

Entwicklung einer Methodik zur Auslegung und Absicherung des Freiformbiegens mit be- wegter Matrize für dreidimensionale Biege- geometrien

Nikolas Viktor Beulich

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

Vorsitz:

Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk
2. Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel

Die Dissertation wurde am 21.04.2022 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 18.10.2022 angenommen.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der BMW Group am Standort Dingolfing verfasst und erfolgte in enger Kooperation mit dem Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk, Leiter des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München, für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die umfassende Unterstützung bei der Durchführung dieser Dissertation. Ohne die von ihm gewährten Möglichkeiten und Freiheiten wäre die Erarbeitung dieser Forschungsarbeit nicht möglich gewesen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel, Leiter des Lehrstuhls für Umformtechnik an der Universität Siegen, danke ich für die Übernahme des Koreferats, Herrn Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth für sein Interesse und die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Weiterhin gilt mein Dank allen Mitarbeiter*innen der BMW Group, die durch wertvolle Diskussionen und tatkräftige Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Allen voran seien hier meine Betreuer der Produkt- und Prozessplanung Dr. Josef Spörer und Andreas Tertel genannt. Den Herren Rainer Mertens, Dennis Petri und Robert Riskin danke ich für Ihre Studienarbeiten und die hervorragende Zusammenarbeit.

Seitens des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen möchte ich mich bei allen Mitarbeiter*innen für die freundschaftliche und produktive Zusammenarbeit bedanken. Und schließlich möchte ich meinen Eltern und Freund*innen danken, welche mich jederzeit während meines wissenschaftlichen Werdegangs unterstützt haben.

Nikolas Beulich

München, im April 2022

Kurzbeschreibung

Flexible Profilbiegeverfahren, wie das Freiformbiegen mit bewegter Matrize werden in der Automobilindustrie für die Herstellung von hochkomplexen Bauteilen eingesetzt. Im Rahmen der vorliegenden Dissertation soll für diese Verfahren eine Methodik erarbeitet werden, womit die Prognose der Bauteilherstellbarkeit in der frühen Phase der Produktentwicklung möglich ist.

Durch die Ausarbeitung eines detaillierten FEM-Simulationsmodells unter Berücksichtigung relevanter Prozessparameter konnte zunächst eine genaue, virtuelle Reproduktion verschiedener Versuchsbauteile erzeugt werden. Darauf aufbauend wurden durch Parameterstudien Ursache-Wirkungsketten abgeleitet, die neben der Erhöhung des Prozessverständnisses auch modellbasierte Prozessbeschreibungen erlauben. Die Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse auf das Biegen von Freiformgeometrien mit variablen Krümmungs- und Torsionsverläufen resultiert dabei in einer geometrisch basierten Kinematikberechnung, welche durch den gezielten Einsatz von Metamodellen eine genaue Prognose der Werkzeugbewegung der Biegematrize ermöglicht. Damit lässt sich die Prozessführung für neuartige Bauteilgeometrien zunächst berechnen, kompensieren und anschließend durch die FEM-Simulation bewerten. Des Weiteren konnte durch die gezielte In-Line Prozessparametererfassung ein Modell zur Prognose der Prozessfähigkeit des Freiformbiegeverfahrens aufgesetzt werden, was in der späteren Serienproduktion einen stabilen Produktionsprozess sicherstellt. Die beschriebenen Methoden wurde bis zur Serienreife weiterentwickelt, sodass nicht nur theoretische Inhalte erforscht wurden, sondern auch deren Anwendung in der industriellen Praxis sichergestellt ist.

Im Ausblick werden Möglichkeiten zur weiteren Optimierung der Freiformbiegetechnologie angeführt. Dabei sollte der Fokus zunehmend auf der Prozessdigitalisierung liegen, welche beispielsweise durch eine intelligente Prozesssteuerung und dessen In-Line Überwachung umgesetzt werden kann.

Executive Summary

Flexible profile bending processes, such as freeform bending with a moving die, are used in the automotive industry for the manufacture of highly complex components. Within the scope of this dissertation, a methodology for the prediction of component manufacturability in the early phase of product development has to be developed.

First of all, an accurate virtual reproduction of different test components could be generated by elaborating a detailed FEM simulation model taking into account relevant process parameters. On that basis, cause-effect chains were derived using parameter studies, enabling not only an increase in process understanding but also model-based process descriptions. The application of these results to the bending of free-form geometries with variable curvature and torsion curves leads to a geometrically based kinematics calculation, which enables an exact prediction of the tool movement of the bending die through the specific use of metamodels. In this way, the process control for novel component geometries can initially be calculated, compensated and then evaluated by the FEM simulation. Furthermore, a model for predicting the process capability of the free-form bending process could be set up using the data from selected in-line process parameters, which ensures a stable process in subsequent series production. The methods described were further developed until they were ready for series application, so that not only theoretical aspects were researched in this dissertation but also their application in industrial practice is ensured.

In the outlook, possibilities for further optimization of freeform bending technology are mentioned. The focus should increasingly be on further process digitization, which can be implemented, for example, through intelligent process control and in-line monitoring.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Kurzzeichen.....	XIII
Verzeichnis der Abkürzungen.....	XV
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen, Stand der Forschung und Technik	3
2.1 Grundlagen des Rohrbiegens	3
2.1.1 Halbzeuge	3
2.1.2 Begriffe am gebogenen Rohr	6
2.1.3 Methoden und Modelle zur Beschreibung von Biegeprozessen.....	7
2.1.4 Definition der Biegekontur	9
2.2 Übersicht der Biegeverfahren	10
2.2.1 Rotationszugbiegen	10
2.2.2 3-Rollen-Schubbiegen.....	12
2.3 Freiformbiegen mit bewegter Matrize.....	13
2.3.1 Prozessbeschreibung.....	13
2.3.2 Prozesseigenschaften	14
2.3.3 Biegekinematik	15
2.4 Modellierung von Rohrbiegeverfahren mittels FEM	16
2.4.1 Grundlagen Modellierung und Validierung	16
2.4.2 Prozessmodelle für das Freiformbiegen mit bewegter Matrize.....	17
2.5 Analytische Berechnung des Biegemoments am Rohr.....	18
2.6 Grundlagen der statistischen Prozess- und Messmittelqualifikation	19
2.7 Forschungsbedarf	21
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	23
4 Halbzeuge, Demonstrator, Versuchsanlagen, Messeinrichtungen	25
4.1 Biegeanlage.....	25
4.1.1 Biegemaschine	25
4.1.2 Biegewerkzeug.....	26
4.2 Messsysteme und -methoden.....	28
4.2.1 Messsysteme zur Charakterisierung der Werkstoffeigenschaften.....	28
4.2.2 Mobiles Universalmesssystem	28

4.2.3	Quantitative Bestimmung von Biegeverlauf und Biegekenngrößen	29
4.2.4	Inline-Messtechnik	33
4.3	Versuchshalbzeug, Werkstoff und Materialkarte	37
4.3.1	Charakterisierung des Ausgangsbleches	38
4.3.2	Charakterisierung des Halbzeugs	41
4.4	Demonstrator	43
5	Experimentelle Biegeversuche	47
5.1	Zweidimensionale Untersuchungen	47
5.2	Dreidimensionale Untersuchungen	50
5.3	Zusammenfassung der Erkenntnisse.....	53
6	Simulationsmodell für die Prozesskette Freiformbiegen	55
6.1	Modellierung der Halbzeugherstellung	56
6.2	Abbildung des Biegeverfahrens.....	59
6.3	Validierung und Bewertung der Ergebnisse.....	63
7	Prozesswirkmechanismen	71
7.1	Einfluss von Prozess- und Halbzeugparametern	71
7.2	Einfluss der Werkzeuggeometrie	75
7.3	Zusammenfassung und Gewichtung der Prozesseinflussfaktoren	78
7.4	Modellierung der Wirkmechanismen & Optimierung des Umformpotentials....	79
8	Methodik zur Auslegung von Biegebauteilen	85
8.1	Bestimmung des Prozessfensters	85
8.2	Definition und Diskretisierung der Biegelinie.....	87
8.3	Virtuelle Auslegung der Biegeprozesses	88
8.3.1	Methodik zur Definition des Biegekonzeptes.....	88
8.3.2	Berechnung der Prozesskinematik	92
8.3.3	Simulation des Zielbauteils	99
8.4	Validierung und Bewertung der Ergebnisse.....	100
9	Modell zur Bestimmung der Prozessrobustheit	103
9.1	Erfassung und Auswertung ausgewählter Prozessparameter	103
9.1.1	Prozessstreuung innerhalb einer Charge	106
9.1.2	Prozessreaktion beim Chargenwechsel.....	107
9.2	Numerisches Modell zur Abschätzung der Prozessfähigkeit	108

10	Potentiale der entwickelten Systeme im Produktiveinsatz	111
10.1	Absicherung der Bauteil-Herstellbarkeit in der Fahrzeug-Konzeptphase	111
10.2	Übernahme der Simulationsergebnisse für das Innenhochdruckumformen.....	112
10.3	Anwendung der Inline-Messtechnik in der Serienproduktion.....	114
11	Zusammenfassung und Ausblick.....	117
A	Abbildungsverzeichnis	121
B	Tabellenverzeichnis.....	125
C	Literaturverzeichnis	127
D	Normenverzeichnis	134
E	Studienarbeiten.....	135

