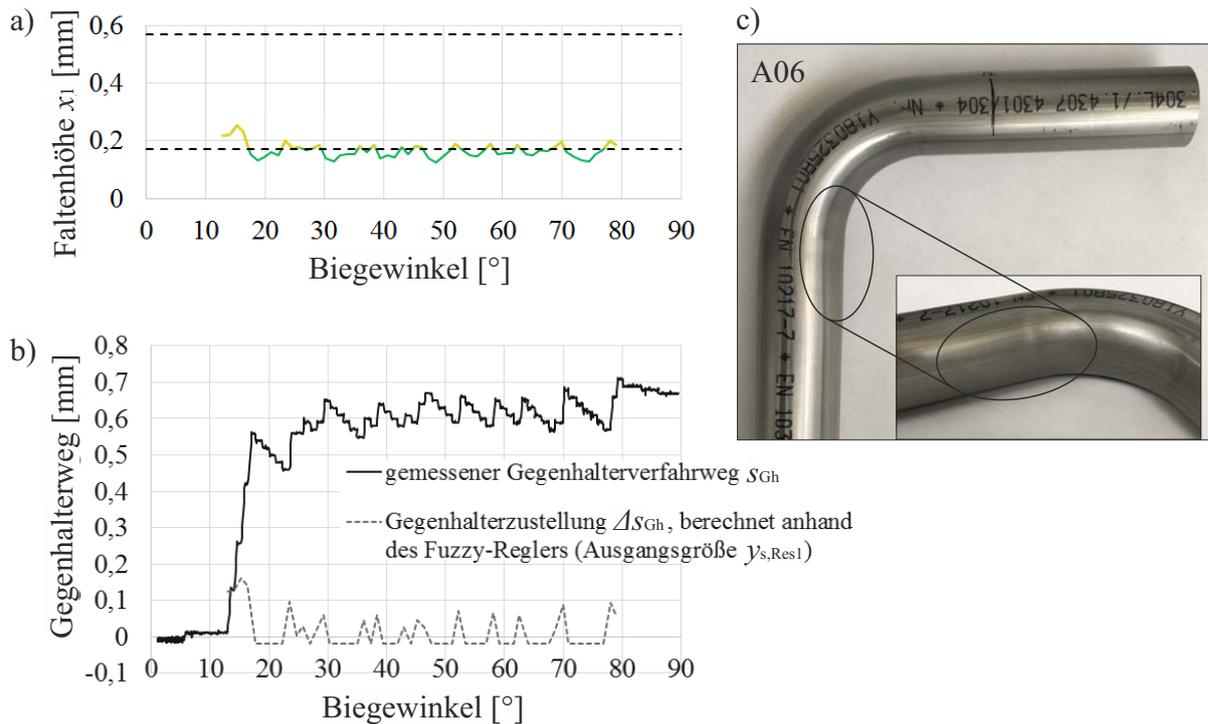


Abbildung 8.9: a) Verlauf der Eingangsgröße Faltenhöhe  $x_1$  bei der Biegung R-40x1-A06. Zur Betrachtung des Einflusses der Eingangsgröße  $x_1$  wurden die Eingangsgrößen  $x_2$  und  $x_3$  bei den Biegungen R40x1-A06 bis -A08 unterdrückt. b) Zugehöriger Verlauf des gemessenen Gegenhalterverfahrwegs  $s_{Gh}$  und der durch den Fuzzy-Regler berechneten Gegenhalterzustellung  $\Delta s_{Gh} = y_{s,Res1}$ . c) Abbildung des faltenfreien Rohres als Biegeergebnis.

Der Kraftverlauf des Faltenglätters weist in Abbildung 8.6 erst bei größeren Falten signifikante Kraftspitzen auf. Abbildung 8.10 zeigt das Biegeergebnis, wenn ausschließlich die gemessene Faltenglätternormalkraft zur Berechnung der Ausgangsgrößen eingesetzt wird. Die Gegenhalterzustellung wurde ab einem Biegewinkel von  $38^\circ$  zugestellt und damit später, als es unter Aktivierung des Laser-Liniensensors der Fall war. Im weiteren Verlauf wurde der Gegenhalter zugestellt, wenn eine Falte einen Kraftanstieg an dem Faltenglättern verursachte. Die Falten müssen zur indirekten Detektion durch den Kraftsensor eine gewisse Größe erreicht haben. Dadurch kann es zu irreversiblen Falten kommen. In Abbildung 8.10 c) ist das Biegeergebnis dargestellt, welches leichte Wellen aufweist. Die Wellen entstehen, wenn während des Biegeprozesses wiederholt Falten entstehen und die Rohrkontur anschließend wieder in ihren glatten Ausgangszustand zurückgedrückt wird. Der Faltenbewertungsfaktor beträgt bei diesem Rohrbogen  $\Omega = 0$ , da die leichten Wellen zwar sichtbar, aber kaum fühlbar sind. Faltenkonturen, die eine Steigung von  $0,1$  rad unterschreiten, werden von dem Faltenbewertungsfaktor nicht gewertet, siehe Unterabschnitt 2.1.4. Der Toleranzwert für die bewertete Faltenhöhe und für den Bewertungsfaktor ist abhängig von der Wellenlänge der Faltenkontur. Eine Kontur, die über eine Länge von  $10$  mm auf eine Faltenhöhe von  $1$  mm ansteigt, gilt als faltenfrei. Die Ermittlung der Grenzsteigung von  $0,1$  rad ist in Unterabschnitt 2.1.4 beschrieben.

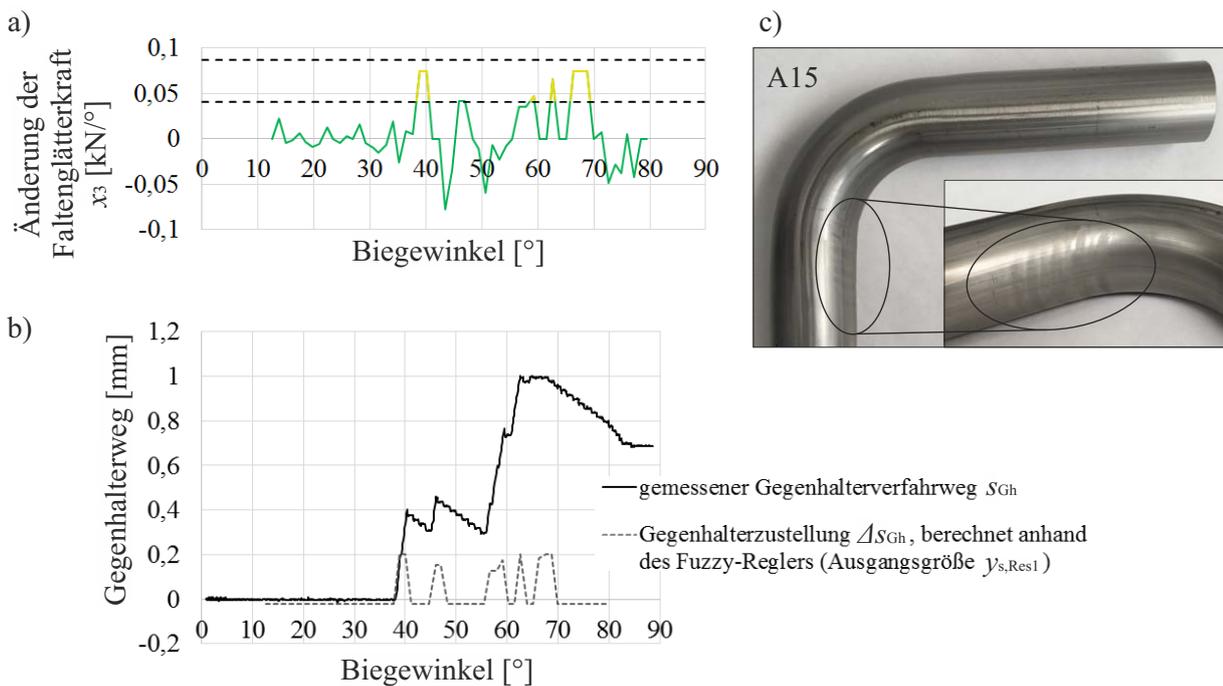


Abbildung 8.10: a) Verlauf der Eingangsgröße Änderung der Faltenglätterkraft  $x_3$  bei der Biegung R-40x1-A15. Zur Betrachtung des Einflusses der Eingangsgröße  $x_3$  wurden die Eingangsgrößen  $x_1$  und  $x_2$  bei der Biegung R40x1-A15 unterdrückt. b) Zugehöriger Verlauf des gemessenen Gegenhalterverfahrwegs  $s_{Gh}$  und der durch den Fuzzy-Regler berechneten Gegenhalterzustellung  $\Delta s_{Gh} = y_{s,Res1}$ . c) Abbildung des Biegeergebnisses mit einem Faltenbewertungsfaktor von  $\Omega = 0$  und leichten Wellen.

Die Faltenglätternormalkraft bekam im Rahmen des iterativen Einstellprozesses des Reglers einen Filter. Der gefilterte und ungefilterte Normalkraftverlauf des Faltenglätters sind in Abbildung 8.11 der Zustellung des Gegenhalters gegenübergestellt. Wird der Gegenhalter in Richtung des Rohres zugestellt, reagiert der Kraftverlauf am Faltenglätter mit einer Sprungantwort. Es stellt sich zeitverzögert ein großer Kraftanstieg und darauffolgend ein Kraftabfall ein, bis die Kraft wieder konstant verläuft. Diese Sprungantwort auf die Zustellung des Gegenhalters wurde aus dem Verlauf der Faltenglätternormalkraft herausgefiltert. Direkt nach Zustellen des Gegenhalters wird die Eingangsgröße  $x_3$  für 15 Ausgangswerte unterdrückt. Zudem darf die Differenz zwischen zwei Kraftänderungswerten den Wert  $0,08 \text{ kN}/^\circ$  nicht überschreiten, um ungewollte plötzliche Zustellungen zu vermeiden. Dadurch konnte gewährleistet werden, dass ein Kraftanstieg durch eine Falte und nicht durch Änderung der Gegenhalterposition verursacht wurde. Die Eingangsgröße  $x_3$  dominierte bei den in Unterabschnitt 8.3.5 beschriebenen dickwandigeren Rohrbögen.

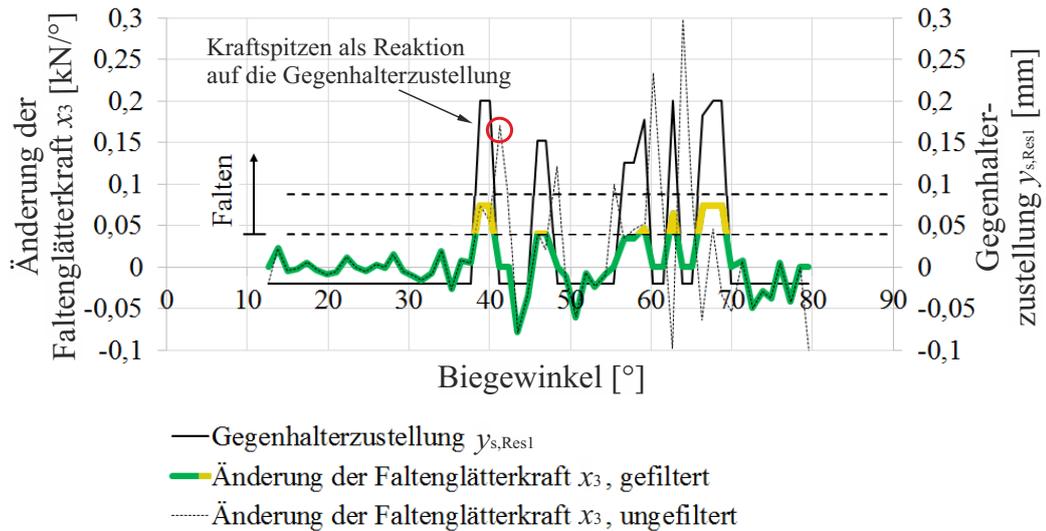


Abbildung 8.11: Wechselwirkungen zwischen der Änderung der Faltenklärernormalkraft und der Gegenhalterzustellung. Ein Filter gewährleistet, dass Kraftänderungen aufgrund von Werkzeugbewegungen nicht in den Fuzzy-Regler einfließen.

Um den Einfluss der Dornkraft auf das Reglerverhalten zu untersuchen, wurde ein Rohrbogen mit großen Falten im Bogenbereich hergestellt, siehe Abbildung 8.12. Die Reglergrößen wurden aufgezeichnet, ohne die Ausgangsgrößen an der Maschine umzusetzen.

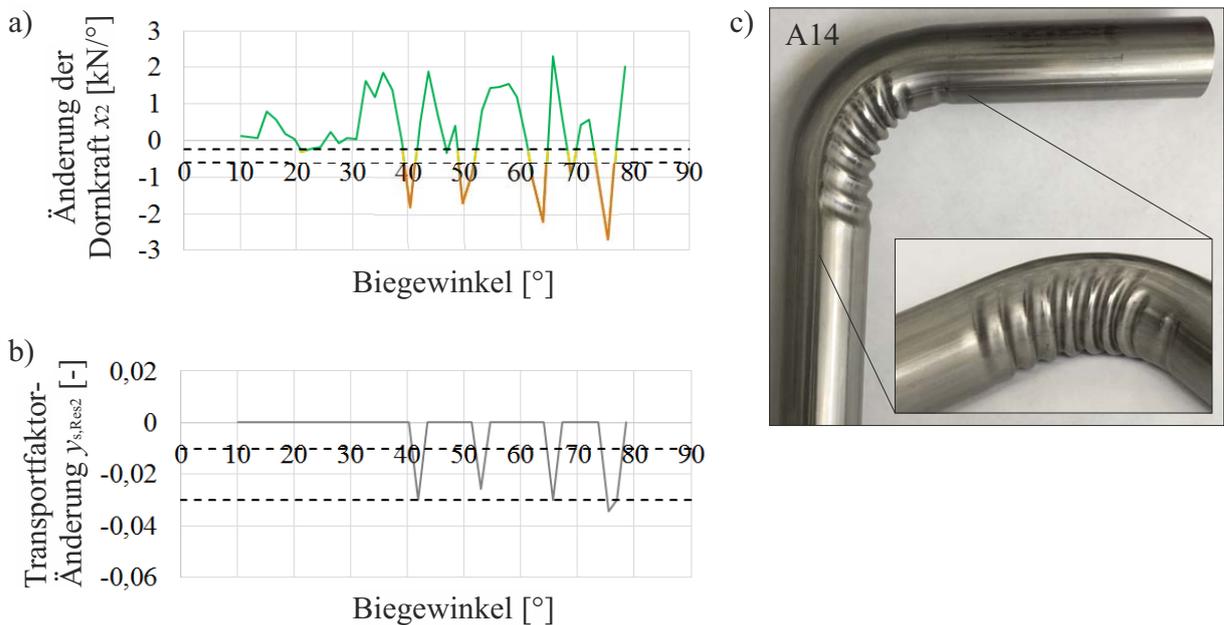


Abbildung 8.12: a) Verlauf der Eingangsgröße Änderung der Dorn-Längskraft  $x_2$  bei der Biegung R-40x1-A14. b) Verlauf der vom Fuzzy-Regler berechneten Änderung der Transportgeschwindigkeit  $\Delta f_{v,Tr} = y_{s,Res2}$ . Eine Verringerung der Transportgeschwindigkeit wird ausgelöst. c) Abbildung des Biegeergebnisses mit einem Bewertungsfaktor von  $\Omega = 10, 31 \cdot 10^{-3}$  und großen Falten im Bogenbereich.

Der Verlauf der Längskraftänderung am Dorn weist ab einem Biegewinkel von  $39^\circ$  Kraftabfälle auf, die für Falten signifikant sind. Dies lässt die Annahme zu, dass sich zu diesem Zeitpunkt die Falten in den Bogenbereich geschoben haben, die zuvor im geraden Rohrbereich entstanden sind. Die Dorn-Längskraft detektiert die Falten im Bogenbereich und beeinflusst die Transportgeschwindigkeit als Ausgangsgröße. Abbildung 8.12 zeigt, dass die Transportgeschwindigkeit mit jedem Faltenignal der Dornkraft reduziert wird, sodass den Falten durch überlagerte Zugspannungen entgegengewirkt werden kann.

### 8.3.4 Rohrbögen mit einem Wanddickenfaktor von $W = 50$

Praktische Biegeversuche wurden an Rohren aus dem Werkstoff X5CrNi18-10 (Werkstoffnummer 1.4301) mit einem Außendurchmesser von 40 mm, einer Wanddicke von 0,8 mm und einem Biegeradius von 60 mm durchgeführt. In Abbildung 8.13 ist ein faltenbehafteter Rohrbogen dargestellt, bei dem die Reglergrößen aufgezeichnet, die Ausgangsgrößen aber nicht umgesetzt wurden.

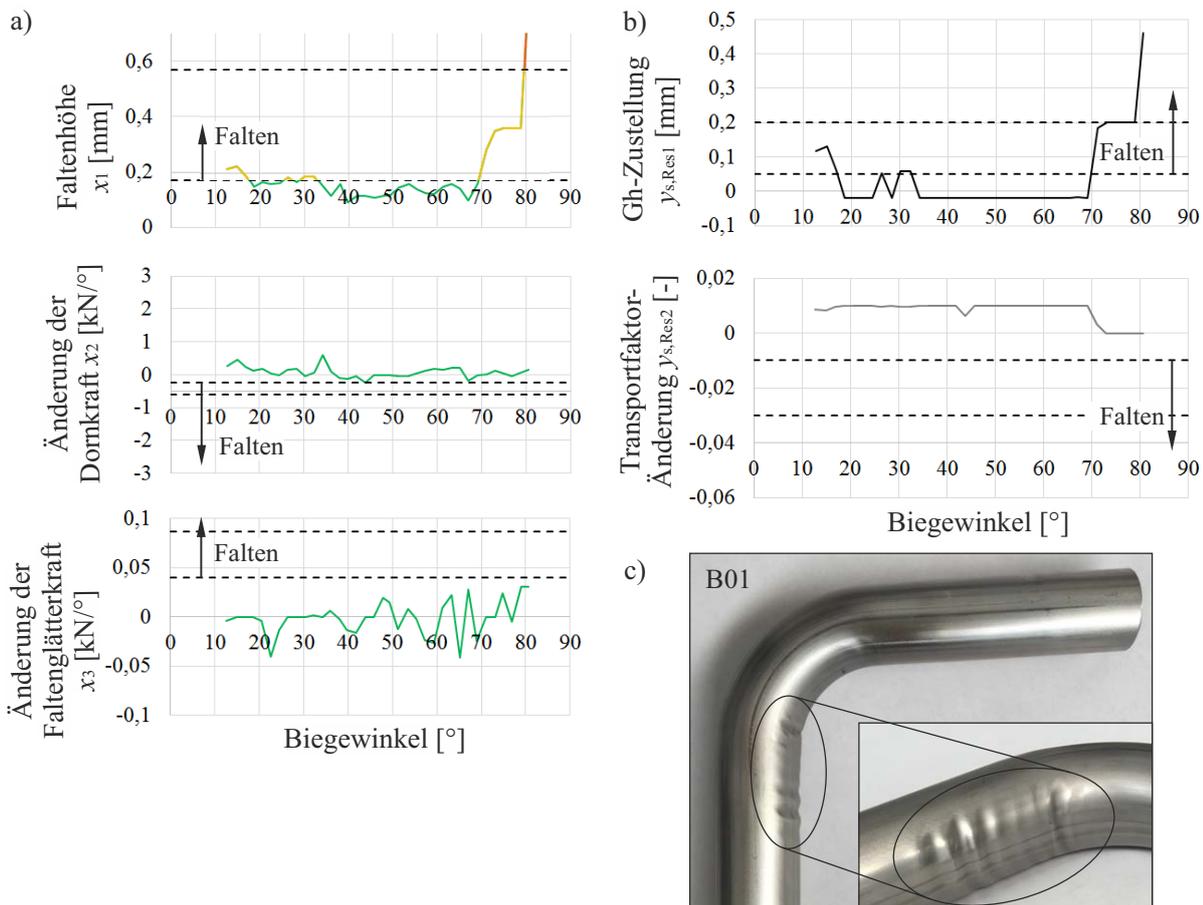


Abbildung 8.13: Darstellung des Verlaufs der a) Eingangs- und b) Ausgangsgrößen des Fuzzy-Reglers über den Verlauf des Biegewinkels für die Probe R-40x08-B01 ohne Umsetzung der Ausgangsgrößen an der Maschine. c) Abbildung des faltenbehafteten Rohrbogens mit einem Faltenbewertungsfaktor von  $\Omega = 3,89 \cdot 10^{-3}$ .

Der Regler entsprach dem in Unterabschnitt 8.3.2 eingesetzten Regler, ohne Einstellungsänderungen. Die Faltenhöhe als Eingangsgröße erfasste am Biegeanfang kleine Falten. Ab einem Biegewinkel von  $71^\circ$  wurden schlagartig große Falten detektiert. Ein Umsetzen der Ausgangsgrößen an der Gegenhalterachse führte zu einer in Abbildung 8.14 dargestellten Verbesserung der Rohrbogenqualität. Aufgrund der unzureichend vorhersagbaren Instabilität der Rohrwand, waren die Verläufe des Gegenhalterverfahrens  $s_{Gh}$  bei drei aufeinanderfolgenden Wiederholungen mit gleichen Einstellungen unterschiedlich.

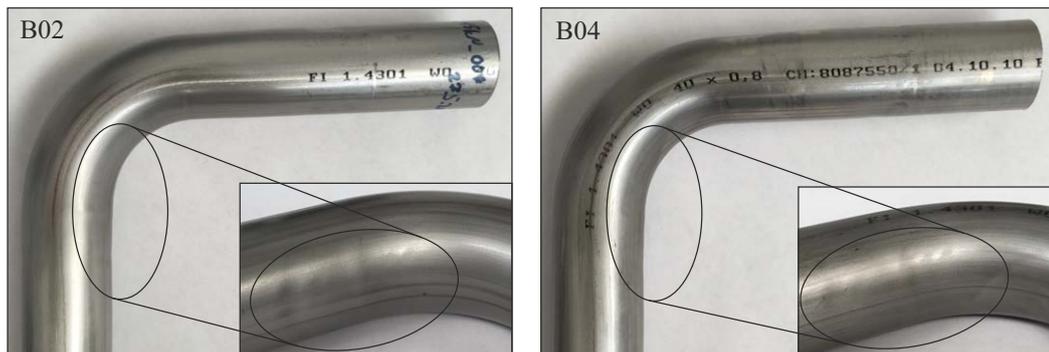
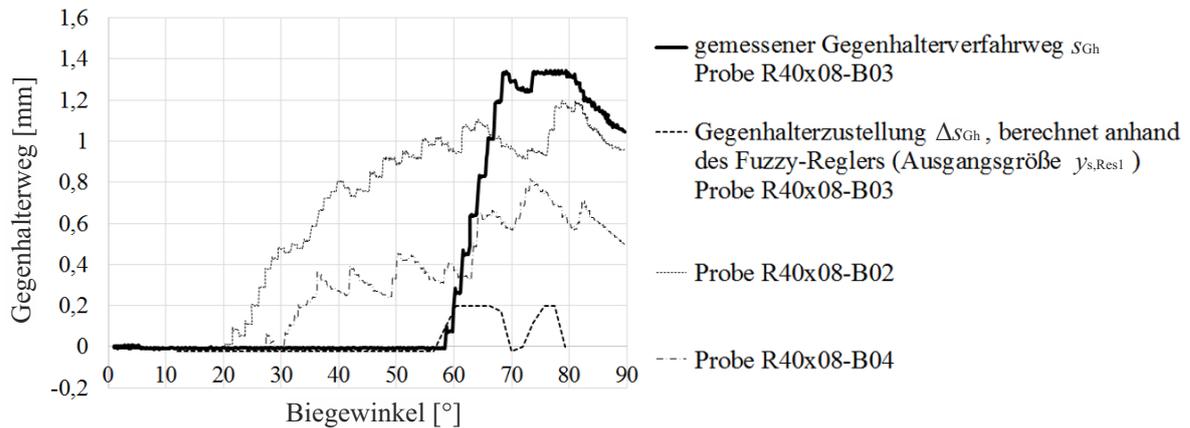


Abbildung 8.14: Verläufe des gemessenen Gegenhalterverfahrens  $s_{Gh}$  und der durch den Fuzzy-Regler berechneten Gegenhalterzustellung  $\Delta s_{Gh} = y_{s,Res1}$  für die Proben R-40x08-B02 bis -B04.

Die dünnwandigen Rohre ( $W = 50$ ) können sowohl langsam kleine Falten als auch schlagartig große Falten bilden. Bei den Proben R-40x08-B02 und R-40x08-B04 sind keine ausgeprägten Falten ( $\Omega = 0$ ), dafür aber wellenförmige Schlieren auf den Rohroberflächen zu erkennen. Der Gegenhalter wurde langsam zugestellt. Bei der Probe R-40x08-B03 weist der Verlauf des Gegenhalterverfahrens ab einem Biegewinkel von  $59^\circ$  einen steilen Anstieg auf. Die Falten des Endzustandes ( $\Omega = 1,77 \cdot 10^{-3}$ ) sind kleiner als die Falten der Biegung ohne Regler ( $\Omega = 3,89 \cdot 10^{-3}$ ).

In Abbildung 8.15 sind die Verläufe der Reglergrößen bei Probe R-40x08-B03 aufgeführt. Ab einem Biegewinkel von  $57^\circ$  werden Falten von dem Laser-Liniensensor erfasst. Der Verlauf der Kraftänderung am Faltenglättter weist annähernd keine Faltenanzeigen auf.

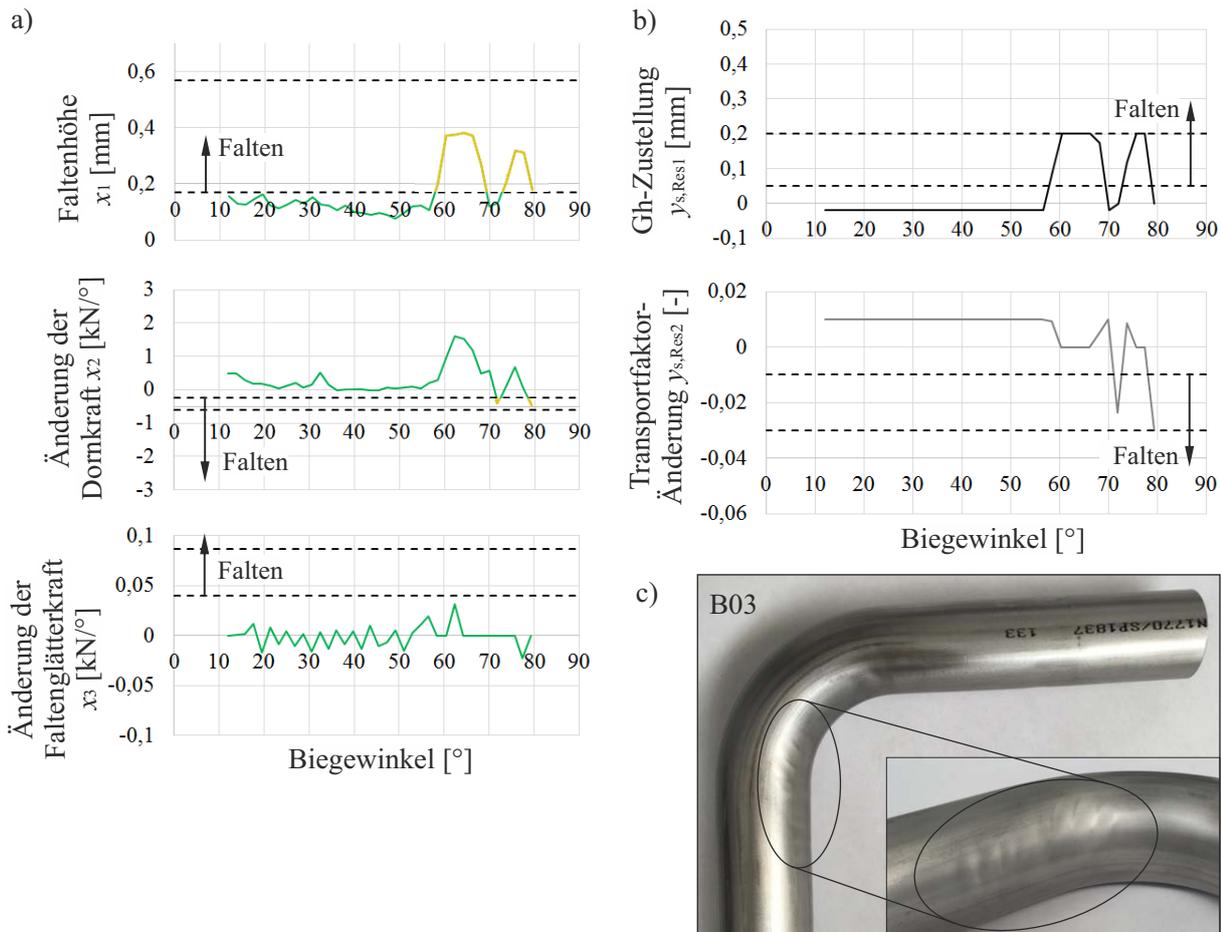


Abbildung 8.15: Darstellung des Verlaufs der a) Eingangs- und b) Ausgangsgrößen des Fuzzy-Reglers über den Verlauf des Biegewinkels für die Probe R-40x08-B03 inklusive Umsetzung der Ausgangsgrößen an der Maschine. c) Abbildung des faltenfreien Rohrbogens mit sichtbaren, leichten Schlieren als Biegeergebnis.

In der Dornkraftänderung sind ab einem Biegewinkel von  $72^\circ$  faltensignifikante Schwankungen zu sehen. Entsprechend der Eingangsgrößen reagieren die Ausgangsgrößen der Gegenhalter- und der Transportachse auf die Falten.

### 8.3.5 Rohrbögen mit einem Wanddickenfaktor von $W = 20$

Rohre aus dem Werkstoff X5CrNi18-10 (Werkstoffnummer 1.4301) mit einem Außendurchmesser von 40 mm, einer Wanddicke von 2 mm und einem Biegeradius von 60 mm wurden unter Einsatz des Fuzzy-Reglers gebogen. Der Regler entsprach dem in Unterabschnitt 8.3.2 und 8.3.4 eingesetzten Regler ohne Einstellungsänderungen. Abbildung 8.16 zeigt das Biegeergebnis unter Aufzeichnung der Reglergrößen ohne die Gegenhalterachse aktiv zu beeinflussen. Die Falten dieser dickwandigen Rohrbögen entstehen in der Übergangsebene zwischen geradem und gebogenem Rohrbereich. Das Ausbeulen der Rohrwand

löst bei den Biegewinkeln  $44^\circ$  und  $59^\circ$  eine Reaktion an der Faltenglätternormalkraft aus. Die Dornkraft zeigt bei Biegewinkeln von  $73^\circ$  faltensignifikante Verläufe. Wie der Verlauf der Faltenhöhe zeigt, ragen die Falten ab einem Biegewinkel von  $56^\circ$  kurzzeitig in den Sichtbereich des Laser-Liniensensors hinein und sind erst ab einem Biegewinkel von  $68^\circ$  durchgängig sichtbar. Entsprechend der Eingangsgrößen wurden die Ausgangsgrößen durch den Fuzzy-Regler berechnet. Die Faltenglätternormalkraft dominiert bei der Berechnung der Gegenhalterzustellung. Die Dornkraft beeinflusst maßgeblich die Berechnung der Geschwindigkeitsänderung an der Transportachse.

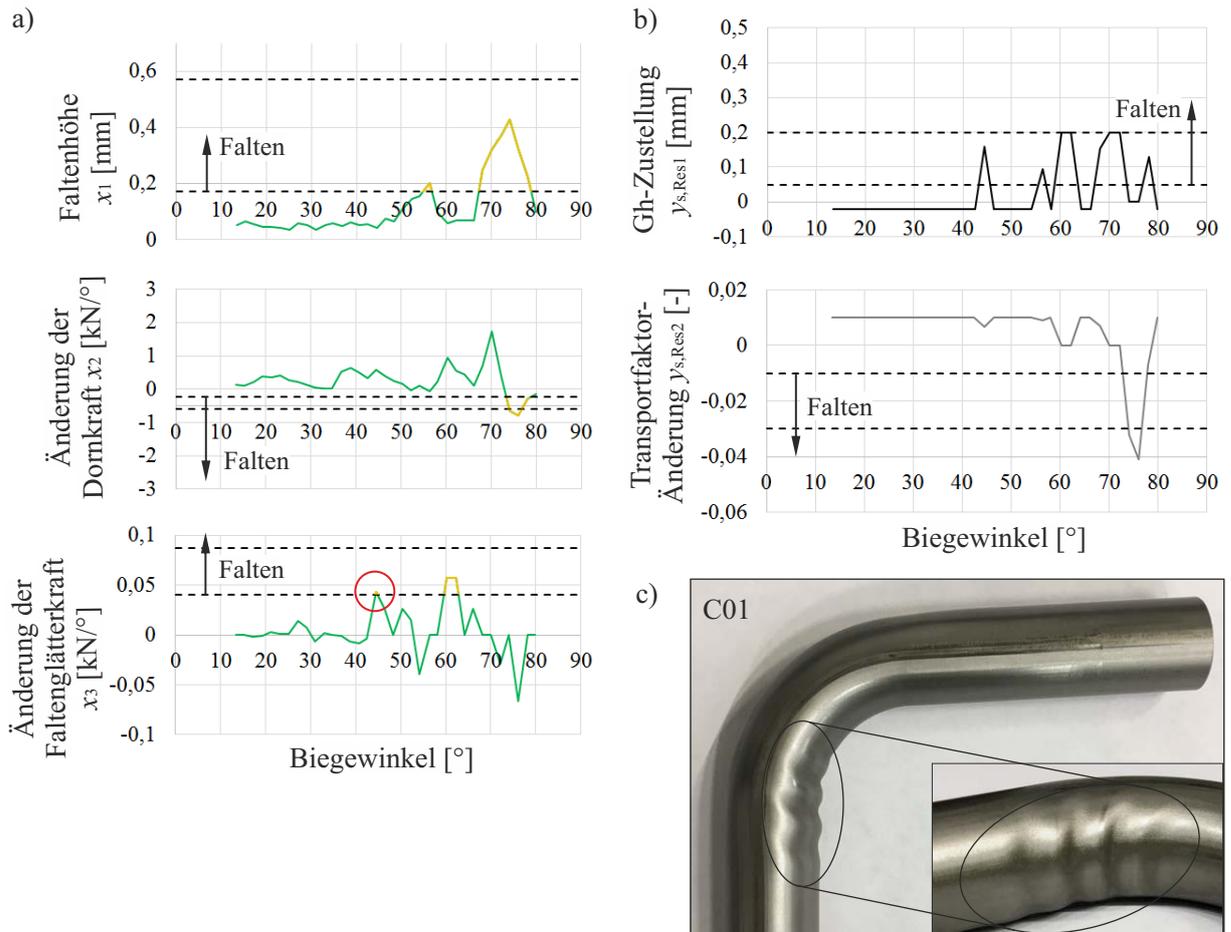


Abbildung 8.16: Darstellung des Verlaufs der a) Eingangs- und b) Ausgangsgrößen des Fuzzy-Reglers über den Verlauf des Biegewinkels für die Probe R-40x2-C01 ohne Umsetzung der Ausgangsgrößen an der Maschine. c) Abbildung des faltenbehafteten Rohrbogens mit einem Faltenbewertungsfaktor von  $\Omega = 7,81 \cdot 10^{-3}$ .

Die in Abbildung 8.17 dargestellten Biegeergebnisse wurden durch das Eingreifen des Fuzzy-Reglers in den Prozess erzielt. Die Verläufe der Gegenhalterpositionen sind bei gleichen Einstellungen und drei aufeinanderfolgenden Wiederholungen unterschiedlich. Die Faltenbildung als Instabilität kann unterschiedliche Startzeitpunkte und Ausprägungen haben. Der Fuzzy-Regler konnte auf die Gegebenheiten reagieren. Bei der Probe R-40x2-C03 erfolgt eine fortschreitende Zustellung ab einem Biegewinkel von  $25^\circ$ . Bei den

Proben R-40x2-C02 und R-40x2-C04 wird der Gegenhalter erst in der zweiten Biegehälfte deutlich zugestellt. Die Biegeergebnisse weisen faltenfreie Rohrbögen ( $\Omega = 0$ ) auf.