Verzeichnis der Kurzzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
α	°	Biegewinkel
$\alpha_1 - \alpha_8$		Koeffizienten des Barlat-2000 Fließortes
β	°	Scheitelwinkel
b	mm	Bogenlänge
Bd_d	mm	Durchmesser des Biegedorns
Bd_{dtol}	mm	Abstand der BD zum Rohr umlaufend
Bd_{sa}	mm	Anzahl der Dornsegmente zusätzlich zum DE
Bd_{sb}	mm	Breite der Dornsegmente
Bd_{sp}	mm	Gliederspiel zw. den Dornsegmenten
Bd_l	mm	Länge des fixierten Dornsegments (DE)
Bd_{dval}	mm	Position des BD bzgl. der FM
Bf		Biegefaktor
Bm_d	mm	Innendurchmesser der Biegematrize
Bm_{dtol}	mm	Abstand der BM zum Rohr umlaufend
Bm_{ext}	mm	Drehpunktversatz der BM bzgl. kl. Durchmesser in x
Bm_{kval}	mm	Abstand zw. FM und BM in x-Richtung
Bm_r	mm	Innenradius der Biegematrize
Bm_{we}	°	Einlaufwinkel der Biegematrize
Bm_{wa}	°	Auslaufwinkel der Biegematrize
$CR_{C1,2}, CR_{\alpha1,2}$		Chaboche-Rousselier iso-kin. Materialparameter
D_a	mm	Rohraußendurchmesser
D_i	mm	Rohrinnendurchmesser
D_m	mm	Rohrdurchmesser in der Blechmitte
E	N/mm ²	Elastizitätsmodul
Fm_d	mm	Durchmesser der FM
Fm_{dtol}	mm	Abstand der FM zum Rohr umlaufend
Fm_r	mm	Auslaufradius der FM
Fm_{rl}	mm	Auslauflänge der FM
$f_{rel/min}$	%	Minimaler relativer Fehler
$f_{rel/mw}$	%	Mittlerer relativer Fehler
$f_{rel/max}$	%	Maximaler relativer Fehler

l	mm	Rohrlänge
m		Fließortexponent
r_0		Plastische Anisotropie in 0° zur Walzrichtung
r_{45}		Plastische Anisotropie in 45° zur Walzrichtung
r_{90}		Plastische Anisotropie in 90° zur Walzrichtung
r_{abs}	$^\circ$	Absolute Rotation der BM
r_a	mm	Radius des Rohraußenquerschnittes
r_i	mm	Radius des Rohrrinnenquerschnittes
r_y	$^\circ$	Rotation der BM um die y-Achse
r_z	$^\circ$	Rotation der BM um die z-Achse
rv_{abs}	$^\circ/s$	Absolute Winkelgeschwindigkeit der BM
rv_y	$^\circ/s$	Winkelgeschwindigkeit der BM um die y-Achse
rv_z	$^\circ/s$	Winkelgeschwindigkeit der BM um die z-Achse
R_a	mm	Biegeradius am Außenbogen
R_i	mm	Biegeradius am Innenbogen
R_m	mm	Biegeradius in der neutralen Faser
$R_{p0,2}$	N/mm ²	Dehngrenze
s_0	mm	Blechdicke im Ausgangszustand
s_a	mm	Blechdicke am Außenbogen
s_i	mm	Blechdicke am Innenbogen
σ_0	N/mm ²	Fließgrenze in 0° zur Walzrichtung
σ_{45}	N/mm ²	Fließgrenze in 45° zur Walzrichtung
σ_{90}	N/mm ²	Fließgrenze in 90° zur Walzrichtung
σ_b	N/mm ²	Fließgrenze unter Biaxialer-Spannung
σ_τ	N/mm ²	Fließgrenze unter Scherspannung
u_{abs}	mm	Absolute Auslenkung der BM
u_y	mm	Auslenkung der BM in y-Richtung
u_z	mm	Auslenkung der BM in z-Richtung
v_{abs}	mm/s	Absolute Geschwindigkeit der BM
v_y	mm/s	Geschwindigkeit der BM in y-Richtung
v_z	mm/s	Geschwindigkeit der BM in z-Richtung
Wf		Wanddickenfaktor
W_z	mm ³	Widerstandsmoment

Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
BD	Biegedorn
BM	Biegematrize
bzw.	beziehungsweise
FM	Führungsmatrize
MW	Mittelwert
DMS	Dehnungsmessstreifen
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFB	Freiformbiegen
IHU	Innenhochdruckumformen
konst.	konstant
RP	Rollprofilieren
vgl.	vergleiche
Trans.	Translation
Rot.	Rotation
EZV	Einachsiger Zugversuch
HTV	Hydraulischer Tiefungsversuch
ZDV	Zug-Druck-versuch
Std	Standardabweichung
Min	Minimum
Max	Maximum
BL	Bogenlänge

1 Einleitung

Der Trend in der Automobilindustrie zur Individualisierung einzelner Fahrzeuge und der damit verbundenen Umsetzung von extravaganen Designmerkmalen im Exterieur stellt die klassische Umformtechnik bei der Herstellung benötigter Karosseriebauteile vor neue Aufgaben. Um auch zukünftig wettbewerbsfähig bleiben zu können, sollen dabei sowohl die Kosten für Betriebsmittel gesenkt und die Designfreiheit der Bauteile bei den eingesetzten Umformverfahren erhöht werden. Dazu werden zunehmend innovative als auch neuartige Verfahren eingesetzt und verstärkt industrialisiert. Durch eine Erhöhung der Prozessgrenzen und der effizienten Prozessplanung sollen dabei auch Nachhaltigkeitsmaßnahmen umgesetzt werden. Diese können über die Erhöhung des Materialnutzgrades bis hin zur Vermeidung von Wärmebehandlungsprozessen reichen und somit neben Kosten auch natürliche Ressourcen und Energie einsparen. (Abele, Anderl und Birkhofer, 2005)

Spezielle Verfahren zum Biegen von Rohr- und Rechteckprofilen finden in der Industrie seit vielen Jahren Anwendung. Dabei umfasst deren Einsatzgebiet sowohl den Transport von Flüssigkeiten oder Gasen, als führender Mediumträger, sowie die strukturelle Verbindung mehrerer Bauteile in verschiedensten Industriezweigen, wie z.B. der Architektur, der Flugzeug- oder Automobilindustrie. Letztere setzt dabei vor allem auf hochkomplexe und funktionale Bauteile. Um diese Funktionalitäten durch ein leichtes und geometrieflexibles Hohlprofil darstellen zu können, kommt häufig das Verfahren des Innenhochdruckumformens zum Einsatz. Dabei wird ein gerades, oder auch gebogenes Rohr bzw. Profil nach dem Abdichten der offenen Enden unter Innendruck in eine Werkzeugkavitätur gepresst und somit eine plastische Formänderung hervorgerufen. Dieses Verfahren wird unter anderem bei der BMW Group im Werk Dingolfing eingesetzt, wobei verschiedenste maßhaltige Funktionsbauteile produziert werden (Wendt et al., 2005). Bei der Auslegung solcher Bauteile und zur optimierten Gestaltung der Prozesskette IHU und Rohrbiegen liegt der Fokus zunehmend auf der virtuellen Prozessgestaltung und Prozessabsicherung. Dies soll zunächst eine kosteneffiziente Produktausplanung, einen schnellen und präzisen Anlauf der Serienproduktion und eine robuste Serienproduktion über den Lebenszyklus von über 7 Jahren ermöglichen.

Im Stand der Technik sind dabei insbesondere virtuelle Methoden der klassischen Tiefziehtechnologie ausgiebig erforscht und beschrieben worden, welche eine gute Basis zur Methodenentwicklung für alternative Umformprozesse ermöglichen. Dazu gehören auch verschiedenste Biegeverfahren, deren Methodiken weniger detailliert, aber dennoch als aussagefähig beschrieben werden können. Der Schwerpunkt vergangener Arbeiten lag dabei vorwiegend auf der Erarbeitung von Simulationsmethodiken und deren Validierung anhand teils einfacher, zweidimensio-

naler Biegegeometrien.

Im Fokus dieser Arbeit soll zunächst ein reales Serienbauteil der BMW Group liegen, welches sich durch eine komplexe, mehrdimensionale Geometrie beschreiben lässt. Dabei gilt es die Vorprozesse zum Innenhochdruckumformen zu verstehen und detailliert zu beschreiben. Abgrenzend zum klassischen Rotationszugbiegen wird das genannte Bauteil durch das Freiformbiegen mit bewegter Matrize hergestellt. Das dabei angewendete Spezialverfahren zeichnet sich durch eine werkzeugunabhängige Formgebung aus, welche durch eine kinematisch-geregelte Biegematrize erzeugt wird. Zur methodischen Beschreibung des Verfahrens gilt es insbesondere das kinematische Bewegungsprofil der Biegematrize in Abhängigkeit der Prozessparameter und der gewünschten Zielgeometrie abzuleiten und mathematisch zu beschreiben. Dadurch soll neben einer Herstellbarkeit auch die Prozessrobustheit bewertet und prognostiziert werden.

Kern der Arbeit ist also die Methodenentwicklung zur virtuellen Herstellbarkeits- und Robustheitsbewertung von komplexen Biegebauteilen, die mittels Freiformbiegen mit bewegter Matrize hergestellt werden sollen. Dazu werden in Kapitel 2 zunächst der aktuelle Stand der Technik in Hinblick auf die Halbzeuge und die Prozessführung beim Freiformbiegen zusammengefasst und des Weiteren Methoden zur Charakterisierung von Biegeverfahren aufgeführt. Davon ausgehend werden in Kapitel 3 die Ziele und die Vorgehensweise dieser Arbeit zur Methodenentwicklung für das Freiformbiegen detailliert beschrieben. Startpunkt dafür ist zunächst eine detaillierte Charakterisierung der Prozessrandbedingungen und Parameter, sowie der Versuchsanlagen und eingesetzten Messmittel. Als Basis der Methodenentwicklung wird anschließend eine Simulationsmethode zum Freiformbiegen entwickelt (Kapitel 6) und anhand von Experimenten (Kapitel 5) validiert. Darauf aufbauende Sensitivitätsstudien, die der Erkennung und modellbasierten Ableitung relevanter Ursache-Wirkungsketten dienen, werden in Kapitel 7 dargestellt. In Kapitel 8 wird anschließend die Methodik zur Auslegung von Freiformbiegebauteilen beschrieben und validiert. Die Prognose der Prozessrobustheit (Kapitel 9) sowie die Überführung der entwickelten Methoden in den Produktiveinsatz (Kapitel 10) runden diese Arbeit ab.

2 Grundlagen, Stand der Forschung und Technik

Neben den typischen Blechumformverfahren, wie dem Tief- oder Streckziehen, gehört auch das Biegen von Blechen und Profilen zu den häufig eingesetzten Methoden in der Umformtechnik. Allgemein ist das Biegeumformen in DIN 8586 beschrieben und unterteilt die Vielzahl an Biegeverfahren nach der Art ihrer Werkzeugbewegung in geradlinig oder drehend (DIN 8586, 2003-09). Um die wissenschaftlichen Grundlagen für diese Arbeit zu erfassen, wird im Stand der Forschung zunächst auf die Methodik und Theorie des Rohrbiegens eingegangen, anschließend eine Übersicht der verschiedenen Biegeprozesse erstellt und zuletzt das Freiformbiegen mit bewegter Matrize ausführlich beschrieben. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt dabei auf dem Biegen von Rundrohren, weshalb die im Weiteren beschriebenen Kennzahlen und Methoden darauf bezogen werden.

2.1 Grundlagen des Rohrbiegens

2.1.1 Halbzeuge

Die Halbzeuge beim Rohrbiegen werden in der Automobilindustrie üblicherweise nicht selbst produziert, sondern durch einen etablierten Lieferantenmarkt bereitgestellt. Dadurch ist der Prozess der Rohrherstellung nicht direkt in die Prozesskette des Biegeumformens eingebunden. Je nach Spezifikation des benötigten Rohres kann der Rohrhersteller eines von vielen Fertigungsverfahren auswählen. Eine Übersicht möglicher Prozesse zur Herstellung von Rohren ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Nach Breitenbach lassen sich die Fertigungsverfahren in die Kategorien Urformen, Umformen und Umformen mit Montage einteilen (Breitenbach, 2007).

Die am weitesten verbreiteten Herstellungsmethoden für nachfolgende Biegeoperationen sind dabei das Platineneinformen aus gewalzten Blechabschnitten, das Rollprofilieren aus Blechband und das Strangpressen. Insbesondere der Werkstoff, die Rohrmaße und auch die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Verfahren entscheiden über deren Anwendung bei einem spezifischen Produkt. Dabei können durch Strangpressen eines Knüppels oder einer Stange vorwiegend Nichteisenmetalle, wie Aluminium oder Kupfer zu nahtlosen, gezogenen und vor allem dickwandigen Rohren weiterverarbeitet werden. Rohre aus Stahl können hingegen nur schwer mittels Strangpressen hergestellt werden, weshalb diese vorwiegend durch Rollprofilieren eines Blechbandes mit abschließendem Längsnahtschweißen gefertigt werden. Eine Nachbearbeitung der Rohre ist bei vielen Herstellungsprozessen möglich oder auch notwendig und kann z.B. durch Kaltziehen, Pilgern oder Kalibrieren erfolgen (Brensing und Sommer, 2005). Die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Halbzeuge werden aufgrund der geringen Wandstärke, der erforderlichen Ferti-

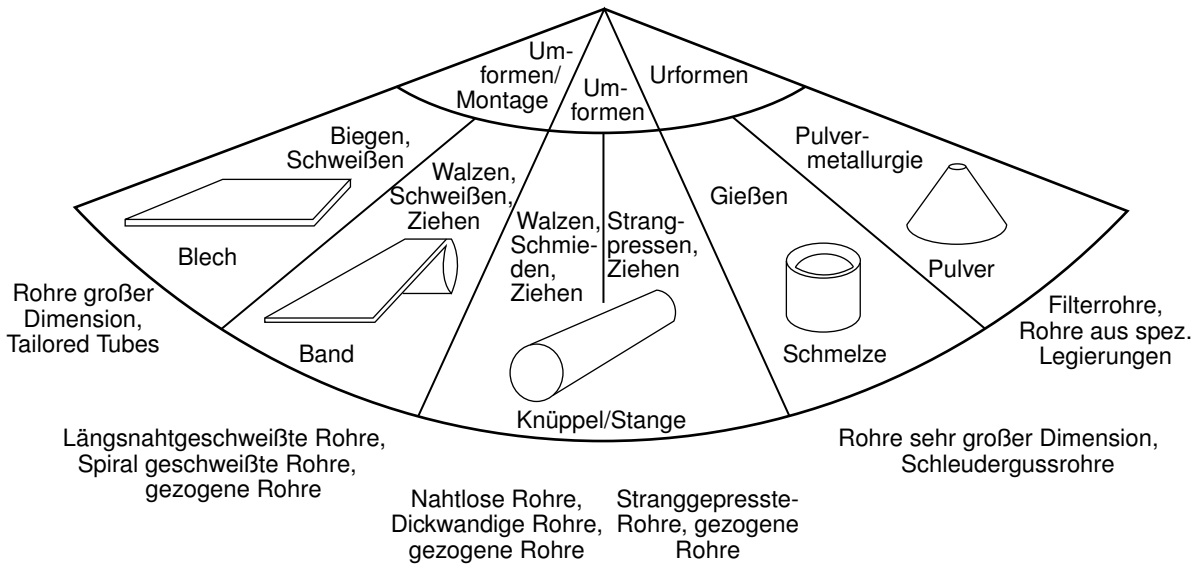


Abbildung 2.1: Verfahren zur Herstellung von Rohren (mod. von (Breitenbach, 2007))

gungstoleranzen und der eingesetzten Werkstoffe durch Rollprofilieren hergestellt (DIN 10305, 2010). Dieser Prozess wird auch kontinuierliche Rohreinformung genannt und ist in Abbildung 2.2 skizziert.

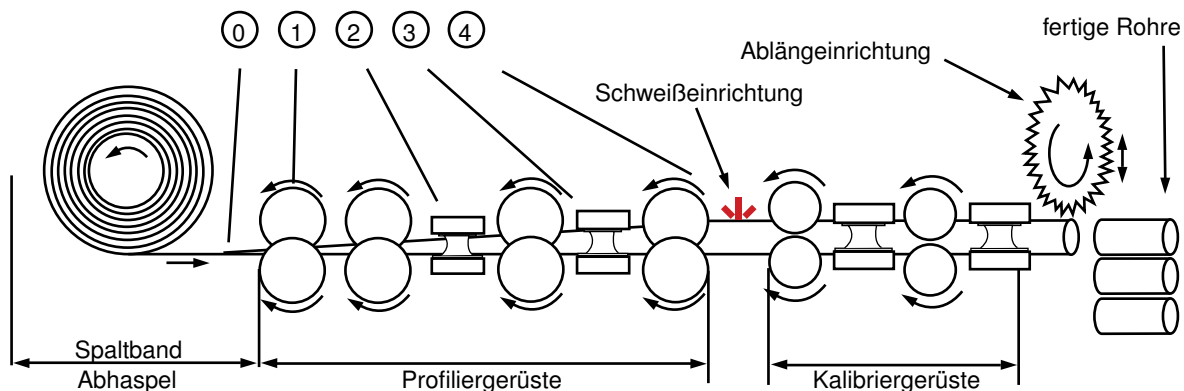


Abbildung 2.2: Verfahrensablauf - Rohrherstellung mittels Rollprofilieren (mod. von (Breitenbach, 2007))

Bei Position (0) wird zunächst das Blechband abgewickelt und dem Profiliergerüst (1) zugeführt. Durch eine gezielte Positionierung und Auslegung der Rollenpaare erfolgt eine gleichmäßige Einformung des Werkstoffes bis zum Schweißgerüst (4). Dort werden die Bandkanten zueinander ausgerichtet und mittels Laser- oder Hochfrequenzschweißen verbunden. Häufig erfolgt eine Überwachung des Schweißprozesses mittels Thermographie oder eine anschließende Schweißnahtprüfung mittels Ultraschall. Ist der Schweißvorgang abgeschlossen muss das Rohr kalibriert werden, um Unförmigkeiten auszugleichen und lokale Spannungsspitzen abzubauen.