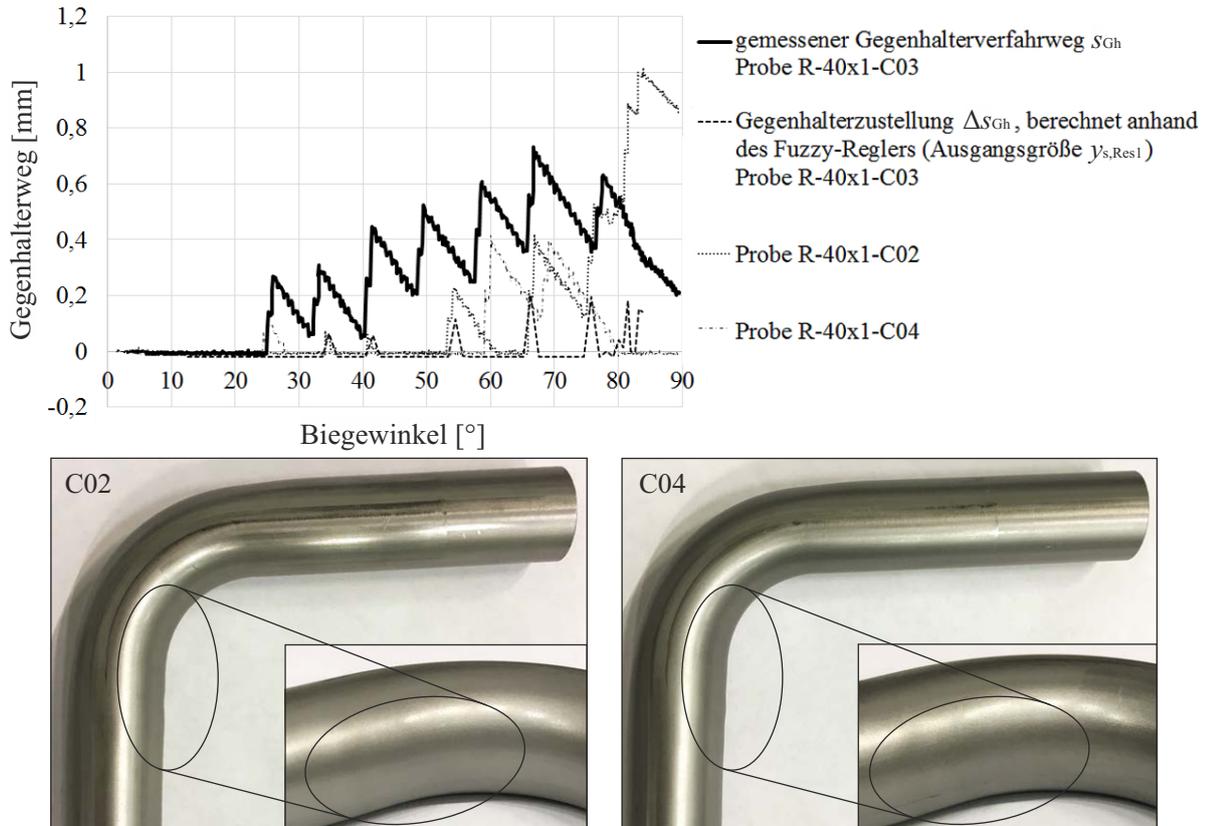


Abbildung 8.17: Verläufe des gemessenen Gegenhalterverfahrwegs  $s_{Gh}$  und der durch den Fuzzy-Regler berechneten Gegenhalterzustellung  $\Delta s_{Gh} = y_{s,Res1}$  für die Proben R-40x2-C02 bis -C04.

Es sind Intervalle zu erkennen, in denen die Gegenhalterzustellung erfolgt. Unter Betrachtung der Verläufe der Reglergrößen bei der Probe R-40x2-C03 dominiert die Eingangsgröße der Faltenglättternormalkraft bei der Faltendetektion, siehe Abbildung 8.18. Aufgrund des in Unterabschnitt 8.3.3 beschriebenen Filters liest das Reglerprogramm die Kraftänderungswerte des Faltenglättters aus, wenn der Gegenhalter steht. Nur dann kann der Faltenglättter als Eingangsgröße dienen, ohne dass eine Wechselwirkung zu dem sich bewegenden Gegenhalter besteht.

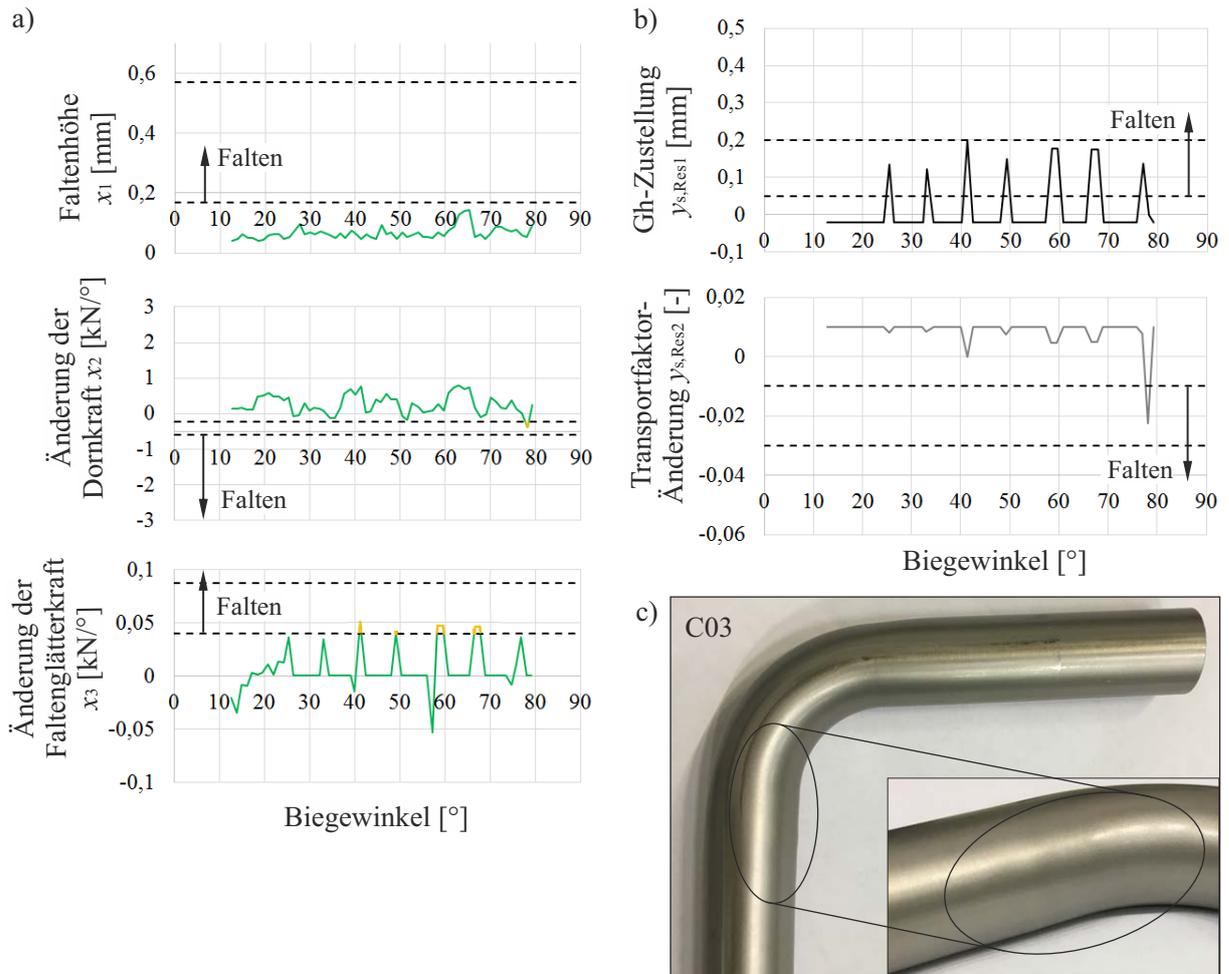


Abbildung 8.18: Darstellung des Verlaufs der a) Eingangs- und b) Ausgangsgrößen des Fuzzy-Reglers über den Verlauf des Biegewinkels für die Probe R-40x2-C03 inklusive Umsetzung der Ausgangsgrößen an der Maschine. c) Abbildung des faltenfreien Rohrbogens als Biegeergebnis.

Für die unter Einsatz des Fuzzy-Reglers gebogenen Rohre wurden Faltenbewertungsfaktoren von  $\Omega = 0$  ausgewertet. Flache, kaum sichtbare Oberflächenwellen waren bei Probe R-40x2-C04 zu ertasten. Aufgrund der großen Wellenlänge bei kleiner Faltenhöhe ( $\zeta_i < 0,1$ ) wurde die Kontur nicht von dem Bewertungsfaktor als Falte gewertet. Bei den Proben R-40x2-C02 und R-40x2-C03 blieb keine erkennbare Wellenkontur in der Rohroberfläche zurück.

### 8.3.6 Mehrfachbiegungen und Werkstoffvariation

Zur Untersuchung aufeinanderfolgender Biegungen in einem Bauteil wurden praktische Versuche mit Rohren aus dem Werkstoff X5CrNi18-10 (Werkstoffnummer 1.4301) mit einem Außendurchmesser von 40 mm, einer Wanddicke von 1 mm und einem Biegeradius

von 60 mm durchgeführt. Der Regler entsprach dem in den vorherigen Kapiteln eingesetzten Regler ohne Einstellungsänderungen. Die Einzelbögen wurden so nah aneinander platziert, wie es die Spannbackenlänge zuließ. Das Streuverhalten der Bögen bei einer möglichen Dehnungsüberlagerung zweier aufeinanderfolgender Bögen wurde untersucht. Es wurden abwechselnd Rechts- und Linksbiegungen durchgeführt, in dem das Rohr aus der Werkzeugebene heraus um 180° gedreht wurde, siehe Abbildung 8.19.

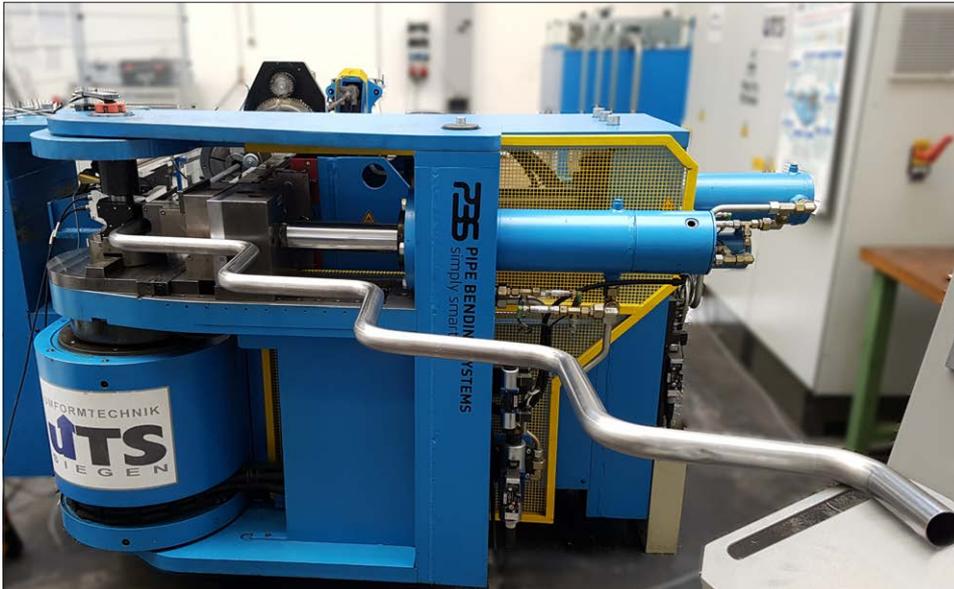


Abbildung 8.19: Mehrfachbiegungen rechts und links zur Untersuchung des Streuverhaltens bei möglicher Wechselwirkungen der Einzelbögen.

Der Gegenhalter nimmt das Biegemoment  $M_I$  auf, welches zur Umformung des Rohres benötigt wird. Das Rohr wird um die Biegeform gezogen. Dadurch verlagert sich das Rohr in Richtung des Gegenhalters und stützt sich dort ab. Die Verlagerung führt zu einer Verformung und damit zu einer Form- und Lageabweichung des Rohres außerhalb des Bogenbereichs, die einen Einfluss auf Folgebiegungen haben kann. Es wird vermutet, dass sich nach der ersten Biegung eine Form- und Lageabweichung entlang der Rohrlängsachse einstellt. Dadurch konnten bei der zweiten Biegung andere Kontaktbedingungen an dem Gegenhalter und dem Faltenglätter im Vergleich zu dem ersten Bogen vorliegen. Bei den folgenden Biegungen konnten ebenfalls variierende Kontaktbedingungen vorliegen, die das Biegeergebnis beeinflussten. Die Reaktion des Reglers auf Schwankungen durch Mehrfachbiegungen wurde untersucht. Die Verläufe des Gegenhalterverfahrenswegs  $s_{Gh}$  der Bögen sind in Abbildung 8.20 dargestellt.

Der Regler berechnete unterschiedliche Verläufe des Gegenhalterverfahrenswegs, die sich in drei Gruppen einteilen lassen. Bei den Einzelbögen Nr. 4 und 7 stellte sich ein Einpendelverhalten der Gegenhalterposition bei ca. 0,6 mm ein. Der Faltenstart wurde bei Biege-  
winkeln von 50° (Einzelbogen Nr. 4) und 14° (Einzelbogen Nr. 7) erfasst. Die Einzelbögen Nr. 3, 5 und 6 wiesen stellenweise Gegenhalterpositionen bis zu 1 mm auf. Falten wurden ab einem Biegewinkel von 53° (Einzelbogen Nr. 3), 46° (Einzelbogen Nr. 5) und 51° (Einzelbogen Nr. 6) erfasst.

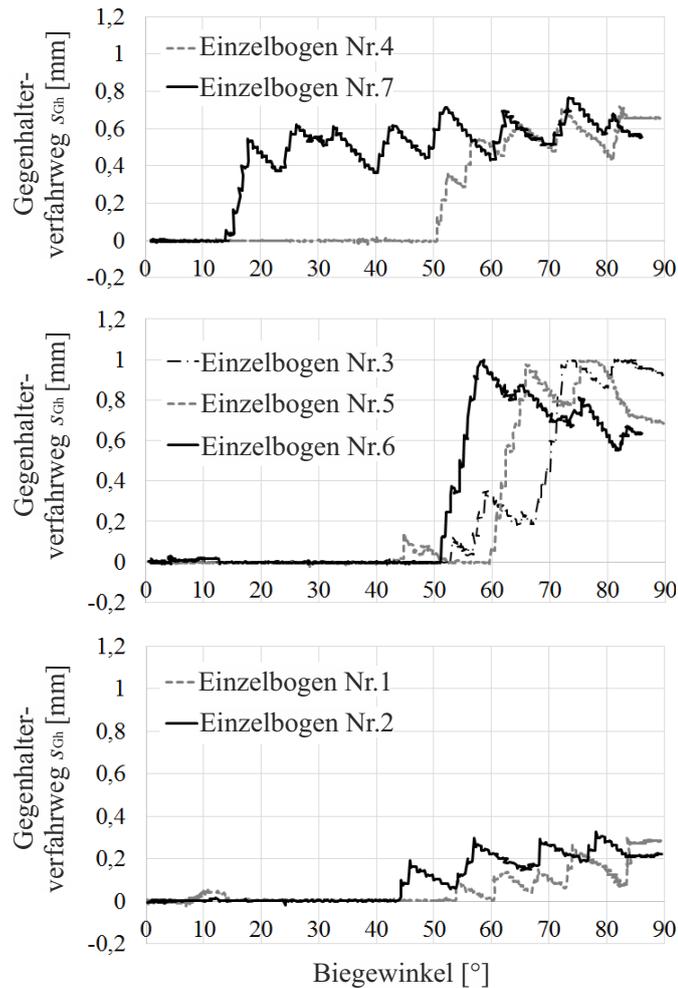


Abbildung 8.20: Die Verläufe des vom Regler berechneten Gegenhalterverfahrwegs  $s_{Gh}$  für sieben im Wechsel aufeinanderfolgende Rechts- und Linksbiegungen. Die Verläufe wurden subjektiv in drei Kategorien eingeteilt.

Die Einzelbögen Nr. 1 und Nr. 2 wiesen maximale Gegenhalterverfahrwege von 0,3 mm auf. Der Faltenstart der Einzelbögen lag bei  $54^\circ$  (Einzelbogen Nr. 1) und  $43^\circ$  (Einzelbogen Nr. 2), wobei kurzzeitig Falten um einen Biegewinkel von  $10^\circ$  detektiert wurden. Die Einzelbögen sind faltenfrei mit Faltenbewertungsfaktoren von  $\Omega = 0$ . Im Vergleich zu den Ergebnissen aus Unterabschnitt 8.3.2 stellt sich bei den Mehrfachbiegungen eine größere Streuung der Verläufe des Gegenhalterverfahrwegs ein. Die Startzeitpunkte der Falten sowie die maximalen Verfahrwege variierten in größerem Maße, vgl. Abbildung 8.8 und Abbildung 8.20. Bei zukünftigen Forschungsvorhaben zur Untersuchung der Einflussfaktoren der Faltenbildung können diese Untersuchungsergebnisse unterstützen.

Der Fuzzy-Regler wurde an Rohren aus Baustahl mit einem Außendurchmesser von 40 mm, einer Wanddicke von 1 mm und einem Biegeradius von 60 mm erprobt. Der Werkstoff hat eine Streckgrenze von  $R_{p0,2} = 397 \text{ N/mm}^2$ , eine Zugfestigkeit von  $R_m = 504 \text{ N/mm}^2$  und eine Gleichmaßdehnung von  $\varepsilon_{gl} = 19 \%$ . Ein Biegen des Halbzeuges ohne Regler ergab ein faltenbehaftetes Rohr mit einem Faltenbewertungsfaktor von  $\Omega = 1,6 \cdot 10^{-3}$ . Abbil-

Abbildung 8.21 zeigt die Verläufe des Gegenhalterverfahrenswegs  $s_{Gh}$  der Rohrbögen, die mit dem Biegeprozess eingreifendem Fuzzy-Regler hergestellt wurden.