Nach dem Trennen des Endlosbandes erfolgt das Ab stapeln der Rohre in Behälter.

Generell gibt es verschiedene Strategien zur Einförmung von Rohren (Groche und Breitenbach, 2008), deren Auswahl und Anwendung bei der Rohrherstellung vorwiegend auf Expertenwissen beruht. Die verschiedenen Profiliermethoden wurden von Breitenbach (Breitenbach, 2007) untersucht und die produzierten Halbzeuge hinsichtlich verschiedener mechanischer Eigenschaften beschrieben. Dabei stellte er einen Anstieg der kumulierten plastischen Vergleichsdehnung auf bis zu 18 % fest, wobei die höchsten Werte immer an den Bandkanten gemessen wurden. Bei der Analyse des Rollprofilierens in weiteren Arbeiten wurden diese Untersuchungen bestätigt und ebenfalls der Einfluss von spannungsbehafteten, kaltverfestigten Halbzeugen auf die Umformigenschaften in Folgeprozessen beschrieben (Beulich, 2016; Koc, 2008). Durch eine Optimierung der Profilierstrategie konnte Breitenbach des Weiteren das verbleibende Formänderungsvermögen um bis zu 4,9 % gegenüber zuvor geprüften Rohrabschnitten erhöhen.

Die Prüfung der Rohre zur Bewertung der Produktionsqualität erfolgt derzeit üblicherweise anhand standardisierter Versuche, welche auch im BMW Group Standard definiert sind (BMW Group Standard GS 93040, 2016-06). Die mechanischen Kennwerte werden dabei durch einen Zugversuch in Längsrichtung des Rohres aufgenommen. Die verwendete Probenform ist äquivalent zur Zugversuchsprobe am ebenen Blech nach DIN 50125 (2009-07) standardisiert. Bei der Versuchsauswertung und Berechnung der auftretenden Spannungen muss allerdings die Krümmung der Probe gemäß DIN EN ISO 6892-1 (2009-12) mitberücksichtigt werden. Neben dem Zugversuch ermöglicht der Rohr-Aufweitversuch nach DIN EN ISO 8493 (2004-10) eine Abschätzung des Umformvermögens des Halbzeugs. Er wird vorwiegend bei Präzisionsrohren verwendet, die in Umformprozessen weiterverarbeitet werden. Die Bewertung der Schweißnahtqualität auf Stabilität und Rissempfindlichkeit wird durch den Ringfaltversuch nach DIN EN ISO 8492 (2014-03) überprüft. Die Materialkennwerte für die Anwendung in der FEM-Simulation können mittels des Rohr-Zugversuches, des Ring-Hoop-Tests (Barsoum und Ali, 2015; Dick und Korkolis, 2014) oder des Rohr-Berstversuches (Hielscher, 2001) ermittelt werden. Abschließend ist festzuhalten, dass die eingesetzten Halbzeuge neben der auftretenden Kaltverfestigung auch eine inhomogene Verteilung von Blechdicke, Rundheit und Festigkeit über den Rohrumfang aufweisen, welche aus dem Herstellungsprozess resultiert (Vatter, 2014; Breitenbach, 2007).

Zur virtuellen Absicherung des Produktionsprozesses wurden die zwei kommerziellen FEM-Programme Data M - Copra RF und Ubeco Profil entwickelt. Dabei gilt die Software Copra RF als Marktführer in diesem Bereich und erlaubt sowohl die Auslegung als auch Simulation von Rollprofilierstrecken. Dieses Programm wurde auch von Groche, Breitenbach et al. (2016) und

Breitenbach (2007) bei ihren Untersuchungen verwendet und zeigte eine gute Übereinstimmung zum Experiment. Neben zwei weiteren Simulationsansätzen von Fei-chin und Oladipo (2000) und Sheikh und Palavilayil (2006) konnte in weiterführenden Arbeiten aufgezeigt werden, dass spannungsbehaftete, rollprofilierte Rohre zu veränderten Umformeigenschaften beim Biegen führen (Beulich, 2016).

2.1.2 Begriffe am gebogenen Rohr

Die grundlegenden Begriffe am gebogenen Rohr wurden von Franz (1961) anhand des Querkraftfreien-Biegens abgeleitet und sollen in Abbildung 2.3 veranschaulicht dargestellt werden.

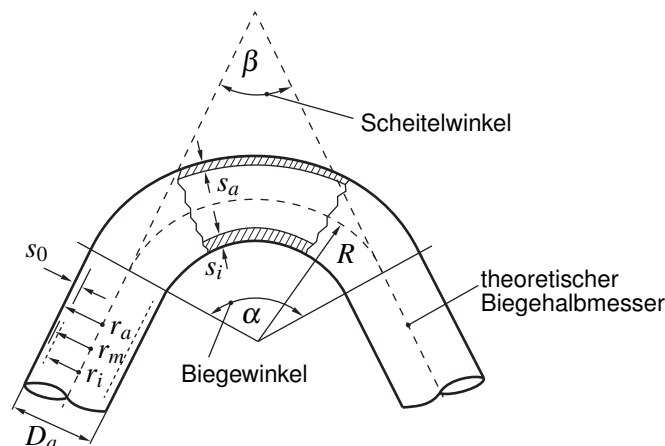


Abbildung 2.3: Grundlegende Begriffe am Rohrbogen (mod. von (Franz, 1961))

In der Theorie des Rohrbiegens wird durch das Aufbringen eines Biegemomentes am Rohr eine Formänderung erzielt. Dabei wird generell von einer ungelängten Schicht in der Mitte des Halbzeugs, der neutralen Faser, ausgegangen. Unter dieser Annahme lassen sich die grundlegenden Maße einer Biegung beschreiben, der Biegeradius (Radius der neutralen Faser) und der Biegewinkel. Die Verformung des Rohres resultiert in einer Stauchung des Werkstoffes am Innenbogen und in einer Abflachung am Außenbogen. In Abhängigkeit von Werkstoff, Halbzeuggeometrie und Stärke der Biegung ergibt sich auch eine Verschiebung der neutralen Faser in Richtung der Bogeninnenseite, was insbesondere zu einer Veränderung von Biegemomenten und Kraftverläufen führt. Zur besseren Beschreibung und dem Vergleich verschiedener Biegeverfahren wurden von Engel, Gerlach und Cordes (2008) die zwei Kennzahlen Biegefaktor (Formel 2.1) und Wanddickenfaktor (Formel 2.2) eingeführt.

$$B_f = \frac{R}{D_a} \quad (\text{Formel 2.1})$$

$$W_f = \frac{D_a}{s_0} \quad (\text{Formel 2.2})$$

Eine Zusammenfassung verschiedener Fehlerbilder, wichtiger Begriffe in der Biegetechnik und Richtlinien zur Vermessung oder Prüfung von Biegebauteilen ist in der VDI-Norm 3431 festgehalten (VDI-Richtlinie 3431, 2016-08).

2.1.3 Methoden und Modelle zur Beschreibung von Biegeprozessen

Bei einer elastisch-plastischen Formänderung, wie sie bei der Blechumformung vorliegt, lässt sich die gesamte Umformung in einen elastischen und einen plastischen Anteil zerlegen. Diese wurden von Franz auf den Rohrbogen übertragen (Abbildung 2.4).

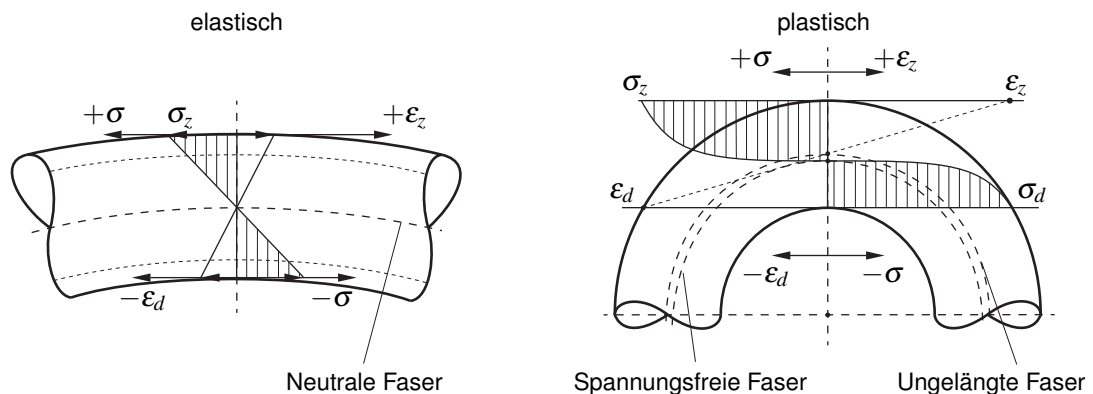


Abbildung 2.4: Spannungsverhältnisse am idealen Rohrbogen (mod. von (Franz, 1961))

Dabei ist zu erkennen, dass die spannungsfreie Faser im Falle der rein-elastischen Biegung der ungelängten Faser in der Rohrmitte entspricht. Bei der elastisch-plastischen Umformung ergibt sich dann die vorher beschriebene Verschiebung der spannungsfreien Faser in Richtung des Krümmungsmittelpunktes. Erste plastomechanische Berechnungen am Rohrbogen zur Abschätzung von Biegemomenten wurden von Khodayari (1993) eingeführt. Die beschriebenen Methoden basieren dabei auf analytischen Modellen, die neben diversen Annahmen auch die Verschiebung der neutralen Faser vernachlässigen. Erweitert wurden diese Modelle von Engel, Gerlach und Cordes (2008) durch die Mitberücksichtigung von Werkzeugkomponenten der Biegemaschine, wie Biegedorn oder Gleitschiene. Dadurch konnte neben dem für die Umformung notwendigen Biegemoment auch das ideelle Biegemoment der Biegemaschine errechnet werden. Neuere Forschungsberichte beschäftigen sich darüber hinaus mit der Abschätzung der Querschnittsdeformation und der Berechnung von Blechdickenveränderungen (E und M. Chen, 2010; E, J. Chen und Yang, 2013; Śloderbach, 2014). Hassan (2017) entwickelte des Weiteren

ein analytisches Modell mit Berücksichtigung der Faserverschiebung, wodurch die Prognosegüte der Berechnung verbessert werden konnte. Die Validierung der Berechnungen erfolgte sowohl durch Versuche als auch durch den Vergleich mit Simulationsergebnissen. Gerlach wendet die bestehenden Modelle beim sog. Drei-Rollen-Schubbiegen an, wobei er zunächst die Rückfederung des Rohres nach der Umformung berechnet. Anschließend erfolgt die Kompensation der Rückfederung durch Umkehr des elastischen Anteils des Biegemomentes und der iterativen Lösung des Gleichungssystems. Durch die Einbeziehung der Prozesskinematik in den Berechnungsablauf konnte der Erprobungsaufwand bei der Herstellung von neuen Biegekonturen verbessert werden. (Gerlach, 2010) Murata berechnete für das Freiformbiegen mit bewegter Matrize neben dem Biegemoment auch die Reaktionskräfte auf die umformenden Werkzeuge. Durch eine iterative Verschiebung der neutralen Faser im Gleichungssystem konnte Murata und Aoki (1996) anschließend die Prozesskinematik prognostizieren, wobei nur für einen Teilbereich des Prozessfensters gute Ergebnisse erzielt wurden. Neben numerischen Modellen auf Basis der FEM (Abschnitt 2.4.2), wurden auch automatisierte Auslegungsmethoden (Strano, 2005; Engel und Hinkel, 2011) und Modelle zur Abschätzung von Faltenbildung und Rissentstehung (Liu et al., 2016) entwickelt. Dadurch konnte sowohl die Auslegung der Biegeprozesse als auch die Herstellbarkeitsbewertung verbessert werden.

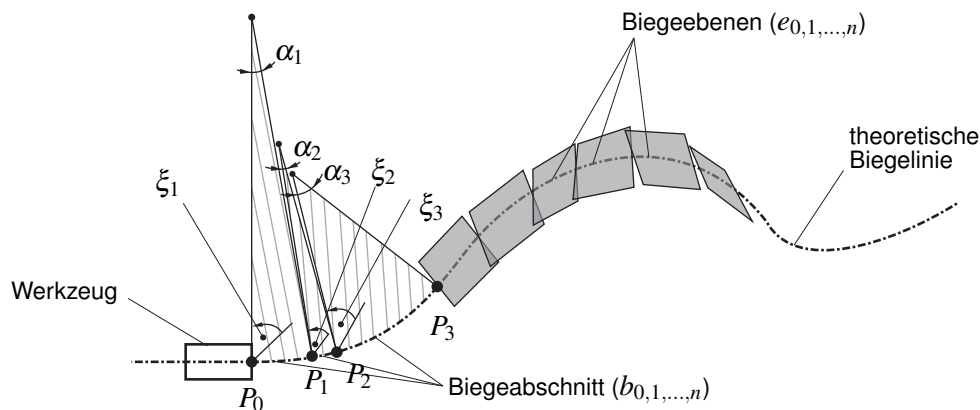


Abbildung 2.5: Definition von mehrdimensionalen Biegeoperationen (mod. von (Landgrebe et al., 2015))

2.1.4 Definition der Biegekontur

Allgemein wird ein Biegebauteil anhand der sogenannten Biegelinie definiert, welche den Verlauf der Schwerpunktschwerachse des gewählten Profilquerschnittes beschreibt. Durch die Aufteilung der Biegelinie in Biegeebenen lässt sich der Biegeprozess definieren und der Ablauf der aneinander folgenden Biegungen wird in der Biegetabelle festgehalten. (VDI-Richtlinie 3430, 2014-06) Diese Definition des Prozessablaufes ist nicht mehr möglich, wenn die Biegelinie durch eine mehrdimensionale Raumkurve beschrieben wird, bei der keine klare Definition der einzelnen Biegeebenen vorliegt. Im Allgemeinen wird so ein Biegeablauf auch Freiformbiegung genannt, wobei keine genaue Definition des Begriffes vorliegt. Landgrebe hat die räumliche Definition der Freiformbiegung in Abbildung 2.5 dargestellt, in der die theoretische Biegelinie durch eine unbestimmte Anzahl von Biegeebenen beschrieben wird. Dies zeigt auch die Schwierigkeit beim Freiformbiegen, da derzeit kein Standard zur Definition dieser Biegegeometrien existiert und somit jedes Biegeverfahren eine unterschiedliche Konturdefinition aufweist. (Landgrebe et al., 2015)

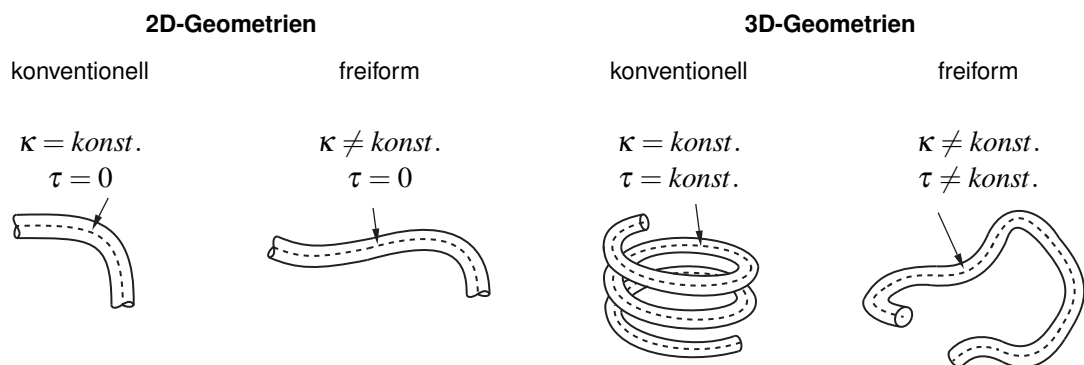


Abbildung 2.6: Beispiele für konventionell und freiformgebogene Rohre mit unterschiedlicher Komplexität (mod. von (Vatter, 2014))

Die sogenannten Freiformbiegeverfahren unterscheiden sich generell von herkömmlichen Biegeverfahren in der Art der Formgebung und der Steuerung des Konturablaufes der Biegegeometrie. Eine beispielhafte Übersicht wurde von Vatter (2014) erstellt (Abbildung 2.6). Dabei ist ersichtlich, dass herkömmliche Biegekonturen, wie sie z.B. mittels Rotationszugbiegen hergestellt werden können, in einer Ebene und mit konstantem Biegeradius verlaufen. Bei ansteigendem Komplexitätsgrad des Konturablaufes werden sowohl die Biegerichtung, die Biegeebene und auch die Verdrehung des Profilquerschnittes miteinander verknüpft, damit eine möglichst gute Annäherung an die gewünschte Bauteilgeometrie erreicht wird. Abhängig von der Profilkomplexität erfolgt auch die Auswahl eines geeigneten Biegeprozesses, welcher die zur Abbildung

der Profileigenschaften benötigten Freiheitsgrade besitzt.

Für eine vollständige dreidimensionale Biegung können somit z.B. das HexaBend (Neugebauer und Drossel, W.-G. Blau, Peter, 2001; Otto-Adamczak, Hoffmann und Priber, 2012) oder das Freiformbiegen mit bewegter Matrize nach Nissin (Murata, Uemura und Suzuki, 1990; Kuhn, 2012) eingesetzt werden.