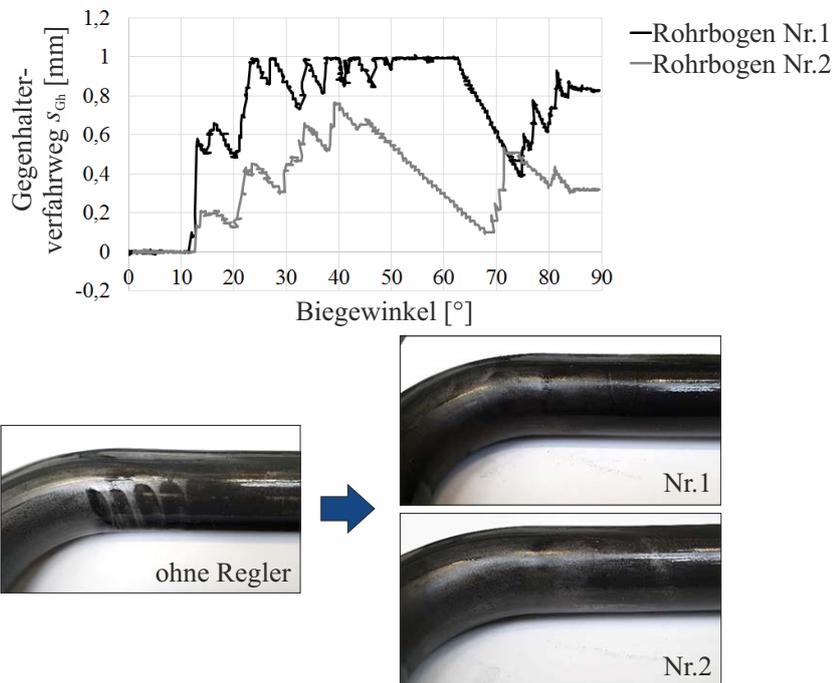


Abbildung 8.21: Gegenhalterverfahrensweg  $s_{Gh}$  zweier mit Fuzzy-Regler gebogener Rohrbögen mit unbekanntem Werkstoffverhalten.

Der Gegenhalterverfahrensweg des Rohrbogens Nr.1 erreicht Werte bis zu 1 mm. Der maximale Gegenhalterverfahrensweg des Rohrbogens Nr. 2 beträgt 0,79 mm. Für beide Rohrbögen wurde ein Faltenbewertungsfaktor von  $\Omega = 0$  ermittelt.

## 8.4 Bewertung und Diskussion der Ergebnisse

In Abschnitt 8.3 wurde die Erprobung einer Fuzzy-Regelung vorgestellt, die den Gegenhalter und die Transporteinheit als Aktoren nutzt, um Falten zu reduzieren, ohne dass ein Bediener in den Prozess eingreifen muss. Die Werkzeuge wurden durch den Regler so eingestellt, dass keine unnötig hohen Werkzeugkräfte erzeugt werden, sondern nur solche, die zur Vermeidung von Falten erforderlich sind. Dies reduziert den Werkzeugverschleiß und die Gefahr der Rissbildung.

Dünnwandige Rohre aus dem Werkstoff X5CrNi18-10 (Werkstoffnummer 1.4301) mit Wanddickenfaktoren von  $W = 40$  und  $W = 50$  bildeten vor der Übergangsebene Falten. Dieser Bereich konnte durch die In-situ-Messung der Rohrkontur mittels eines Laser-Liniensensors durch eine schmale Aussparung in dem Faltenklärer erkannt werden. Diese Eingangsgröße dominierte bei den dünnwandigen Rohren. Mit dem Fuzzy-Regler konnten faltenfreie Rohre hergestellt werden. Die Zustellung des Gegenhalters erfolgte, wenn kleine Falten detektiert wurden. Konnte die Rohrkontur geglättet werden, wurde das Rohr durch

den Gegenhalter entlastet. Der Gegenhalter konnte sich auf einer geeigneten Position einpendeln. In der Regel entstanden kleine Falten in den Rohren, die der Regler frühzeitig erkannte und in den faltenfreien Zustand überführen konnte. Plötzlich entstandene Falten wurden durch eine schnellstmögliche Reaktion des Reglers mindestens verringert und in den meisten Fällen entfernt. Die zeitlichen Reaktionen der Aktoren auf Eingangssignale sind abhängig von der Messfrequenz, der Übertragungsfrequenz der Stellgröße an das elektrische Ventil der Gegenhalterachse und der Verfahrgeschwindigkeit der Achse. Eine zu hoch eingestellte Übertragungsfrequenz der Stellgröße führte zu instabilem Verhalten der Maschinenachse. Der Gegenhalter musste in der Lage sein, seine Soll-Position zu erreichen, bevor eine neue Soll-Position übertragen wurde. Eine zu hoch eingestellte Verfahrgeschwindigkeit führte zu einem Aufschwingen der Maschinenachse, da die Soll-Position nicht erreicht, sondern wiederholt überfahren wurde. Die Verfahrgeschwindigkeit wurde als maximale Spannung pro Zeit in dem MES vorgegeben, sodass die Öffnungsgeschwindigkeit des Ventils beeinflusst wurde, siehe Abschnitt 8.2. Die zeitlichen Reaktionen konnten insbesondere deshalb nicht vorher berechnet werden, weil die Achsen der Biegemaschine durch eigene Achsenregler gesteuert werden. Daher konnte die Erprobung nicht theoretisch erfolgen, sondern wurde anhand der praktischen Experimente durchgeführt.

Dickwandige Rohre aus dem Werkstoff X5CrNi18-10 (Werkstoffnummer 1.4301) mit einem Wanddickenfaktor von  $W = 20$  bildeten in der Übergangsebene Falten. Die Falten wurden durch die Kraftänderung des Faltenglätters frühzeitig erkannt. Die Falten in der vergleichsweise dicken Rohrwand brachten genug Kraft auf, um Kraftanstiege an dem Faltenglätter zu verursachen. Die Eingangsgröße des Faltenglätters entspricht einer indirekten Faltenmessung. Dadurch müssen die Falten eine gewisse Höhe erreicht haben, bis sie erkannt werden. Dies und der in Unterabschnitt 8.3.3 beschriebene Filter verzögerten die Reaktionszeit des Reglers. Die Rohre mit einem Wanddickenfaktor von  $W = 20$  bildeten langsam ansteigende Faltenhöhen, ohne plötzliche große Falten zu produzieren. Dadurch konnten faltenfreie Rohrbogen mit dem Fuzzy-Regler hergestellt werden. Dies wird durch die in Unterabschnitt 4.4.2 beschriebenen Rohrstauchversuche untermauert. Die Rohrkonturen wiesen gleichmäßige Wellen mit einer großen Wellenlänge auf. Dünnwandigere Rohre konnten ein plötzliches Ausbeulen mit großer Amplitude aufweisen.

Mit der Eingangsgröße der Dornkraftänderung wurden Falten im Bogenbereich erkannt. Dies hat entsprechend der Produktionsregeln einen Einfluss auf die Transportgeschwindigkeit. Aus Gründen bzgl. der Soft- und Hardware der Biegemaschine konnte die Transportgeschwindigkeit bei den Validierungsversuchen nicht an der Biegemaschine umgesetzt werden. Die aufgezeichneten Stellgrößen der Transportgeschwindigkeit wurden jedoch ausgewertet und entsprachen den Erwartungen. Ein steiler Abfall im Verlauf der Dornkraftänderung führte zu einer Reduzierung der Transportgeschwindigkeit. Dadurch können überlagerte Zugspannungen zur Vermeidung der Faltenbildung induziert werden. Ob faltenfreie Rohre durch die Erfassung von Falten mittels Dornkraftmessung hergestellt werden können, kann nur vermutet werden. Die in Abschnitt 8.3 beschriebenen Versuchsergebnisse zeigen einen großen Einfluss der Transportgeschwindigkeit auf die Faltenbildung. Dies lässt die Annahme zu, dass mindestens eine Verringerung der Faltenhöhe und damit eine Verbesserung der Bauteilqualität zu erwarten ist. Eine FE-Simulation des Reglerhaltens in Anhang A.1 bestätigt diese Annahme.

Die Faltenbildung ist eine Instabilität, die unterschiedliche Reglerreaktionen ausgelöst hat. Mehrfachbiegungen mit wechselnder Biegerichtung können Form- und Lageabweichungen an dem ungebogenen Rohrende verursachen. Die Biegeversuche der aufeinanderfolgenden Rechts- und Linksbiegungen haben gezeigt, dass Unterschiede in der Form und Lage des eingelegten Rohres zu Streuungen in den Startzeitpunkten der Faltenbildung und den maximalen Gegenhalterverfahrwegen führten. Die Streuung war größer als bei den Biegungen der voneinander getrennten Rohrzuschnitte. Bei zukünftigen Forschungsvorhaben zur Untersuchung der Einflussfaktoren der Faltenbildung können die Untersuchungsergebnisse hinsichtlich der Reglerreaktionen unterstützen.

Für die Biegeversuche mit einem Werkstoffwechsel wurde der gleiche Werkzeugsatz, wie bei den Edelstahlrohren mit einem Wanddickenfaktor von  $W = 40$  verwendet. Der Baustahl hat eine um 3,6 % niedrigere Streckgrenze und eine um 62 % geringere Gleichmaßdehnung als der Edelstahl. Die Verläufe der Gegenhalterverfahrwege weisen Bereiche auf, in denen der Gegenhalter das Rohr über einen größeren Zeitraum entlastet hat. Bei Biege winkeln zwischen  $50^\circ$  und  $75^\circ$  scheint keine Faltengefahr vorgelegen zu haben. Mit Hilfe des Reglers wurden faltenfreie Rohrbögen hergestellt.

## 8.5 Verbesserungspotential in der praktischen Anwendung

Die Prozessstabilität ist einer der Gründe für Prozessregelungen an Umformmaschinen. Ein Bestandteil der Regelungen ist die Rückführung der Regelgröße. Sie wird in situ messtechnisch erfasst. Verschiedene Ansätze zur Messung wurden bei dem entwickelten Fuzzy-Regler eingesetzt. Kraft- und Rohrkonturmessungen wurden durch externe Sensorik an der Maschine durchgeführt. Der Einbau der Sensoren zusammen mit der Integration der Elektronik stellt einen zusätzlichen Zeit- und Kostenaufwand dar. Als Alternative zur Implementierung von externen Sensoren ist eine Nutzung der bereits in der Anlage vorhandenen Signale denkbar. Dies würde die Übertragung des entwickelten Fuzzy-Reglers auf andere Umformmaschinen erleichtern und dadurch Zeit und Kosten sparen. Das Spektrum an faltenfrei gestaltbaren Biegeaufgaben kann allerdings gegenüber dem vorgestellten Fuzzy-Regler kleiner sein. Bereits erfolgte Arbeiten zu ähnlichen Untersuchungen zeigen das Interesse an maschineninternen Eingangsgrößen für Prozessregelungen. OLAIZOLA et al. (2020) untersuchten in diesem Zusammenhang interne Servomotorsignale einer Blechumformanlage, um Rückschlüsse auf die Kraftverläufe an den Pressenwerkzeugen und damit auf die Bauteilqualität zu ziehen. HEFTRICH et al. (2018) stellten die Abhängigkeit zwischen dem Biegemomentenverlauf einer Rotationszugbiegemaschine und dem Rückfederungswinkel des Biegebauteils heraus. Die Messwerte der internen Sensorik der Biegeachse konnten dabei zur Regelung des Biege winkels genutzt werden.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Individualisierung von Produkten gewinnt an Bedeutung, sodass Kundenanforderungen nach Variantenvielfalt in der Fertigungstechnik steigen. Bei den daraus folgenden abnehmenden Losgrößen ist eine niedrige Ausschussquote besonders wichtig. Dadurch kann die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens gesteigert werden. Weiterhin ist der Umweltschutz gegenwärtig so präsent wie noch nie. Methoden zur Vermeidung von Ausschuss können einen großen Beitrag zur Ressourcenschonung leisten. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, bedarf es robuster Fertigungsprozesse, die sich selbstständig an wechselnde Varianten und Einflusschwankungen anpassen können.

Das Rotationszugbiegen (RZB) ist ein Profilbiegeverfahren, welches aufgrund seiner Werkzeuggebundenheit anspruchsvolle Biegeaufgaben und enge Toleranzen am Produkt realisieren kann. Die Verfahrensgrenzen sind die Rissbildung auf der Bogenaußenseite und die Faltenbildung auf der Bogeninnenseite. Die Faltenbildung ist eine Instabilität mit einer Vielzahl an Einflüssen und dadurch nur begrenzt durch Berechnungen, wie FE-Simulationen, vorhersagbar. Die präzise Vorhersage der auftretenden Faltenbildung ist eine der grundlegendsten und schwierigsten Fragen der Umformtechnik, um eine fehlerfreie Form zu gewährleisten. Korrekturen der Werkzeugkräfte und Achsenwege zur Verhinderung von Falten erfolgen nach der Herstellung eines Ausschussteils. Die Anzahl der iterativen Einstellversuche ist abhängig von der Erfahrung des Maschinenbedieners. Korrekturen zum Verhindern von Falten bergen die Gefahr, den Prozess zur Rissbildung zu führen. Regelungen können die Produktqualität durch Messsysteme erfassen und eine gezielte Prozessführung realisieren.

In dieser Arbeit wird eine wissensbasierte Methode zur Regelung des Werkstoffflusses beim Rotationszugbiegen von Rohren vorgestellt, welche die Faltenbildung während des Biegeprozesses selbstständig verhindert. Dadurch kann der Ausschuss vermieden werden und manuelle Einstellvorgänge entfallen. Die Gegenmaßnahmen zur Verhinderung der Falten erfolgen unter Beachtung der Rissbildung und damit so gering wie möglich. Der Prozess wird innerhalb des Gutteilbereichs entlang seiner Grenze zur Faltenbildung geführt, sodass unnötig hohe Werkzeugkräfte verhindert und der Werkzeugverschleiß reduziert werden können. Die Methode beinhaltet ein Prozessmodell, welches neben dem System einer Regelung auf andere Problemlösungssysteme, wie z. B. Case-based reasoning-Systeme, übertragbar ist. Die Umsetzung der Methode erfolgte mittels eines Fuzzy-Reglers mit dem Vorteil, unscharfe, nichtlineare Abhängigkeiten mathematisch beschreiben zu können. Die Entwicklung der Produktionsregeln und Zugehörigkeitsfunktionen erfolgte auf Basis von Erfahrungswerten und vorhandenem Prozesswissen.

Die Entwicklung der Methode erfolgte anhand von fünf Hauptaufgaben, welche nachfolgend zusammengefasst wurden.

- Faltenbildung

In-situ-Messsysteme wurden untersucht, welche die kontinuierliche Erfassung des Werkstoffflusses ermöglichten. Durch die Ermittlung von faltensignifikanten Änderungen in den Messverläufen konnten Falten in ihrer Entstehung erkannt werden. Gegenmaßnahmen konnten durch die Detektion reversibler Falten frühzeitig eingeleitet und die Faltenbildung verhindert werden. Falten konnten im geraden Rohrbereich, in der Übergangsebene und im Bogenbereich entstehen. Die Messung der Rohrkontur, der Dornkraft und der Faltenglätterkraft bildeten die Regler-Eingangsgrößen und deckten den gesamten Messbereich der Faltenbildung ab.

- Gegenmaßnahmen

Regler-Ausgangsgrößen wurden untersucht, die als Stellgrößen der Faltenbildung entgegenwirken. Die Zustellung des Gegenhalters quer zur Rohrrichtung und die Vorschubgeschwindigkeit des Transportes dienten als Stellgrößen. Rohrstauchversuche zeigten, dass die Entstehung von Falten nach Aufdickung der Rohrwand erfolgt. Wird der Freiraum zur Ausbeulung der Rohrwand reduziert, wird die Aufdickung begünstigt. Die Zustellung des Gegenhalters verringert das Werkzeugspiel und kann die Faltenbildung verhindern. Druckspannungen in Rohrlängsrichtung verursachen die Faltenbildung. Durch den Einsatz des Spannfutters mit reduzierter Vorschubgeschwindigkeit können Zugspannungen überlagert und Falten verhindert werden. Die Zugspannungen werden im gesamten Rohrquerschnitt induziert und erhöhen die Rissgefahr am Außenbogen. Dadurch wird die Gegenhalterzustellung von dem Regler bevorzugt eingesetzt.

- Prozessmodell

Produktionsregeln und Zugehörigkeitsfunktionen wurden definiert, welche die Abhängigkeiten der Ein- und Ausgangsgrößen beschreiben. Ergebnisse praktischer Biegeversuche wurden in die Kategorien „keine Falten“, „kleine Falten“ und „große Falten“ eingeteilt und ausgewertet. Die Grenzen der Fuzzy-Mengen wurden auf Basis der Versuchsergebnisse festgelegt. Von besonderer Bedeutung ist die Instabilitätsgrenze, welche den Übergang zwischen dem faltenfreien und faltenbehafteten Zustand beschreibt. Ab wann eine Konturveränderung zu einer Falte führt, ist aufgrund der Vielzahl an Einflüssen nur näherungsweise definierbar. Dadurch ist der Eintritt des Faltenstarts schwankungsbehaftet. Mit der Instabilitätsgrenze als Fuzzy-Menge konnte auf diese Schwankungen reagiert werden. Die Abhängigkeit zwischen der Faltenbildung und den Stellgrößen ist nichtlinear. Dadurch entspricht die Regelbasis keinem linearen Gleichungssystem der klassischen Logik. Mit Hilfe der Fuzzy-Logik konnte auf die nichtlinearen Veränderungen des Werkstoffflusses mit scharfen Stellgrößen reagiert werden.

- Regelungsprogramm

Das Regelungsprogramm ist maschinenunabhängig. Es wurde in die lehrstuhleigene Rotationszugbiegemaschine anhand von Schnittstellenprogrammen und eines

Messfassungssystem integriert. Unter Abstimmung der Datenübertragungsfrequenzen und Verfahrensgeschwindigkeiten erfolgte eine kontinuierliche Übertragung der Stellgrößen an die Gegenhalterachse. In den Elektromotor der Transportachse kann nicht eingegriffen werden, daher wurden die Stellgrößen der Transporteinheit dokumentiert, ausgewertet und mittels FE-Simulation erprobt.

- Praktische Erprobung

Die Erprobung des Reglers und seiner Reaktionszeiten konnte nicht ausschließlich theoretisch erfolgen, sondern wurde anhand von praktischen Experimenten durchgeführt. Die zeitlichen Reaktionen konnten insbesondere deshalb nicht vorher berechnet werden, weil die Achsen der Biegemaschine durch eigene Achsenregler gesteuert werden. Durch den Einsatz des Reglers konnten faltenfreie Rohrbögen unterschiedlicher Biegeaufgaben hergestellt werden.

Falten vor dem Bogenbereich konnten durch die In-situ-Messung der Rohrkontur erkannt werden. Falten in der Übergangsebene wurden durch die Kraftänderung des Faltenglätters erfasst. Die Kraftänderung des Dorns detektierte Falten im Bogenbereich. Aufeinanderfolgende Biegungen mit abwechselnd um  $180^\circ$  gedrehtem Halbzeug (Rechts-Links-Biegungen) können Schwankungen in den Kontaktflächen zwischen den Werkzeugen und dem Rohr verursachen. Der Regler ermöglichte faltenfreie aufeinanderfolgende Rechts-Links-Biegungen sowie faltenfreie Biegungen von Rohren aus Edelstahl und Baustahl. Die In-situ-Messsysteme ermöglichen über die analytischen Faltenvorhersagen hinaus eine Erfassung des aktuellen Bauteilzustands. Durch den auf Schwankungen reagierenden Fuzzy-Regler wird ein stabiler Fertigungsprozess mit gezielter Prozessführung ermöglicht, ohne dass ein manuelles Eingreifen erforderlich ist.

Der statische Fuzzy-Regler ist für ein großes Spektrum an Varianten geeignet. Bei Überschreiten der Grenzen des Spektrums, beispielsweise in Richtung größerer Wanddickenfaktoren, kann eine Verschiebung der Fuzzy-Mengen erforderlich sein. Eine Abschätzung geeigneter Werte kann mit Hilfe der in dieser Arbeit definierten Grenzen erfolgen. Die Grenzen wurden dazu nicht nur in Kombination, sondern für jede Biegeaufgabe separat ermittelt. In Zukunft ist eine Einordnung in eine übergeordnete Zugehörigkeitsfunktion denkbar, in der die betrachtete Biegeaufgabe in den Bereich des Spektrums oder einen Grenzbereich eingeordnet wird. Dadurch kann der Anwendungsbereich erweitert werden. Der erfolgreiche Einsatz von In-situ-Messsystemen in dieser Arbeit eröffnet Möglichkeiten alternativer Sensoren. Zukünftig ist ein multikriterieller Regler denkbar, der über die Verfahrensgrenzen hinaus die Qualitätsmerkmale, wie u.a. die Ovalisierung, den Einfall am Außenbogen und Wanddickenverläufe, berücksichtigt.



# 10 Literaturverzeichnis

**Abele, N.-D.; Hoffmann, S.; Kuhnhen, C.; Ludwig, T.; Schäfer, W.; Schulte, L.; Schweitzer, M.; Wulf, V. (2016):** Unterstützung des Rüstprozesses durch cyber-physische Hilfsmittel am Beispiel des Rohrbiegeprozesses. Konferenz. Zukunftsprojekt Arbeitswelt 4.0, Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau in Kooperation mit den Forschungsinstituten IAW, ZEW, IAO, ISI und Universität Hohenheim, Stuttgart.

**Albert, A.; Biehl, S. (2009):** ORUM – Optimierte Regelung von Umformprozessen, WT Werkstatttechnik online, Jahrgang 99 (2009) H.10.

**Aleyasin, H. (2017):** The Prediction of Forming Limit Diagram of Low Carbon Steel Sheets Using Adaptive Fuzzy Inference System Identifier, Journal of Solid Mech. Band 9, Nr. 3, S. 472.

**Allwood, J. M.; Duncan, S. R.; Cao, J.; Groche, P.; Hirt, G.; Kinsey, B.; Kuboki, T.; Liewald, M.; Sterzing, A.; Tekkaya, A. E. (2016):** Closed-loop control of product properties in metal forming. CIRP Annals, Vol. 65 Heft 2, S. 573-596, doi 10.1016/j.cirp.2016.06.002.

**Bäcker, F.; Bratzke, D.; Groche, P.; Ulbrich, S. (2015):** Time-varying process control for stringer sheet forming by a deterministic derivative-free optimization approach. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Band 80, Heft 5-8, S. 817f, ISSN 0268-3768.

**Bandemer, H.; Bellmann, A. (1994):** Statistische Versuchsplanung. 4. neubearbeitete Auflage. Teubner Verlag, Stuttgart, ISBN 3-8154-2079-2.

**Bauer, D.; Khodayari, G. (1992):** Rohrrückfederung beim Biegen prozessbegleitend kompensieren. Bänder, Bleche, Rohre, 33, Nr. 7, S.27-37.

**Behrens, B. A.; Yun, J. W.; Milch, M. (2005):** Closed-Loop-Control of the Material Flow in the Deep Drawing Process. Advanced Materials Research, Vol. 6-8, S. 321-328, doi 10.4028/www.scientific.net/AMR.6-8.321.

**Bergmann, R.; Althoff, K.-D.; Minor, M.; Reichle, M.; Bach, K. (2009):** Case-Based Reasoning. KI Künstliche Intelligenz, German Journal on Artificial Intelligence, 1, S. 5-11, Böttcher IT Bremen.

**Blaich, C. (2012):** Robuster Tiefziehprozess durch Erfassung und Optimierung der örtlichen Bauteilqualität. Dissertation, DGM Informationsges. Verlag, ISBN 978-3-88355-393-1.

- Borchmann, L.; Schneider, D.; Engel, B. (2021):** Design of a fuzzy controller to prevent wrinkling during rotary draw bending. ESAFORM 2021, 24th Int. Conf. on Material Forming, (14.04.-16.04.2021), doi 10.25518/esaform21.2742.
- Borchmann, L.; Frohn-Sörensen, P.; Engel, B. (2020-1):** In situ detection and control of wrinkle formation during rotary draw bending. Procedia Manufacturing, Volume 50, 589-596, doi 10.1016/j.promfg.2020.08.106.
- Borchmann, L.; Heftrich, C.; Engel, B. (2020-2):** Influence of the stiffness of machine axes on the formation of wrinkles during rotary draw bending. SN Appl. Sci. 2, 1627, doi 10.1007/s42452-020-03419-1.
- Borchmann, L.; Kuhnhen C.; Frohn P.; Engel B. (2019):** Sensitivity analysis of the rotary draw bending process as a database of digital equipping support. Procedia Manufacturing, 29, S. 169-176. doi 10.1016/j.promfg.2019.02.122.
- Burkhard, B.; Albrecht, V. (2009):** Scharfe Kurven. Industrie Anzeiger, Nr. 13.
- Chen, J., Daxin, E., Zhang, J. (2013):** Effects of process parameters on wrinkling of thin-walled circular tube under rotary draw bending, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 68, 1505-1516, doi 10.1007/s00170-013-4938-5.
- Buse, C. (2017):** Potenziale und Grenzen der Schallemissionsanalyse zur Online-Prozessüberwachung in der Kaltmassivumformung von Stahlwerkstoffen. Dissertation, ISBN 978-3-95900-155-7.
- De Carvalho, F.; Hoffmann, S.; Abele, D.; Schweitzer, M.; Tolmie, P.; Randall, D.; Wulf, V. (2018):** Of embodied action and sensors: knowledge and expertise sharing in industrial set-up, Computer Supported Cooperative Work, 27, S. 875–916, doi 10.1007/s10606-018-9320-6.
- Deuffhard, P.; Hohmann, A. (2002):** Numerische Mathematik, Band 1, De Gruyter Verlag, ISBN 978-3-1101-7182-2.
- Doege, E.; Behrens, B.-A. (2007):** Handbuch Umformtechnik, Grundlagen, Technologien, Maschinen, Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN-13 978-3-540-23441-8.
- Doege, E.; Menz, R. (2000):** Konzept einer Richtmaschinenregelung zum Richten von Blechmaterial. MATAR PRAHA: Machine Tools, Automation and Robotics in mechanical Engineering. International Congress. Prag 20.-22.06.00, S. 106-112.
- Düsing, H. E. (1994):** Stabilität längsversteifter stählerner Kreiszyinderschalen unter zentrischem Axialdruck – Theoretische Grundlagen und baupraktischer Beulsicherheitsnachweis. Dissertation Essen.
- Engel, B. (1995):** Verfahrensstrategie zum Innenhochdruck-Umformen. Shaker Aachen, Dissertation, ISBN 3-8265-1259-6.
- Engel, B.; Gerlach, C.; Cordes, S. (2008):** Biegemomentenabschätzung des Dornbiegeverfahrens. UTF science, Nr. 2, S. 1-8.

- Engel, B.; Hinkel, M. (2011):** Analytisch unterstützte Vorauslegung des Rotationszugbiegeprozesses. XXX. Verformungskundliches Kolloquium Leoben, S. 97-102.
- Engel, B.; Hinkel, M.; Kersten, S.; Kopfer, P.; Mathes, C.; Kuhnhen, C. (2011):** VDI 3430 - A Guideline for Rotary Draw Bending of Profiles. In: Dortmund Tube and Profile Bending Colloquium (DORP), Nr. 4, S. 49-50.
- Engel, B.; Mathes, C. (2013):** Erweiterung der Prozessfähigkeit des Rotationszugbiegens durch ein alternatives Faltenglätterkonzept. 1., Aufl. Hannover: Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., EFB-Forschungsbericht, 378, ISBN 978-3-86776-421-6.
- Engel, B.; Steinheimer, R.; Christ, H.-J.; Grigorescu, A.; Weinberg, K.; Dally, T. (2013):** Modellierung und Regelung der Ausformung komplexer Rohrbauteile unter optimierter Nutzung der Martensitbildung bei austenitischen Edelstählen. MEFORM 2013 – Simulation von Umformprozessen, März 20-22, Altenberg.
- Fang, J.; Lu, S.; Wang, K.; Xu, J.; Xu, X.; Yao, Z. (2013):** Effect of mandrel on cross-section quality in numerical cantal bending process of stainless steel 2169 small diameter tube. Hindwai Publishing Corporation, Advances in Materials Science and Eng., Vol. 2013, Nr. 849495, doi 10.1155/2013/849495.
- Fischer, P.; Heingärtner, J.; Renkci, Y.; Hora, P. (2018):** Experiences with inline feedback control and data acquisition in deep drawing. Procedia Manufacturing, Vol. 15, S. 949-954, 10.1016/j.promfg.2018.07.401.
- Flehming, T.; Blümel, K.; Kibben, M. (2001):** Untersuchungen zu Biegegrenzen von Rohren mit kreisförmigem Querschnitt. Internationale Konferenz „Hydroformung“ in Fellbach, S. 45-68.
- Franz, W.-D. (1988):** Maschinelles Rohrbiegen – Verfahren und Maschinen. Düsseldorf: VDI-Verlag. ISBN 3-18-400814-2.
- Gerard, G. (1956):** Compressive and torsional buckling of thin-wall cylinders in yield region. NACA TN 3726.
- Gerlach, C. (2010):** Ein Beitrag zur Herstellung definierter Freiformbiegegeometrien bei Rohren und Profilen. Aachen: Shaker Verlag. ISBN 978-3-8322-9484-7.
- Griesbach, B. (2000):** In-Prozess Stoffflussmessung zur Analyse und Führung von Tiefziehvorgängen. Düsseldorf: VDI-Verl. ISBN 3-18-354702-3.
- Gillander, J. (1994):** Pipe and tube bending manuel. 2. Auflage Rockford, III: Fabricators & Manufacturers Association, Internattional, ISBN 978-1-88111-306-5.
- Gross, D.; Hauger, W.; Schröder, J.; Wall, W.A. (2008):** Technische Mechanik. 10. Auflage Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag. ISBN 978-3-540-68397-1.
- Grote, K.H.; Feldhusen, J. (2014):** Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, S. 1-1798, ISBN 978-3-540-68191-5.

- Groth, S. (2020):** Methode zur Produktplanung beim Freiformbiegen. Dissertationsschrift, Shaker Verlag, Aachen, ISBN 978-3-844-07775-9.
- Grüber, M.; Hirt, G. (2016):** Numerical Investigation of a Process Control for the Roller Levelling Process Based on a Force Measurement. Materials Science Forum 854, S. 249-254, 10.4028/www.scientific.net/MSF.854.249.
- Hagenah, H.; Vipavc, D.; Vatter, P. H.; Cojutti, M.; Plettke, R. (2010):** Creation of the Data Base for the Process Design of the Three-Roll-Push Bending Process. 7th CIRP Int. Conf. Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Conference Paper, Jan. 2010.
- Han, H. N., Kim K.-H. (2003):** A ductile fracture criterion in sheet metal forming process. Journal of Materials Processing Technology, 142, 231-238, doi 10.1016/S0924-0136(03)00587-9.
- Hanke-Bourgeois, M. (2009):** Grundlagen der Numerischen Mathematik und des Wissenschaftlichen Rechnens. Wiesbaden, Deutschland: Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH. ISBN 978-3-8348-0708-3.
- Hansen, B.; Purr, S.; Meinhardt, J.; Merklein, M. (2019):** Investigation of the tribological behavior of car body parts in series production. Procedia Manufacturing, Vol. 27, 2019, S. 51-56, doi10.1016/j.promfg.2018.12.043.
- Hartmann, C.; Eder, M.; Opritescu, D.; Maier, D.; Santaella, M.; Volk, W. (2018):** Geometrical compensation of deterministic deviations for part finishing in bulk forming. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 261, S. 140-148, doi 10.1016/j.jmatprotec.2018.06.008.
- Hartmann, C.; Opritescu, D.; Volk, W. (2019):** An artificial neural network approach for tool path generation in incremental sheet metal free-forming. Journal of Intelligent Manufacturing, Feb. 2019, Vol. 30, Heft 2, S. 757-770, doi 10.1007/s10845-016-1279-x.
- Hassan, H. (2017):**Plasto-Mechanical Model of Tube Bending in Rotary Draw Bending Process. Dissertationsschrift, Herzogenrath: Shaker, Band 3. ISBN 978-3-8440-2330-5.
- Heftrich, C.; Steinheimer, R.; Engel, B. (2018):** Rotary-draw-bending using tools with reduced geometries. 17th International Conference on Metal Forming, 16-19, Toyohashi, Japan, doi 10.1016/j.promfg.2018.07.410.
- Hermes, M. (2012):** Neue Verfahren zum rollenbasierten 3D-Biegen von Profilen. Aachen: Shaker Verlag. ISBN 978-3-8440-0793-0.
- Hinkel, M. (2013):** Prozessfenster für das Spannen von Rohrprofilen beim Rotationszugbiegen unter Berücksichtigung der Tribologie. Dissertationsschrift, Herzogenrath: Shaker Verlag, Band 3. ISBN 978-3-8440-2330-5.
- Hoffmann, H.; Neugebauer, R.; Spur, G. (2012):** Handbuch Umformen. München: Hanser, ISBN 978-3-446-42778-5.

- Hoffmann, S.; de Carvalho, A. F. P.; Abele, D.; Schweitzer, M.; Tolmie, P.; Wulf, V. (2019):** Cyber-Physical Systems for Knowledge and Expertise Sharing in Manufacturing Contexts: Towards a Model Enabling Design. IN Computer Supported Cooperative Work (CSCW), Vol. 28, S. 469–509, doi 10.1007/s10606-019-09355-y.
- Iske, A. (2018):** Approximation. Deutschland: Springer-Verlag GmbH, ISBN 978-3-662-55465-4.
- Jenkouk, T.; Hirt, G.; Franzke, M.; Zhang, T. (2012):** Finite element analysis of the ring rolling process with integrated closed-loop control. CIRP Annals, Vol. 61, Heft 1, 2012, S. 267-270, doi 10.1016/j.cirp.2012.03.115.
- Kahlert, J.; Frank, H. (1994):** Fuzzy-Logik und Fuzzy-Control: eine anwendungsorientierte Einführung mit Begleitsoftware, 2., verb. und erw. Auflage, Vieweg, Braunschweig, 1994, 353 Seiten, mit Diskette, ISBN 3-528-15304-0.
- Kersten, S. (2013):** Prozessmodelle zum Drei-Rollen-Schubbiegen von Rohrprofilen. Dissertationsschrift, Herzogenrath: Shaker, Band 2, ISBN 978-3-8440-1969-8.
- Kolodner, J. L. (1995):** Promoting Transfer through Case-Based Reasoning. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann.
- Kolodner, J. L. (2014):** Case-Based Reasoning. Elsevier Science Verlag, ISBN 978-1-4832-9449-0.
- Kopfer, P. (2016):** Methode zur adaptiven Rückfederungskompensation und -korrektur von Blechbiegebauteilen in mehrstufigen Biegeprozessen. Dissertationsschrift, Herzogenrath: Shaker Verlag, Band 7. ISBN 978-3-8440-4588-8.
- Khodayari, G. (1994):** Untersuchungen zum elastisch-plastischen Biegen von Stahlrohrprofilen. Dissertation. Universität Siegen.
- Kromm, A. (1942):** Die Stabilitätsgrenze der Kreiszyinderschale bei Beanspruchung durch Schub- und Längskräfte. Jb. 1942 der Dtsch. Luftf.-Forsch. I, S. 602/15.
- Kruse, R. Borgelt, C. Braune, C. Klawonn, F. Moewes, C. Steinbrecher, M. (2015):** Computational Intelligence. Computer Science book series, Springer Vieweg.
- Kuhnhen, C. (2016):** Bewertung und quantitative Beschreibung von Rohrbiegebauteilen anhand von Kennziffern zur Feststellung der Rückwirkungen ausgewählter Qualitätsmerkmale auf Produktion und Produktanwendung. Dissertationsschrift, Shaker Verlag, Aachen, ISBN 978-3-8440-4866-7.
- Kuhnhen, C.; Engel, B. (2018):** Cyberphysisches Rüsten und smarte Prozesse beim Rotationszugbiegen. – 13. Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt, TU-Darmstadt, 25.09.2018.
- Kulczyk, A. (2012):** Portabler Messarm unterstützt die Produktion – Qualitätssicherung bei der Herstellung von Stromgeneratoren. VDI-Z Integrierte Produktion, Jahrgang 154, Nr.5, S. 22-24.