2.2 Übersicht der Biegeverfahren

2.2.1 Rotationszugbiegen

Das am häufigsten angewendete Verfahren für das Biegen von Rundrohren ist das Rotationszugbiegen. Eine Skizze des Biegeverfahrens ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Zu Beginn des Prozesses wird das Halbzeug dabei im Spannfutter (1) fixiert und zwischen die Spannbacken (5,6) geklemmt. Durch Rotation der Biegeform (6) ergibt sich die Form des Bauteils entsprechend der Biegeformkavität. Während des Biegens wird das Bauteil von außen durch den Gegenhalter (3) abgestützt. Faltenglätter (7) und Biegedorn (2) reduzieren das Auftreten von Falten oder Knicken und erweitern die Prozessgrenzen des Biegeverfahrens. (VDI-Richtlinie 3430, 2014-06)

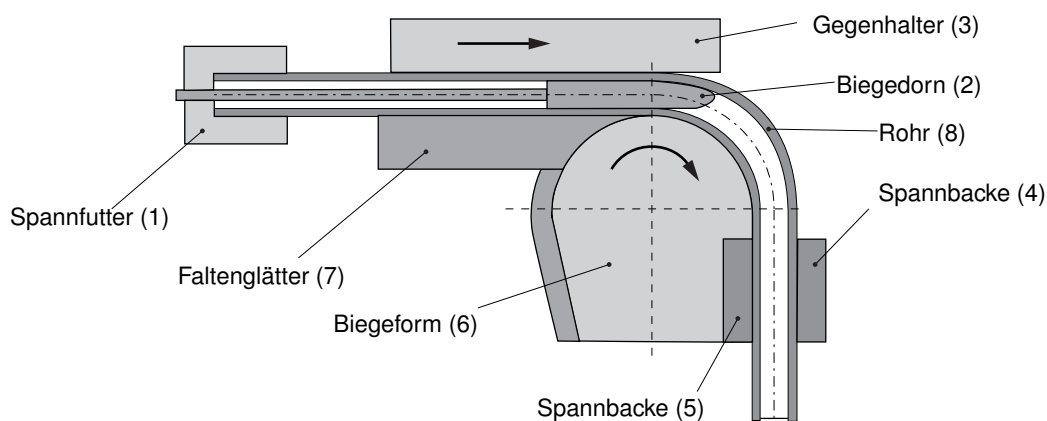


Abbildung 2.7: *Prinzipskizze Rotationszugbiegen (mod. von (VDI-Richtlinie 3430, 2014-06))*

Der große Marktanteil dieses Umformprozesses resultiert aus einer weit fortgeschrittenen Entwicklungsstufe, der hohen Zuverlässigkeit sowie einer gleichbleibenden Qualität und Reproduzierbarkeit in der Serienanwendung. Zu den Nachteilen des Rotationszugbiegens gehören neben den teuren Werkzeugkosten auch die Einschränkung in der Biegekontur, welche eine Unterteilung des Biegeablaufes in Gerade-Bogen-Gerade erfordert und somit die Designfreiheit massiv einschränkt. Des Weiteren beschränkt sich das Verfahren auf kleinere Radien mit einem max.

Biegeradius von ca. dem 10-fachen des Rohrdurchmessers. (Landgrebe et al., 2015) Um die Herstellbarkeit der Bauteile mittels Rotationszugbiegen abschätzen zu können, wurde von Engel, Gerlach und Cordes (2008) ein Arbeitsdiagramm (Abbildung 2.8) ermittelt. Neben einer Abschätzung des kleinsten biegbaren Radius in Abhängigkeit von den Halbzeugabmessungen, ist in diesem Diagramm auch abzulesen, welche Dorngeometrie für die Bauteilherstellung benötigt wird.

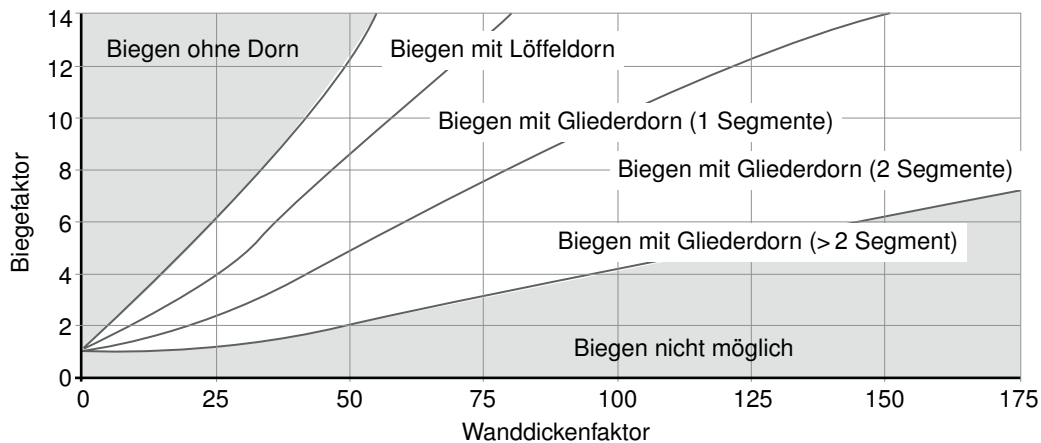


Abbildung 2.8: Arbeitsdiagramm für das Rotationszugbiegen (mod. von (Engel, Gerlach und Cordes, 2008))

Durch den Einsatz eines Biegedorns mit mindestens drei Gliedern können somit auch Biegefaktoren bis minimal 0,7 erzielt werden. Als Kriterien für die Herstellbarkeit von Biegegeometrien zählen dabei sowohl das Knicken des Profils, die Ausdünnung am Außenbogen, die Faltenbildung am Innenbogen, die Rückfederung des Rohres bei Entlastung und die Ovalität des Bauteils. Letztere definiert sich nach Stahl (2002) aus dem Verhältnis der Differenz des maximalen und minimalen Durchmessers zum mittleren Durchmesser (*Formel 2.3*).

$$ov = \frac{(D_q - D_r)}{D_a} \quad (\text{Formel 2.3})$$

Trotz der weit verbreiteten Anwendung des Biegeverfahrens beruht die Auslegung des Prozesses und die Gestaltung der Umformwerkzeuge häufig auf Expertenwissen. Durch die Einführung der VDI-Norm 3430 konnten 2014 erste Standards in der Biegetechnik gesetzt werden (VDI-Richtlinie 3430, 2014-06). Darin erfolgt insbesondere die Beschreibung wichtiger biegetechnischer Größen mit dem Hauptbezug auf das Rotationszugbiegen. Als Beitrag zur Generalisierung von Prozessgrenzen beim Rotationszugbiegen wurde von Flehmig ein Bending-Limit-Diagramm eingeführt, welches Kriterien für die Bestimmung von Dehn- und Beulgrenze eines Rohres enthält und durch analytische Modelle beschrieben ist. (Flehmig, Blümel und Kib-

ben, 2001; Flehmig, Brüggengbrock und Schweinecke, 2005) Flehmig konnte dadurch eine neue Biegedorngeometrie entwerfen, welche zu einer Erweiterung des Prozessfensters beim Rotationszugbiegen führte.

2.2.2 3-Rollen-Schubbiegen

Wie bereits aufgezeigt wurde, sind in den letzten Jahren eine Vielzahl an Freiformbiegeverfahren entwickelt worden. Dabei erreichte das Drei-Rollen-Schubbiegen (DRSB) die größte wissenschaftliche Durchdringung, weshalb der Prozessablauf und die wichtigsten Kenngrößen erörtert werden. In Abbildung 2.9 ist eine Skizze des Biegeverfahrens dargestellt. Während des Biegeprozesses wird das Rohr mit einer Geschwindigkeit v in Richtung der positiven x -Achse zugeführt. Das Rohr wird dazu von mehreren Stützrollen und der Biegerolle fixiert. Durch die kinematisch geregelte Auslenkung der Umformrolle in der x - y -Ebene resultiert die Umformung des Rohres zwischen der Biege- und der Umformrolle. Eine dreidimensionale Biegung entsteht durch die Rotation des Rohres zwischen den einzelnen Bögen. Somit sind zwar dreidimensionale Biegekonturen darstellbar, aber keine kontinuierlich wechselnden Biegeverläufe. (Kersten, 2013)

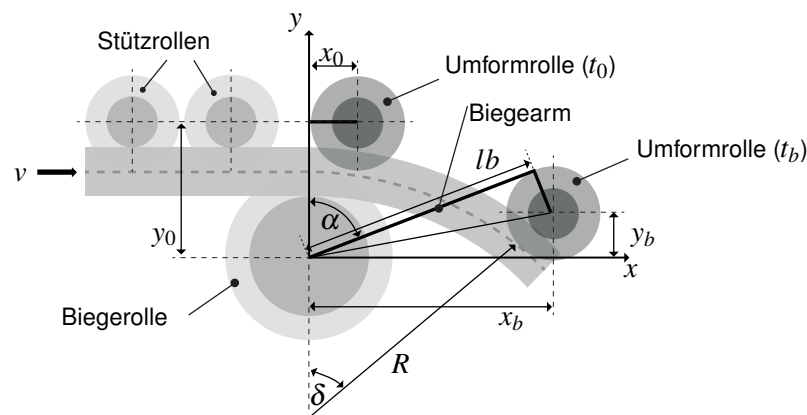


Abbildung 2.9: Prinzipskizze Drei-Rollen-Schubbiegen (mod. von (Kersten, 2013))

Wie bereits in Kapitel 2.4.2 beschrieben wurde, setzte sich Gerlach mit der analytischen Beschreibung des Biegeverfahrens auseinander und entwickelte dabei Modelle zur Abbildung der Dehnungsverteilung, des Biegemomentverlaufes und der Rückfederungsprognose (Gerlach, 2010). Diese Berechnungen wurden von Kersten aufgegriffen und durch die Berücksichtigung der Maschinenelastizität verbessert. Auf Grund der guten Prognosequalität konnte Kersten Prozessmodelle ableiten, durch die sich der Erprobungsaufwand bei der Einführung neuer Biegegeometrien deutlich reduzieren ließ (Kersten, 2013; Engel und Kersten, 2011). Zur Erweiterung des Prozessverständnisses beim DRSB wurden von Engel und Vatter sowohl experimentelle

als auch simulative Sensitivitätsanalysen durchgeführt. (Engel und Kersten, 2010; Vatter und Plettke, 2013; Vatter, 2014) Letztere beschreiben dabei insbesondere die auftretenden Wirkmechanismen beim DRSB. Groth führt in seinen Forschungsberichten einen Ansatz zur herstellbarkeitsorientierten Konstruktion von Biegebauteilen aus und kann so die Abweichung von theoretischem zu realem Krümmungsverlauf reduzieren (Groth, Engel und Frohn, 2018; Groth, Engel und Langhammer, 2018; Sebastian Groth, Peter Frohn und Bernd Engel, 2019).

2.3 Freiformbiegen mit bewegter Matrize

2.3.1 Prozessbeschreibung

Das Freiformbiegen mit bewegter Matrize (FBM) wird oft auch „MOS-Bending“ oder Freiformbiegen nach Nissin genannt. Im Gegensatz zu den oben beschriebenen DRSB ermöglicht das FBM die Herstellung einer vollständig dreidimensionalen Biegekontur (Abbildung 2.10). Eine Prinzipskizze des FBM ist in Abbildung 2.10 dargestellt. Der Maschinenaufbau besteht dabei aus einer festen Rohrführung und einer davor gelagerten, beweglichen Matrize. Zu Beginn des Biegeprozesses wird das Rohr durch die Werkzeuge von vorne in die Maschine eingeführt (negative x-Achse). Die Formgebung erfolgt anschließend durch den Rohrvorschub am Ende des Rohres (positive x-Achse) und das kinematisch gesteuerte Auslenken der Biegematrize. Je nach Maschinenaufbau besitzt die Biegemaschine unterschiedlich viele Freiheitsgrade:

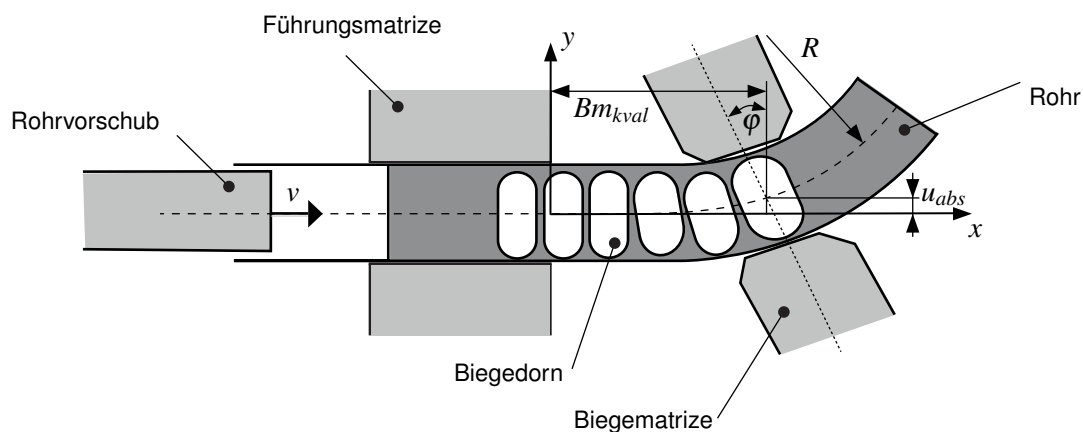


Abbildung 2.10: Prinzipskizze Freiformbiegen

3 Freiheitsgrade:

Der Rohrvorschub erfolgt entlang der positiven x-Achse (Koordinatensystem bzgl. Abbildung 2.10). Die Biegematrize kann in der y-z-Ebene translatorisch bewegt werden. Die Rotation des Werkzeugs ergibt sich aus ihrer Lagerung bzgl. der Rohrführung.

5 Freiheitsgrade:

Bei der Biegemaschine mit 5 Freiheitsgeraden (Abbildung 2.10) erfolgt der Rohrvorschub äquivalent zur 3-Achs-Maschine. Die Biegematrize ist in der y-z-Ebene translatorisch und um die y- und z-Achse rotatorisch beweglich. Dabei können alle Achsen unabhängig angesteuert werden. Die Rotation kann je nach Werkzeugauslegung im Mittelpunkt der Biegematrize oder auch exzentrisch zur Mitte erfolgen und bezieht sich auf das translatorisch, lokal verschobene Koordinatensystem in der y-z-Ebene.

6 Freiheitsgerade:

Die neueste Entwicklungsstufe des FBM ist gleich aufgebaut wie die Maschine mit 5 Freiheitsgraden und ermöglicht zusätzlich die Rotation der Biegematrize um die x-Achse. Dies soll vor allem beim Biegen von Profilen mit Verdrehung des Profilquerschnittes die Prozessgrenzen erweitern.

Bei allen Maschinentypen kann die Biegung durch einen Innendorn gestützt werden, der durch eine Dornstange am Ende der Biegemaschine fixiert wird. Zur Schmierung der Halbzeuge ist eine Beölung von Innen und Außen vorgesehen. Als Halbzeuge können sowohl Rundrohre oder Profile mit geschlossenem und offenem Querschnitt verwendet werden. (Murata, Uemura und Suzuki, 1990; Murata und Kato, 2004; Beulich, 2016; Gantner, 2008; Kuhn, 2012)

2.3.2 Prozesseigenschaften

Infolge der hohen Flexibilität des Maschinenaufbaus wird das FBM durch eine Vielzahl unterschiedlicher Parameter beeinflusst. Dabei gehören neben den Maschineneigenschaften und Werkzeugabmessungen auch Prozessgrößen wie beispielsweise die Schweißnahtposition beim Biegen. Gantner (2008) hat in einer seiner Arbeit bei der Durchführung von Biegeversuchen eine maximale Abweichung der Biegungen von der Sollkontur von 12 mm auf einer Bogenlänge von 1100 mm festgestellt. Dabei erklärt er die Abweichung unter anderem durch die Steifigkeit der Biegemaschine, die geometrischen Toleranzen, die Chargenschwankungen des Halbzeugs und die Beschaffenheit des Schmierfilms. Zudem geht aus seiner Arbeit hervor, dass diese Abweichung mit einer Zunahme der Biegekräfte steigt.

Um einen Zusammenhang zwischen der Biegekinematik und dem resultierenden Biegeradius darzustellen, führte Murata das U-R-Verhältnis ein. Darüberhinaus konnte festgestellt werden, dass die Prozessgrenzen beim FBM deutlich über den Grenzen herkömmlicher Biegeverfahren (z.B. dem Rotationszugbiegen) liegen. (Murata, Uemura und Suzuki, 1990) Dabei wirkt der beim FBM kontinuierlich auftretende Effekt des Rohrvorschubes ähnlich dem axialen Booster beim Rotationszugbiegen, welcher durch einen zusätzlichen axialen Rohrvorschub die Ausdünnung des Materials am Rohraußenbogen verringern soll. Durch die Überlagerung der axialen

Druckspannung mit den Biegespannungen in der Umformzone wird eine Verschiebung der neutralen Faser in Richtung des Rohraußenbogens bewirkt, was zu einer Verringerung der Wandstärkenreduktion führt und somit die Grenzen des Biegeverfahrens beeinflusst. (Gantner, 2008) Für die Berechnung des auftretenden Biegemoments beim Freiformbiegen setzte Murata und Aoki (1996) die Biegekräfte in Zusammenhang mit der Werkzeuggeometrie und der Biegekinematik (*Formel 2.4*).

$$M_B = P_U * Bm_{kval} + P_L * u_{abs} \quad (\text{Formel 2.4})$$

Dabei tritt das höchste Biegemoment am Auslauf der Rohrführung auf und lässt sich aus den Kräften in Richtung des Rohrvorschubs und der Matrizentranslation berechnen. Murata hat in weiterführenden Experimenten gezeigt, dass der feste Abstand zwischen den beiden Werkzeugen maßgeblich für die resultierende Umformung ist. Dabei wurde festgestellt, dass bei gleicher Biegekinematik und einer Abnahme des Werkzeugabstands, die notwendigen Biegekräfte steigen. (Murata und Mochizuki, 1997) Die kleinsten, biegbaren Radien beim FBM liegen zusammenfassend bei ca. dem Zweifachen des Rohraußendurchmessers (Gantner, 2008). Bei einer Vergrößerung der Radien wird die Prozessführung durch die Achsauflösung der Biegemaschine beschränkt (Engel und Kersten, 2010)