- Lackes, R.; Siepermann, M. (2018):** Fuzzy-Inferenz. Gabler Wirtschaftslexikon, <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/fuzzy-inferenz-35295/version-258781>, zuletzt geprüft am 21.05.2021.
- Lange, K. (1990):** Umformtechnik. Springer, Band 3, ISBN 9783-54043-6967.
- Lee, Y.-H.; Kopp, R. (2001):** Application of fuzzy control for a hydraulic forging machine. *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 118, 16 February, S. 99-108, doi 10.1016/S0165-0114(98)00464-3.
- Li, S.; Yang, B.; Zhang, W.; Lin, Z. (2007):** Loading path prediction for tube hydroforming process using a fuzzy control strategy, *Materials & Design*, Vol. 29, Heft 6, 2008, S. 1110-1116, doi 10.1016/j.matdes.2007.06.008.
- Liewald, M.; Wurster, K.; Blaich, C. (2011):** New Approaches on Automated Wrinkle Detection in Sheet Metal Components by Forming Simulation, *AIP Conference Proceedings* 1353, 1185, doi 10.1063/1.3589677.
- Liewald, M.; Nguyen, T.-K. (2014):** Formänderungsanalyse hydroumgeformter Rohre mittels optischer Messsysteme, Verlag Meisenbach GmbH, [www.utfscience.de](http://www.utfscience.de) I/2014 S. 1/6, zuletzt geprüft am 21.05.2021.
- Liewald, M.; Han, F.; Radonjic, R. (2015):** New criterion for prediction of the wrinkle formation in deep drawing, *Trans Tech Publications*, Switzerland, ISSN: 1662-9795, Vols. 651-653, pp 71-76, doi 10.4028/www.scientific.net/KEM.651-653.71.
- Liu, N.; Yang, H.; Li, H.; Yan, S. (2015):** Plastic wrinkling prediction in thin-walled part forming process: A review, *Chinese Journal of Aeronautics* (2016), 29(1): 1-14.
- Löffler, M.; Schulte, R.; Freiburg, D.; Biermann, D.; Stangier, D.; Tillmann, W.; Merklein, M. (2019):** Control of the material flow in sheet-bulk metal forming using modifications of the tool surface. *International Journal of Material Forming*, Vol. 12, Heft 1, S. 17–26, doi 10.1051/mateconf/201819013003.
- Maier, S. (2017):** Inline-Qualitätsprüfung im Presswerk durch intelligente Nachfolgewerkzeuge. Dissertation, ISBN: 978-3-95884-004-1.
- Melzer, C. M.; Krech, M.; Kristl, L.; Freund, T.; Kuttich, A.; Zocholl, M.; Groche, P.; Kohler, M.; Platz, R. (2015):** Methodical Approaches to Describe and Evaluate Uncertainty in the Transmission Behavior of a Sensory Rod. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 807, S. 205-217, doi 10.4028/www.scientific.net/AMM.807.205.
- Merklein, M.; Hagenah, H.; Cojutti, M. (2009):** Investigations on Three-Roll Bending of Plain Tubular Components. In: *Key Engineering Materials*, S. 325–334.
- Merklein, M.; Löffler, M.; Gröbel, D.; Henneberg, J. (2018):** Material flow control in sheet-bulk metal forming processes using blasted tool surfaces. *MATEC Web of Conferences* 190, 13003, doi 10.1051/mateconf/201819013003.
- Miller, G. (2003):** Tube forming processes. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, ISBN 978-0-87263-633-0.

- Müller, T.; Meyer, M.; Lenske, A.; Hauptmann, M.; Majschak, J.P. (2018):** Optical inline quality assessment of deep-drawn paperboard containers. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 262, S. 615-621, doi 10.1016/j.jmatprotec.2018.08.003.
- Na, M. G.; Weon, J.; Kim, J. W.; Hwang, I. J. (2006):** Estimation of collapse moment for the wall-thinned pipe bends using fuzzy model identification, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 236, Heft 13, S. 1335-1343, doi 10.1016/j.nucengdes.2005.12.003.
- Nakamura, K. Sakashita, N. Nitta, Y. Shimomura, K. Tokuda, T. (1993):** Fuzzy inference and fuzzy inference processor. *IEEE Micro*, 13, 37-48.
- Nan, L.; He, Y.; Heng, L.; Siliang, Y. (2015):** Plastic wrinkling prediction in thin-walled part forming process: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*, 29, doi 10.1016/j.cja.2015.09.004.
- Oehler, G. (1971):** Verbindung der Faltenbildung und Einknicken dünnwandiger Rohre beim Biegen. *Werkstatt und Betrieb*, 104, Nr. 4, S. 271-274.
- Olaizola, J.; Esteban, E.; Trinidad, J.; Iturrospe, A.; Galdos, L.; Abete, J. M.; Saenz de Argandona, E. (2020):** Integral Design and Manufacturing Methodology of a Reduced-Scale Servo Press. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, doi 10.1109/TMECH.2020.3039678.
- Prinz, C.; Kreggenfeld, N.; Kuhlenkötter, B. (2017):** Lean meets Industrie 4.0 – a practical approach to interlink the method world and cyber-physical world. *Procedia Manuf.*, 23 21–26, doi 10.1016/j.promfg.2018.03.155.
- Rauter, R.; Globocnik, D.; Perl-Vorbach, E.; Baumgartner, R.J. (2018):** Open innovation and its effects on economic and sustainability innovation performance. *Journal of Innovation & Knowledge*, doi 10.1016/j.jik.2018.03.004.
- Ray, P., Mac Donald, B.J. (2004):** Determination of the optimal load path for tube hydroforming processes using a fuzzy load control algorithm and finite element analysis, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 41, Heft 2, S. 173-192, doi 10.1016/j.finel.2004.03.005.
- Richter, T. (2013):** Latex-Template. <http://www.tortools.de/>, zuletzt geprüft am 22.05.2021.
- Sachs, G. Voegli, H.E. (1996):** Principles and Methods of sheetmetal fabricating. Reinhold Publishing, New York, ISBN 978-1-2588-0742-9.
- Schapitz, E. (1963):** Festigkeitslehre für den Leichtbau 2. Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Schmid, M.; Berger, S.; Reinhart, G. (2013):** Kognitiv-adaptive Regelungssysteme für effiziente Verarbeitungsmaschinen. 9. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, Univ. Heinz Nixdorf Institut, HNI-Verlagsschriftenreihe 310, S. 333-344.
- Schmidt, J.; Klüver, C.; Klüver, J. (2010):** Programmierung naturanaloger Verfahren. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, ISBN 978-3-8348-9666-7.

- Schulte, L.; Kuhnhen, C.; Abele, D.; Hoffmann, S.; Pinatti de Carvalho, F.; Engel, B.; Schweitzer, M; Wulf, V. (2017):** FE-simulation-based setting instructions for a rotary draw-bending machine. *Complas 2017*, Barcelona, 05.-11.09.2017.
- Schulte, L.; Kuhnhen, C.; Mathes, C.; Engel, B. (2018):** Cyberrüsten 4.0 – Analyse des Boosterkrafteinflusses auf die Biegebauteilgeometrie beim Rotationszugbiegen. 37. Verformungskundliches Kolloquium (03.03.-07.03.2018), Lehrstuhl für Umformtechnik, Montanuniversität Leoben, S. 156-161, ISBN 978-36-902078-23-0.
- Schulz, G. Graf, C. (2013):** Regelungstechnik 2 - Mehrgrößenregelung, Digitale Regelungstechnik, Fuzzy-Regelung. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH. ISBN 978-3-486-73615-1.
- Seide, P.; Weingarten, V. I.; Morgan, E. J. (1960):** Final report on the development of design criteria for elastic stability of thin structures. STL/TR-60-000-19425, Contr. No. AF 04(647)-619. Space Technol. Lab. Los Angeles.
- Selvaggio, A.; Dirksen, U.; Tekkaya, A. E.; Schikorra, M.; Kleiner, M. (2009):** Increasing the Production Accuracy of Profile Bending with Methods of Computational Intelligence. *Evolutionary Computation*, Vol. 17, Nr. 4, S. 561-576, doi 10.1162/evco.2009.17.4.17407.
- Simonetto, E., Ghiotti, A., Bruschi, S., Gemignani, R. (2017):** Dynamic detection of instability defects in tube rotary draw bending, *Procedia Manufacturing* 10 (2017) 319-328, doi 10.1016/j.promfg.2017.07.064.
- Spur, G.; Schmoeckel, D.; Stöferle, T. (1983):** Umformen. München, Hanser Verlag, Band 1. ISBN 3-44-612533-7.
- Steinheimer, R. (2006):** Prozesssicherheit beim Innenhochdruck-Umformen. Dissertation, Shaker-Verlag, ISBN 978-8322-4980-9.
- Stahl, D. (2002):** Rundbiegen von Strahlrohrprofilen – Ein Beitrag zur Rückfederungs- und Ovalisierungsprognose unter Anwendung künstlicher neuronaler Netze. Dissertation, VDI Verlag, Düsseldorf, ISBN 3-18-359502-8.
- Strano, M. (2005):** Automatic tooling design for rotary draw bending of tubes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26, Nr. 7-8, S. 733-740, doi 10.1007/s00170-003-2055-6.
- Swift, H. (1952):** Plastic instability under plane stress, *J. Mech. Phys. Solid* 1, S. 1–18.
- Tekkaya, A. E.; Allwood, J. M.; Bariani, P. F.; Bruschi, S.; Cao, J.; Gramlich, S.; Groche, P.; Hirt, G.; T. Ishikawa; Loebbe, C.; Lueg-Althoff, J.; Merklein, M.; Misiolek, W.Z.; Pietrzyk, M.; Shivpuri, R.; Yanagimoto, J. (2015):** Metal forming beyond shaping: Predicting and setting product properties. Band 64, Heft 2, S. 629f, doi 10.1016/j.cirp.2015.05.001.
- Thomas, O. (2009):** Fuzzy Process Engineering - Integration von Unschärfe bei der modellbasierten Gestaltung prozessorientierter Informationssysteme, Springer Gabler Edition Wissenschaft, ISBN: 978-3-8349-8220-9.

- 
- Volk, W.; Vogt, S.; Stahl, J.; Prauser, S. (2019):** Introduction to residual stresses in production technology. *Production Engineering Res. and Devel.*, S.1-3, doi 10.1007/s11740-019-00881-8.
- Weber, M. (1998):** Konstruktion und Darstellung von gebogenen Rohrleitungen. *Bänder Bleche Rohre*, Nr. 3, S. 43-52.
- Yang, H.; Yan, J.; Zhan, M.; Li, H.; Kou, Y. (2009):** 3D numerical study on wrinkling characteristics in NC bending of aluminum alloy thin-walled tubes with large diameters under multi-die constraints. *Comp. Mat. Sc.*, 45(4), 1052–1067, doi 10.1016/j.commatsci.2009.01.010.
- Yang, H.; Zhan, M.; Li, H. (2010):** Friction role in bending behaviors of thin-walled tube in rotary-draw-bending under small bending radii. *Journal of Mat. Processing Technology*, S. 2273-2284, doi 10.1016/j.jmatprotec.2010.08.021.
- Zadeh, L. A. (1988).** *Fuzzy Logic. Computer*, 21, S. 83-93.
- Zhang, Z., Yang, H., Li, H., Ren, N., Tian, Y. (2011):** Bending behaviors of large thin-walled CP-Ti tube in rotary draw bending. *Progress in Natural Science: Materials Int.* 21, 401-412, doi 10.1016/S1002-0071(12)60076-8.
- Züнкler, B. (1965):** Untersuchung des überlastischen Blechbiegens, von einem einfachen Ansatz ausgehend. In: *Bänder Bleche Rohre* 6 (9), S. 503–508.

**Normen**

- DIN 8580                      Fertigungsverfahren; Begriffe, Einteilung. Version 2003-09, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN 8586                      Fertigungsverfahren Biegeumformen. Version 2003-09, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN EN ISO 10217-7        Geschweißte Stahlrohre für Druckbeanspruchungen - Technische Lieferbedingungen, Teil 7: Rohre aus nicht-rostenden Stählen, Version 2015-01, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN EN ISO 50125          Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben. Version 2016-12, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN EN ISO 6892-1         Metallische Werkstoffe - Zugversuch. Version 2020-06, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- VDI 3430                     Rotationszugbiegen von Profilen, Version 2014-06, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- VDI 3431                     Biegen von Profilen - Prüfhinweise für Profilbiegebauteile, Version 2016-08, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- VDI 3432                     Rotationszugbiegemaschine, Version 2019-03, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- VDI 3550-2                  Computational Intelligence - Fuzzy-Logic und Fuzzy-Control - Begriffe und Definitionen, Version 2002-10, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

# A Anhang

## A.1 FE-Simulation des Reglerverhaltens

Zur Erprobung des Reglerverhaltens wurde eine FE-Simulation in Schritten von  $2,5^\circ$  diskretisiert und jeder Prozessschritt mit Hilfe des Regelungsprogrammes ausgewertet sowie entsprechend verändert. Dadurch wurde neben der Gegenhalterzustellung die Transportgeschwindigkeit als Aktor erprobt, siehe Abbildung A.1.

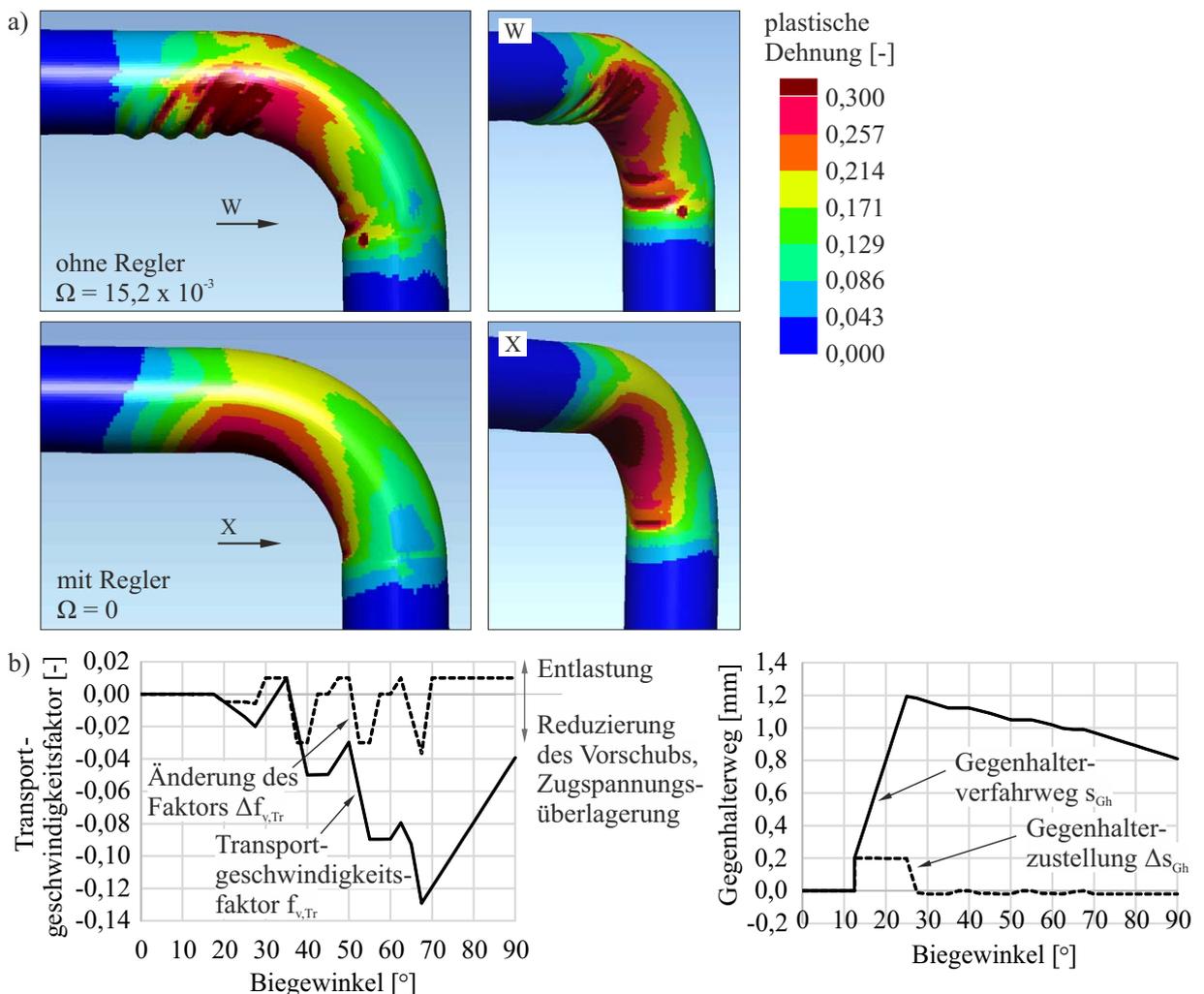


Abbildung A.1: Ergebnis der FE-Simulation (R-40x1-TR100) des Reglerverhaltens unter Einsatz der Gegenhalterzustellung und der Transportgeschwindigkeit als Aktoren.

Die Eingangsgrößen des Reglers wurden aus der FE-Simulation herausgespeichert, sodass anhand des Regelungsprogrammes die Ausgangsgrößen  $y_{s,Res1}$  und  $y_{s,Res2}$  berechnet werden konnten. Die Ausgangsgrößen wurden in dem nächstfolgenden Prozessschritt umgesetzt. Dieser Vorgang erfolgte iterativ für jeden Prozessschritt. Die Referenzsimulation (R-40x1-TR100) entsprach den Versuchen in Abbildung 6.11. Die Transportgeschwindigkeit wurde auf einen Faktor von  $f_{v,Tr} = 1,0$  eingestellt. Dadurch entstanden Falten sowohl im Primär- als auch im Sekundärbereich. Der Faltenbewertungsfaktor betrug  $\Omega = 15,2 \cdot 10^{-3}$ . Durch den Einsatz des Reglers konnte eine Verbesserung der Bauteilqualität mit einem Bewertungsfaktor von  $\Omega = 0$  erreicht werden, siehe Abbildung A.1 a).

Negative Steigungen im Verlauf der Dornkraftänderung lösten eine Reduzierung der Transportgeschwindigkeit aus. Kraftabfälle wurden durch Falten im Bogenbereich verursacht, die aus den Abständen zwischen den Dorngliedern herausgezogen wurden. Dies erfolgte in Intervallen, siehe Abbildung A.1 b). Durch die Verringerung der Transportgeschwindigkeit können Zugspannungen überlagert und den Falten entgegengewirkt werden. Die Falten müssen eine gewisse Höhe erreichen, um eine Kraftänderung zu verursachen. Im Gegensatz dazu kann die Rohrkonturmessung mittels Laser-Liniensensor die erste Falte bereits in ihrer Entstehung erfassen. Die Falten im geraden Rohrbereich wurden insbesondere mit Hilfe der Gegenhalterzustellung als Aktor verhindert.

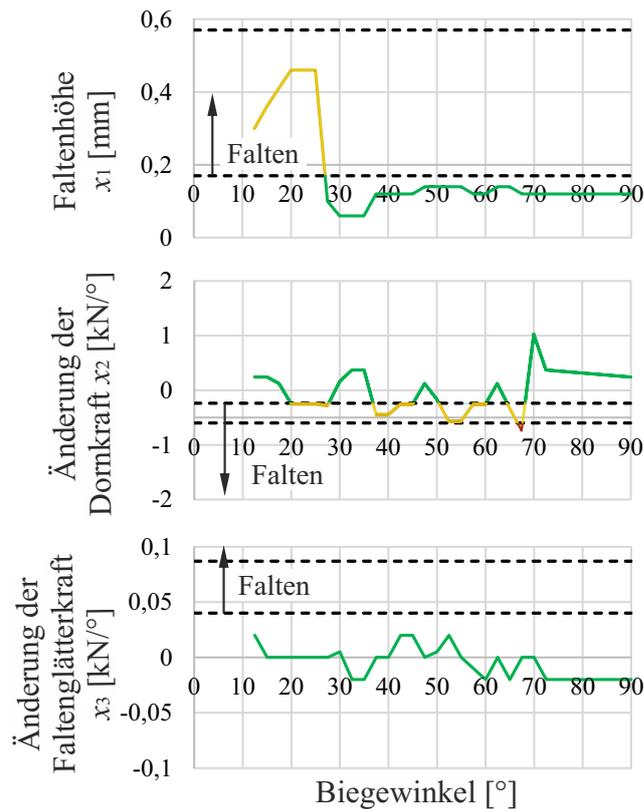


Abbildung A.2: Eingangsgrößen des Reglers aus der FE-Simulation (R-40x1-TR100).

## A.2 Produktionsregeln des Fuzzy-Reglers

Tabelle A.1: Produktionsregeln als Bestandteil der Regelbasis des Fuzzy-Reglers.

	Falten- höhe $x_1$		Änderung der Dornlängskraft $x_2$		Änderung der Faltenglätter- normalkraft $x_3$		Gegenhalter- zustellung $y_1 = \Delta s_{Gh}$		Änderung der Transport- geschwindigkeit $y_2 = \Delta f_{v,Tr}$
WENN	null	UND	negativ groß	UND	normal	DANN	null	UND	stark verkleinern
WENN	null	UND	negativ groß	UND	positiv klein	DANN	null	UND	stark verkleinern
WENN	null	UND	negativ groß	UND	positiv groß	DANN	null	UND	stark verkleinern
WENN	null	UND	negativ klein	UND	normal	DANN	null	UND	verkleinern
WENN	null	UND	negativ klein	UND	positiv klein	DANN	null	UND	verkleinern
WENN	null	UND	negativ klein	UND	positiv groß	DANN	positiv groß	UND	null
WENN	null	UND	normal	UND	normal	DANN	negativ klein	UND	leicht vergrößern
WENN	null	UND	normal	UND	positiv klein	DANN	positiv klein	UND	null
WENN	null	UND	normal	UND	positiv groß	DANN	positiv groß	UND	null
WENN	klein	UND	negativ groß	UND	normal	DANN	null	UND	stark verkleinern
WENN	klein	UND	negativ groß	UND	positiv klein	DANN	null	UND	stark verkleinern
WENN	klein	UND	negativ groß	UND	positiv groß	DANN	null	UND	stark verkleinern
WENN	klein	UND	negativ klein	UND	normal	DANN	null	UND	verkleinern
WENN	klein	UND	negativ klein	UND	positiv klein	DANN	null	UND	verkleinern
WENN	klein	UND	negativ klein	UND	positiv groß	DANN	positiv groß	UND	null
WENN	klein	UND	normal	UND	normal	DANN	positiv klein	UND	null
WENN	klein	UND	normal	UND	positiv klein	DANN	positiv klein	UND	null
WENN	klein	UND	normal	UND	positiv groß	DANN	positiv groß	UND	null
WENN	groß	UND	negativ groß	UND	normal	DANN	null	UND	stark verkleinern
WENN	groß	UND	negativ groß	UND	positiv klein	DANN	null	UND	stark verkleinern
WENN	groß	UND	negativ groß	UND	positiv groß	DANN	positiv klein	UND	verkleinern
WENN	groß	UND	negativ klein	UND	normal	DANN	positiv groß	UND	null
WENN	groß	UND	negativ klein	UND	positiv klein	DANN	positiv groß	UND	null
WENN	groß	UND	negativ klein	UND	positiv groß	DANN	positiv groß	UND	null
WENN	groß	UND	normal	UND	normal	DANN	positiv groß	UND	null
WENN	groß	UND	normal	UND	positiv klein	DANN	positiv groß	UND	null
WENN	groß	UND	normal	UND	positiv groß	DANN	positiv groß	UND	null

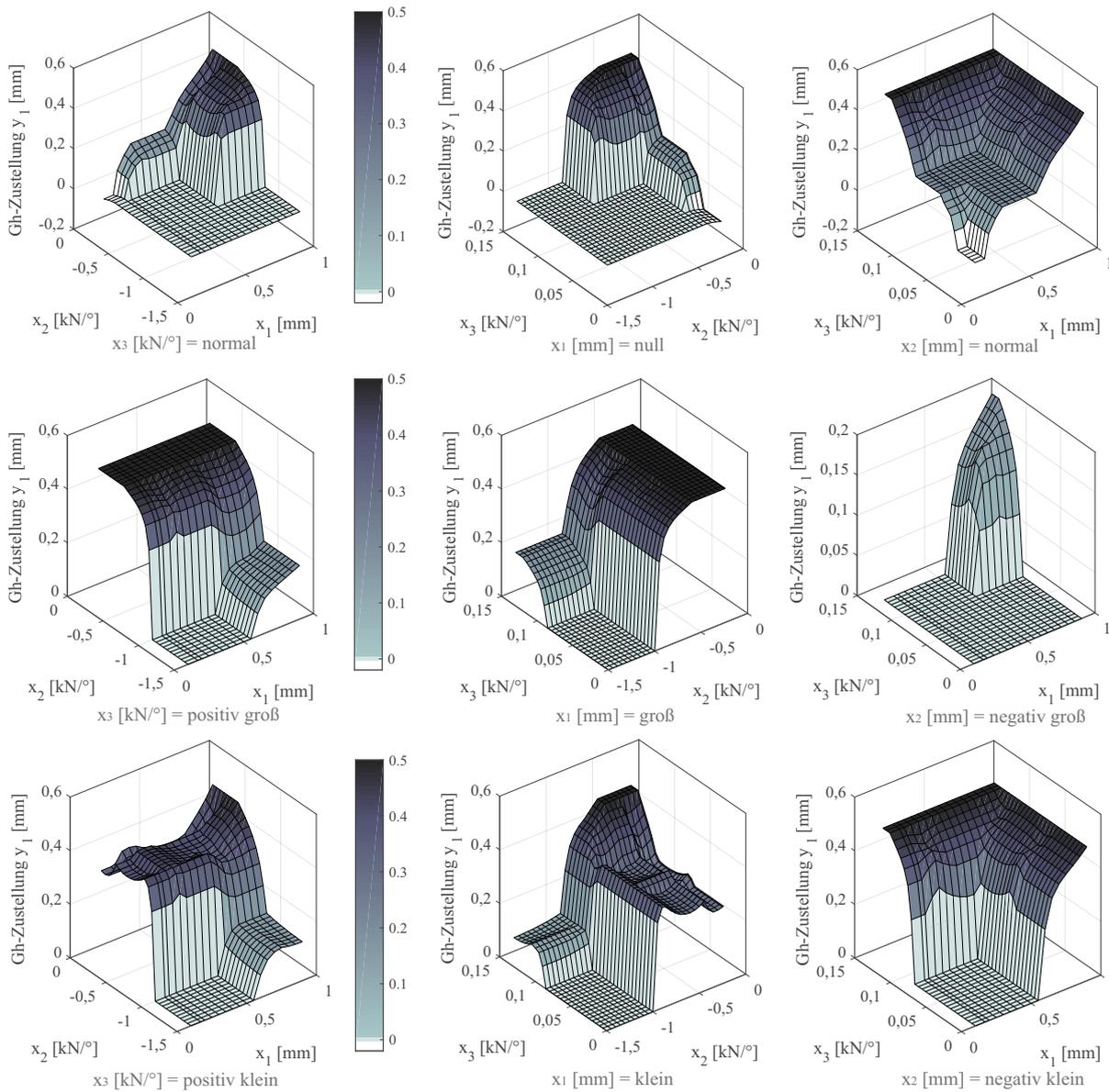


Abbildung A.3: Kennfelder der Ausgangsgröße Gegenhalterzustellung  $y_1 = \Delta s_{Gh}$  als Visualisierung der Produktionsregeln zur theoretischen Prüfung des Reglerverhaltens.

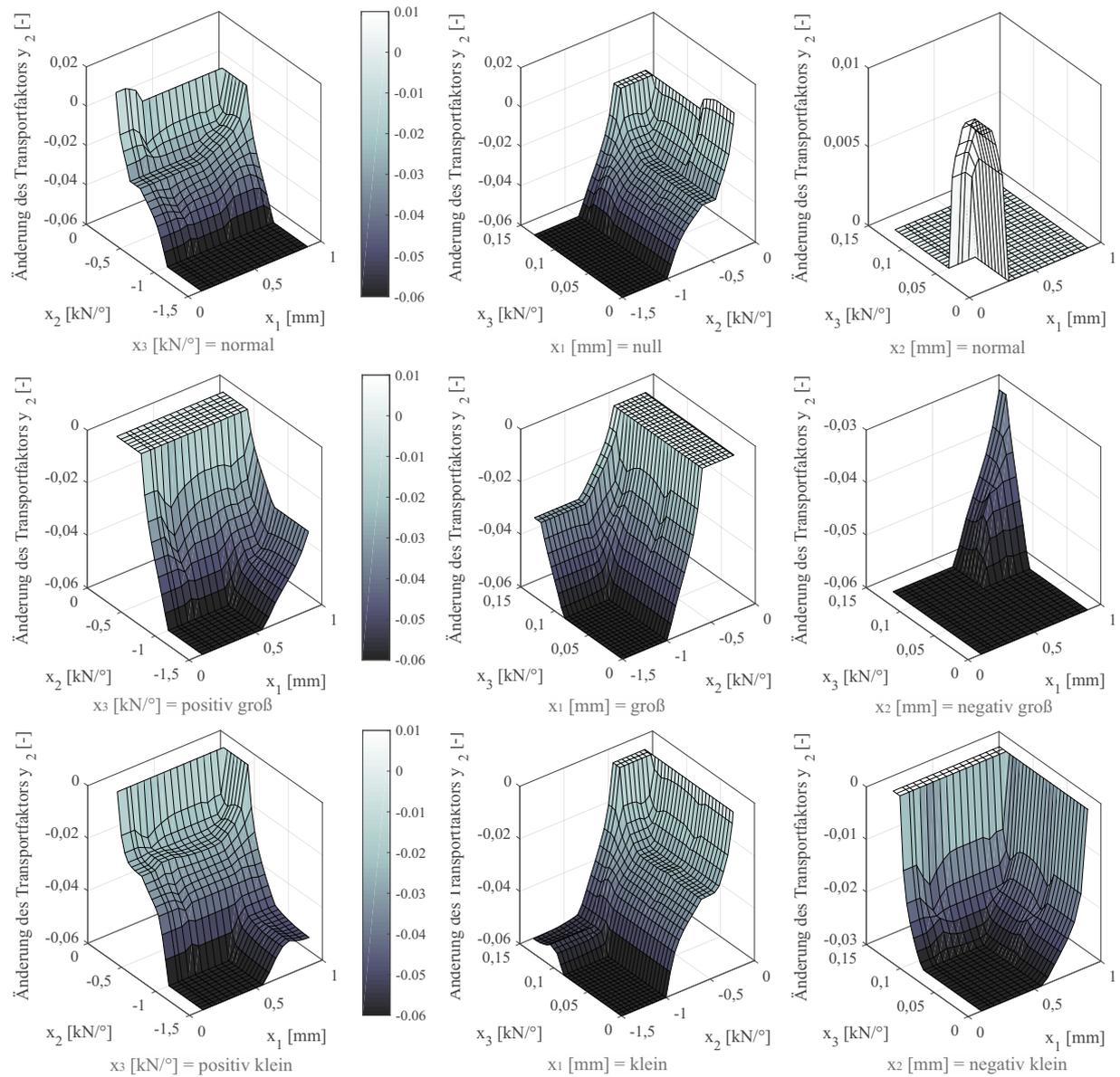


Abbildung A.4: Kennfelder der Ausgangsgröße Änderung des Transportfaktors  $y_2 = \Delta f_{v,Tr}$  als Visualisierung der Produktionsregeln zur theoretischen Prüfung des Reglerverhaltens.

### A.3 Auswertung der Faltenhistorie und der Kraftänderungen zur Bestimmung der Grenzen der Fuzzy-Mengen

Für die mit dem Laser-Liniensensor aufgezeichneten Rohrkonturen wurden die maximalen Faltenhöhen in Abhängigkeit des Biegewinkels bestimmt und in Tabelle A.3 dokumentiert. Im linken Bereich der Tabelle sind die Probenbezeichnungen, die Faltenbewertungsfaktoren und die subjektiv ermittelten Startzeitpunkte der Faltenbildung aufgeführt. Im rechten Bereich sind die ausgewerteten Faltenhöhen in Abhängigkeit des Biegewinkels eingetragen. Jede Zeile kann der Kategorie „keine Falten“, „kleine Falten“ oder „große Falten“ zugeordnet werden. Aus den Biegeversuchen wurde geschlussfolgert, dass sich die Verlagerung bis zu einem Biegewinkel von  $30^\circ$  eingestellt hat. Zur Berechnung der kritischen Faltenhöhe ohne Verlagerung wurde die betragsmäßige Y-Differenz zu der Koordinate des Biegewinkels  $30^\circ$  gebildet. Der Maximalwert definiert die Faltenhöhe  $f_h$  eines Biegewinkels (Beispiel  $f_{h,45^\circ} = \max(y_{45^\circ} - y_{30^\circ})$ ). Auf Basis der Faltenhöhen  $f_h$  erfolgte die Festlegung der Fuzzy-Mengen für die linguistische Variable Faltenhöhe. Die Grenzen der Fuzzy-Mengen mit einem Zugehörigkeitsgrad von 1 wurden durch Berechnung der Mittelwerte festgelegt. Für die Grenzen der Zugehörigkeitsgrade von 0 wurden Minima und Maxima berechnet.

Tabelle A.2 zeigt die Grenzen der Fuzzy-Menge „keine Falten“ für die drei Eingangsgrößen des Reglers. Die Mittelwerte und Minima bzw. Maxima wurden für jede Biegeaufgabe separat berechnet. Die Gesamtwerte bilden die Instabilitätsgrenzen der Eingangs-Fuzzy-Mengen des Reglers.

Tabelle A.2: Grenzen der Kategorie „keine Falten“ (Instabilitätsgrenzen).

$D \times s$ [mm]	Faltenhöhe		Änderung der Dorn-Längskraft		Änderung der Fg-Normalkraft	
	Mittelwerte	Maxima	Mittelwerte	Minima	Mittelwerte	Maxima
40x1	0,29	0,33	-0,26	-0,38	0,043	0,050
40x2	0,26	0,4	-0,27	-0,45	0,029	0,053
40x0,8	0,18	0,19	-0,16	-0,17	0,044	0,047
gesamt	0,24	0,4	-0,24	-0,45	0,039	0,053

Tabelle A.3: Übersicht über die Faltenhistorie. Die Tabelle enthält die mit dem Biegewinkel ansteigenden Faltenhöhen der untersuchten Biegeaufgaben.

Probenkurz- bezeichnung	Faltenbewer- tungsfaktor $\Omega$ [ $10^{-3}$ ]	Biegewinkel bei Faltenstart (Primärfalten)	Biegewinkel										
			35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	80°		
R-40x1-GH06	0	-	0,08	0,09	0,16	0,16	0,12	0,14	0,16	0,14	0,16	0,18	0,22
R-40x1-GH04	0	-	0,09	0,13	0,12	0,14	0,2	0,22	0,25	0,33	0,22	0,25	0,33
R-40x1-GH02	1,4	45°	0,16	0,13	0,2	0,57	0,73	0,6	1,5	0,66	1,5	0,66	1,73
R-40x1-GH0	3,1	35°	0,34	0,47	0,47	1,17	0,61	1,48	0,62	2,05	1,31	2,05	1,31
R-40x1-TR86	0	-	0,07	0,11	0,13	0,13	0,16	0,19	0,23	0,26	0,23	0,26	0,32
R-40x1-TR90	3,0	-(Sekundärfalten)	0,11	0,16	0,16	0,19	0,19	0,2	0,22	0,25	0,22	0,25	0,31
R-40x1-TR94	3,2	65°	0,11	0,11	0,2	0,21	0,22	0,28	0,3	0,56	0,3	0,56	0,81
R-40x2-GH08	0	-	0,1	0,13	0,11	0,16	0,15	0,17	0,11	0,14	0,11	0,14	0,17
R-40x2-GH06	0	-	0,09	0,14	0,16	0,21	0,2	0,24	0,25	0,26	0,25	0,26	0,26
R-40x2-GH02	6,8	65°	0,11	0,21	0,21	0,36	0,26	0,43	0,45	0,39	0,45	0,39	0,57
R-40x2-GH0	7,9	60°	0,3	0,28	0,75	0,44	0,65	1,3	1,25	1,17	1,25	1,17	1,04
R-40x2-TR86	0	-	0,09	0,15	0,15	0,18	0,16	0,15	0,18	0,19	0,18	0,19	0,19
R-40x2-TR90	0	-	0,1	0,12	0,15	0,19	0,18	0,25	0,25	0,29	0,25	0,29	0,26
R-40x2-TR98	0	-	0,13	0,17	0,17	0,11	0,19	0,34	0,27	0,19	0,27	0,19	0,4
R-40x2-TR100	2,5	65°	0,14	0,29	0,35	0,39	0,62	0,52	0,88	0,79	0,88	0,79	1,13
R-40x2-TR104	5,1	60°	0,14	0,16	0,16	0,38	0,15	0,61	0,35	0,75	0,35	0,75	0,6
R-40x08-GH03	0	-	0,13	0,15	0,12	0,14	0,25	0,19	0,17	0,13	0,17	0,13	0,19
R-40x08-GH01	0,8	65°	0,07	0,15	0,19	0,21	0,19	0,15	0,15	0,36	0,15	0,36	0,7
R-40x08-GH0	1,8	45°	0,1	0,2	0,41	0,5	0,49	0,49	0,51	0,51	0,51	0,51	0,55
R-40x08-TR80	0	-	0,11	0,15	0,23	0,18	0,07	0,23	0,25	0,22	0,25	0,22	0,17
R-40x08-TR86	0,5	45°	0,12	0,15	0,45	0,47	0,43	0,51	0,5	0,51	0,5	0,51	0,72
R-40x08-TR90	0,4	70°	0,16	0,19	0,26	0,12	0,1	0,23	0,13	0,51	0,13	0,51	0,81
R-40x08-TR94	1,4	70°	0,15	0,24	0,23	0,13	0,28	0,32	0,27	0,6	0,27	0,6	0,85

### A.4 Reibungskoeffizienten der Werkzeuge

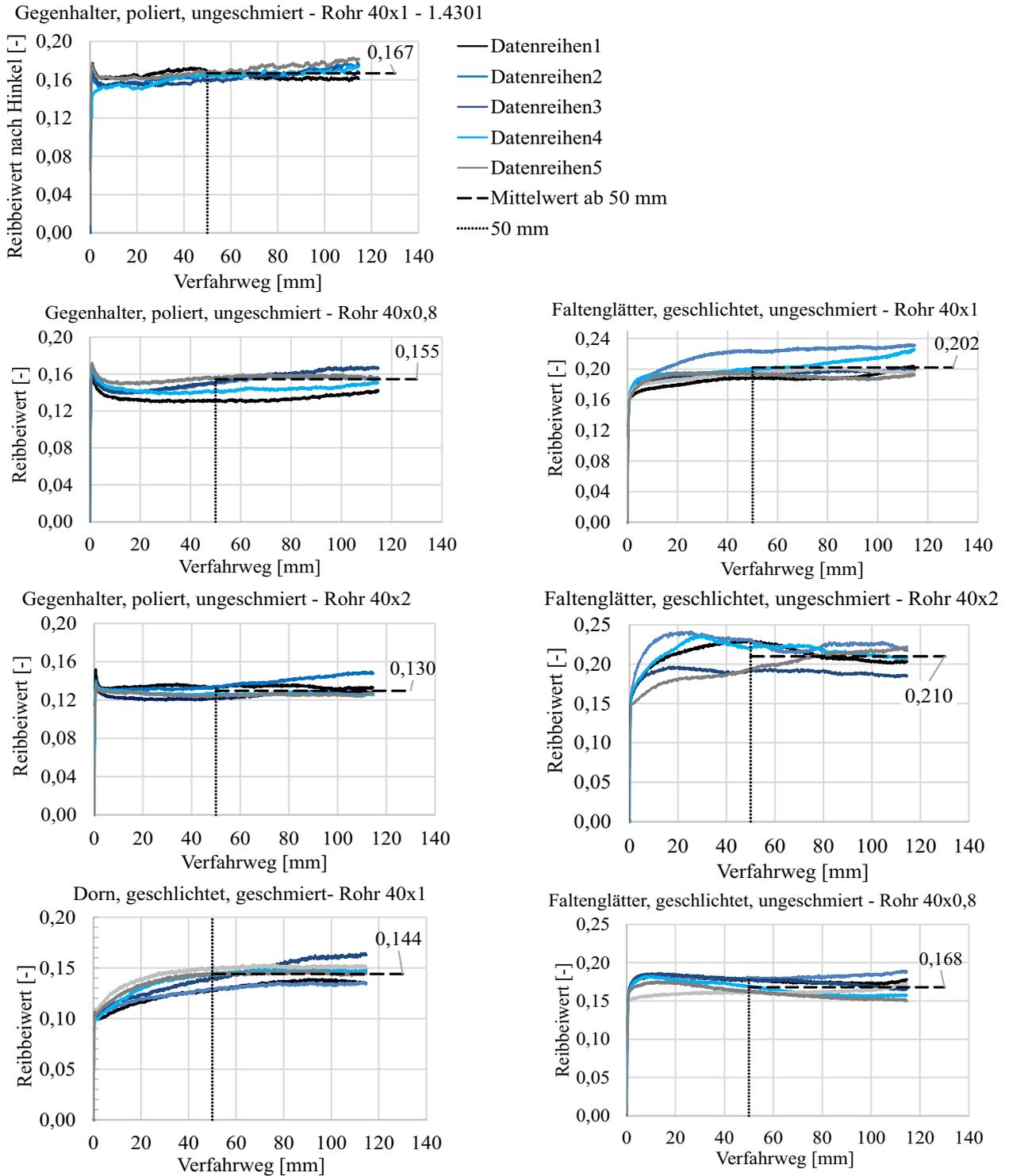


Abbildung A.5: Verläufe der Reibbeiwerte der Rotationszugbiegewerkzeuge in Kontakt mit den untersuchten Halbzeugen ermittelt in Rohrziehversuchen. (Teil 1)

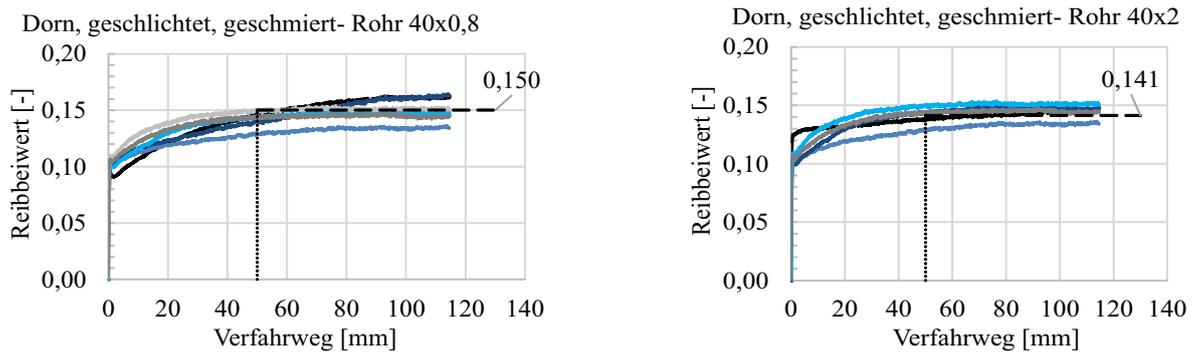


Abbildung A.6: Verläufe der Reibbeiwerte der Rotationszugbiegewerkzeuge in Kontakt mit den untersuchten Halbzeugen ermittelt in Rohrziehversuchen. (Teil 2)

## A.5 Beschleunigungsmessungen an der TN 120

Es wurden Rotationszugbiegeversuche unter Einsatz von Beschleunigungssensoren des Modells 356A16 mit einer Sensitivität von  $10,52 \text{ mV}/(\text{M}/\text{s}^2)$  und  $103,2 \text{ mV}/\text{g}$  und einem Ruhestrom von  $10,4 \text{ V}$  der Firma PCB PIEZOTRONICS EUROPE, Hückelhoven durchgeführt. Die Sensoren waren an der Aufnahme des Faltenglätters montiert, siehe Abbildung A.7. Die Vibrationen der hydraulischen Biegemaschine dominierten. Trotz Filter mit Frequenzen zwischen  $1 \text{ Hz}$  und  $50 \text{ Hz}$  waren keine faltensignifikanten Verlaufsänderungen erkennbar, siehe Abbildung A.8.

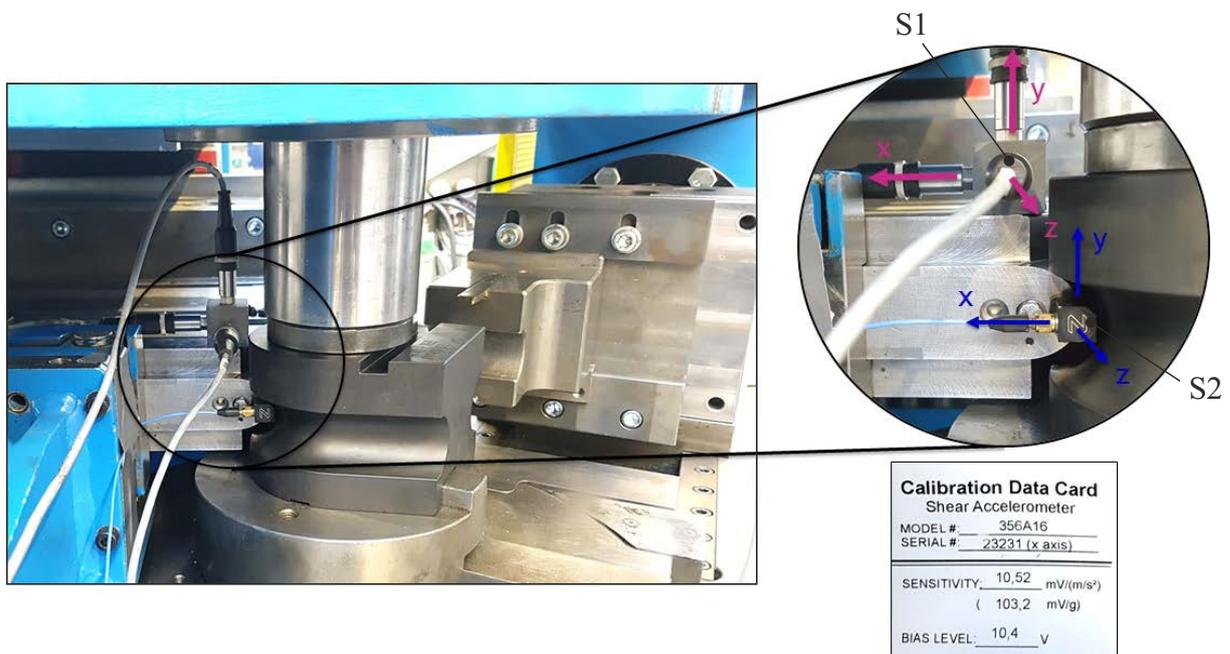
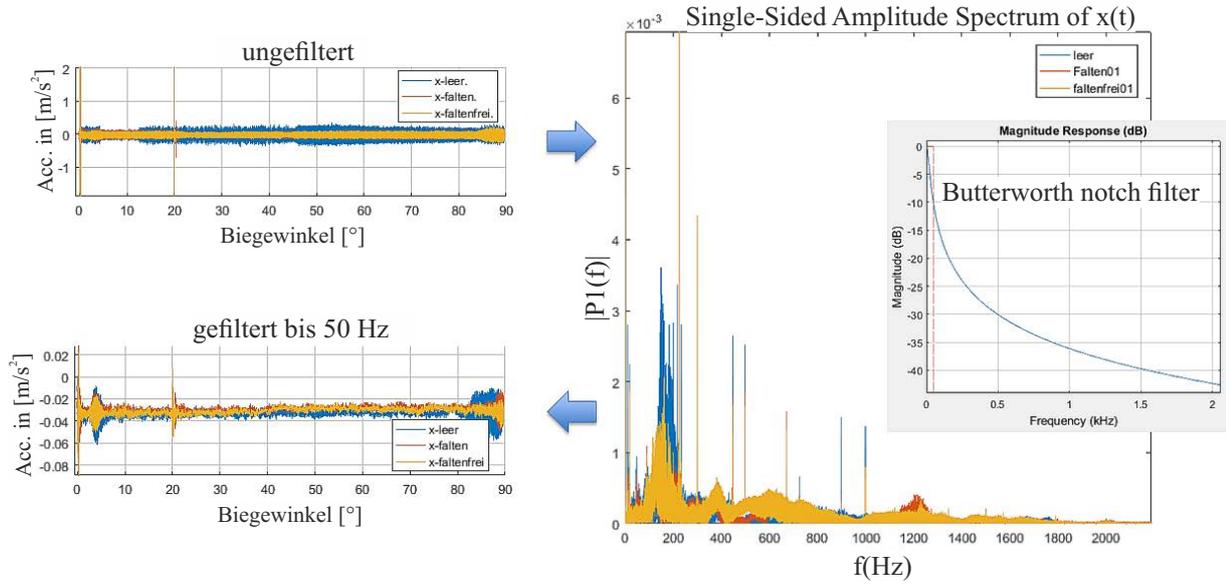


Abbildung A.7: Sensoranordnung der Beschleunigungsmessung.

Sensor 1 in x-Richtung



Beschleunigung gefiltert bis 50 Hz

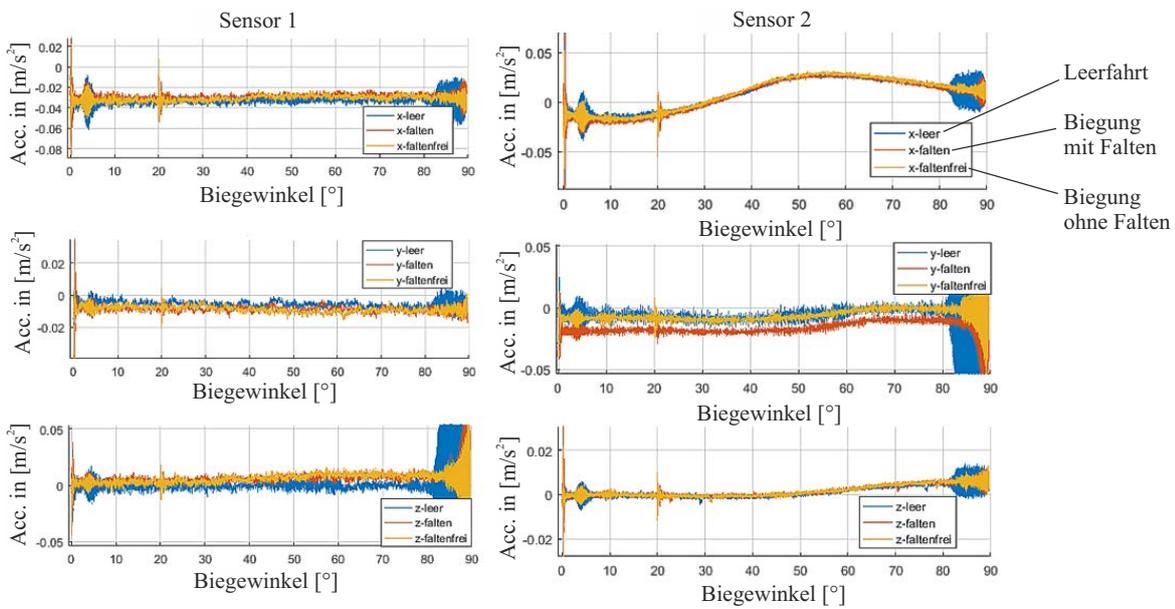


Abbildung A.8: Ergebnisse der Beschleunigungsmessungen von Biegungen ohne Rohr (Leerfahrten), Biegungen mit Falten sowie Biegungen ohne Falten.

## A.6 Bestimmung des Neigungswinkels für den Vergleich von Biegebauteilen mittels Faltenbewertungsfaktor

Abbildung A.9 zeigt die Verläufe der Neigungswinkel eines faltenfreien und eines faltenbehafteten Rohrbogens. Es werden Neigungswinkel  $\zeta_i > 0$  an dem faltenfreien Rohrbogen, aufgrund von Unterschieden im Krümmungsverlauf der Soll- und Istkontur und Toleranzen des Laserscanners am Koordinatenmessarm, gemessen. Die Sollkontur entspricht der CAD-Kontur des Rohrbogens mit idealen Krümmungssprüngen am Bogenein- und Austritt (A und B). Nach GROTH (2020) enthalten reale Rohrbögen Krümmungsübergänge, die nicht den idealen Krümmungssprüngen entsprechen können. Die Grenze des Neigungswinkels wurde auf 0,1 rad festgelegt (KUNHEN 2016), um die Krümmungsübergänge aus der Faltenbewertung herauszufiltern. Andersfalls können Differenzflächen eines faltenfreien Rohres, bspw. aufgrund von Radienunterschieden durch die Rückfederung und Toleranzen, als Falten ( $\Omega > 0$ ) bewertet werden.

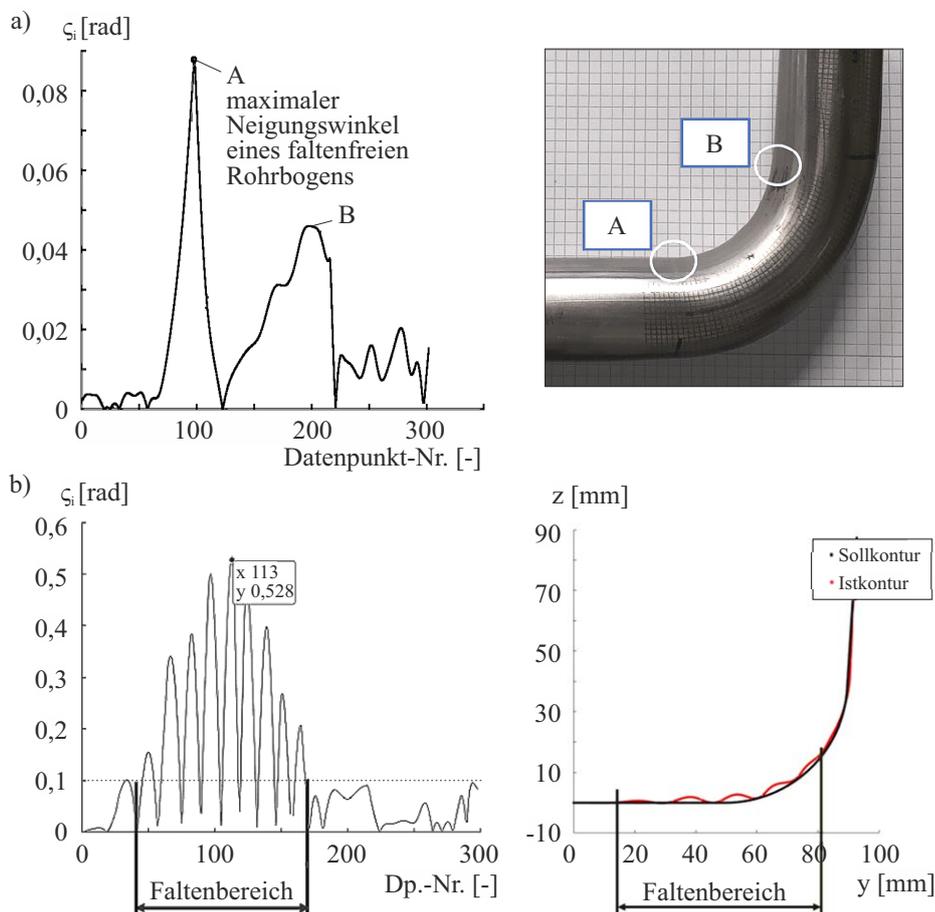


Abbildung A.9: a) Verlauf des Neigungswinkels eines faltenfreien Rohrbogens. b) Verlauf des Neigungswinkels eines faltenbehafteten Rohrbogens mit gekennzeichnetem, ausgewertetem Faltenbereich.



## Zum Band:

Die vorliegende Arbeit stellt eine wissensbasierte Methode vor, welche die Faltenbildung während des Rohrbiegeprozesses selbstständig verhindert. Die Umsetzung erfolgt mittels eines Fuzzy-Reglers, der Parameter zur Faltenvermeidung korrigiert und dabei die Gefahr der Rissbildung beachtet. Der in die Maschine integrierte und dauerhaft aktivierte Regler reagiert auf Schwankungen bspw. bei Werkstoff- und Chargenwechseln sowie Variation der Wanddicke.

## Zur Autorin:

Nach zehn Jahren beruflicher Tätigkeit im Kaltwalzwerksbau und einem berufsbegleitenden Bachelor- und Masterstudium Maschinenbau war Linda Borchmann wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Umformtechnik der Universität Siegen und Ansprechpartnerin für Biegeverfahren, insbesondere für das Rotationszugbiegen.