2.3.3 Biegekinematik

Allgemein lässt sich die Biegekinematik beim FBM in drei Abschnitte unterteilen. Dabei lenkt die Biegematrize zunächst beim Einlauf in den Bogen von der Nullposition aus. Beim Bogen durchlauf bleibt die Matrize bei konstanter Krümmung in einer festen Position. Am Ende der Biegung erfolgt beim Radienauslauf das Rücklenken in die Nullposition. Gantner analysierte die ideal-kinematische Bewegung der Biegematrize durch eine Ablaufsimulation in Solidworks. Das ermittelte kinematische Profil gilt für einen Bogen mit konstanter Krümmung und einer Matrizenrotation mit Drehpunkt auf der y-z-Ebene. Für eine exzentrische Rotation stellte Gantner ein ähnliches Verhalten fest. Zur analytischen Berechnung der Biegekinematik für den Einsatz in FEM-Simulationen leitete Gantner eine analytische Beschreibung des Kinematikprofils her. Die Berechnung erfolgt dabei in Bezug zur Bogenlänge und die bereits beschriebenen drei Abschnitte des Bogens. Zur Kompensation von Werkzeugtoleranzen und der Materialrückfederung skalierte Gantner die Biegekinematik linear. Der ermittelte Faktor gilt als empirisch ermittelte Größe und wurde auch als halbzeugabhängig beschrieben. (Gantner, Harrison et al., 2007; Gantner, 2008) Die Definition von mehreren Bögen oder Biegeabläufen ergibt sich durch das Aneinanderreihen mehrerer Kinematikprofile und deren Verdrehung um die Rohrachse.

2.4 Modellierung von Rohrbiegeverfahren mittels FEM

2.4.1 Grundlagen Modellierung und Validierung

Die Analyse mechanischer Systeme in der Wissenschaft erfolgt häufig durch die Anwendung von Differentialgleichungen, die es ermöglichen, einzelne Variablen im Kontext grundlegender physikalischer Prinzipien (z.B. Energieerhaltung oder Massenerhaltung) in Beziehung setzen. Sobald die mathematischen Modelle jedoch formuliert sind ist es meist hochkomplex oder nach derzeitigem Stand der Technik sogar ausgeschlossen sie analytisch zu lösen, insbesondere wenn es sich um nichtlineare partielle Differentialgleichungen handelt. Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist die am häufigsten, zur Lösung komplexer Gleichungssysteme, eingesetzte Diskretisierungstechnik in der Strukturmechanik. Dazu wird das Berechnungsproblem in einzelne, sich nicht überschneidende Abschnitte einfacher Geometrie (Finites Element) zerlegt und durch eine endliche Anzahl an Freiheitsgraden beschrieben. Die Verbindung der einzelnen Elemente ist durch eine definierte Anzahl gleicher Knotenpunkte bestimmt, an denen unter anderem Randbedingungen und Funktionswerte synchronisiert werden. Die Lösung des Berechnungsproblems wird also durch das diskrete Modell angenähert, das durch die Verknüpfung bzw. den Zusammenschluss aller Teilelemente entsteht. Der Modellaufbau für eine FEA (Finite-Elemente-Analyse) erfolgt in der Umformtechnik ausgehend von einer dreidimensionalen Abbildung der Umformmaschine, bzw. den Werkzeugen im Detail. In der Modellvorbereitungsphase werden zunächst die Eingangsdaten für die Problemlösung gesammelt und entsprechend den Anforderungen des FEM-Tools aufbereitet. Dazu gehören unter anderem die Diskretisierung von Werkzeug- und Halbzeugflächen durch FEM-Netze, die Definition von Werkzeugrandbedingungen (z.B. Freiheitsgrade oder Bewegungsrichtung) und Lasten, sowie die mathematische Beschreibung der eingesetzten Werkstoffe (z.B. elastisch-plastisches Materialverhalten, Verfestigungsmodell, Schädigungsparameter). Neben diesen, vom Prozess abgeleiteten Parametern, müssen darüber hinaus die Methoden und Einstellungen zur Aufstellung und Lösung der beschriebenen Gleichungssysteme der FEA definiert werden. Dies umfasst mitunter die Definition der angewendeten Elementtypen, die Methode der Kontaktmodellierung zwischen zwei Körpern und das Verfahren des Gleichungslösers (Implizit oder Explizit). Des Weiteren können für jedes FEM-Tool auch spezifische Parameter zur Optimierung der Berechnungszeit oder -genauigkeit gesetzt werden. Nach der Lösung der definierten Problemstellung erfolgt die Analyse und Auswertung der berechneten Daten entsprechend den benötigten Ausgabegrößen, wie z.B. Spannungen, Kräfte und Verformungen. Bevor diese Ergebnisse allerdings als belastbar betrachtet werden, müssen die aufgestellten Modelle zunächst validiert werden. Dabei muss neben der spezifischen Bauteilbetrachtung auch die Übertragbarkeit auf vergleichbare Problemstellun-

gen, z.B. den Austausch der Werkzeuggeometrie überprüft werden. In der Umformtechnik sind dabei drei Ergebnisgrößen im Vergleich zum Realversuch zu berücksichtigen: Die Geometrie des berechneten Bauteils, die Spannungs- und Dehnungsverteilung oder eine entsprechende Ersatzgröße (z.B. die Ausdünnung des Bleches) und die zur Umformung benötigten Kräfte (z.B. Pressen- oder Matrizenkraft). (Wagner, 2017; Vatter, 2014)

2.4.2 Prozessmodelle für das Freiformbiegen mit bewegter Matrize

Das einzige analytische Modell zum Freiformbiegen wurde von Murata abgeleitet und ist bereits in Kapitel 2.1.3 beschrieben. Weitere Prozessbeschreibungen wurden numerisch mittels FEM-Modellen umgesetzt und liefern durchweg eine gute Übereinstimmung zum Biegeversuch. Murata und Mochizuki (1999) entwickelten ein Modell auf der Softwarebasis Dyna-3D, mit dem sie das Profilbiegen einer Biegemaschine mit drei Freiheitsgraden darstellen konnten. Gantner, H. Bauer, Harrison und De Silva (2004) zeigten neben einem Simulationsmodell zum Rotationszugbiegen auch zwei Modelle zum Freiformbiegen mit drei und fünf Freiheitsgraden. Dabei wurden sowohl Rundrohre als auch Profile gebogen. Gantner verwendete für die Beschreibung des Halbzeugs vollintegrierte, dünnwandige Schalenelemente mit fünf Integrationspunkten über die Blechdicke verteilt, welche unter der Annahme einer dünnwandigen Schale gegenüber Volumenelementen in Bezug auf Modellierungsaufwand und Rechenzeit im Vorteil ist. Die Reibzahlen im Coulombschen Reibgesetz wurden mit 0,04 für Stahl- und 0,06 für Aluminium festgesetzt. Das elastisch-plastische Materialverhalten wurde im Simulationsmodell vereinfacht und somit als isotrop modelliert. (Gantner, H. Bauer, Harrison und Silva, 2005) Darüber hinaus wurde ein Simulationsmodell für den Biegeprozess mit fünf Freiheitsgraden auf Basis der Software LS-Dyna entwickelt (Beulich, 2016). Im Gegensatz zu Gantner wurde dabei ein Biegedorn mit Stahlseilverbindung verwendet und im FEM-Modell durch die Definition von sphärischen Gelenken abgebildet. Dabei wurden für das Halbzeug vollintegrierte Schalenelemente mit sieben Integrationspunkten über die Blechdicke verteilt eingesetzt. Validiert wurde das Modell mit Rohren aus dem Werkstoff EN-AW5182 und einer Reibzahl von 0,08. Die Spannungsverteilung im Halbzeug wurde durch eine dem Biegeprozess vorgeschaltete Rollprofiliersimulation abgebildet und die Ergebnisgrößen auf das Biegehalbzeug übertragen, wobei der Schweißprozess und die Einflüsse von Schweißnaht und Wärmeinflusszone vernachlässigt worden sind. Neben Experimenten zur Validierung wurde auch die Sensitivität der simulativ-beschleunigten Simulation auf die Dehnungsverteilung aufgezeigt. Dabei konnte festgestellt werden, dass eine zu hoch gewählte Vorschubgeschwindigkeit des Rohres zu großen Abweichungen bei der plastischen Dehnung führen kann, welches vorwiegend durch auftretende, dynamischer Effekte (mit Massenskalierung) innerhalb des Simulationsmodells hervorgerufen wird. Des Weiteren wur-

de dargelegt, dass die Simulation mit anisotropen Fließorten im Werkstoffmodell zu deutlich veränderten Ergebnissen führt. (Beulich, Craighero und Volk, 2017) Guo zeigte die Simulation eines Rohres aus Kupferwerkstoff mit der Softwareplattform Abaqus. Das Halbzeug wurde im Unterschied zu den vorgehenden Arbeiten mit C3D8R Volumenelementen diskretisiert. Zudem konnte dargelegt werden, dass die Variation der Reibzahl zwischen 0,02 und 0,1 nur einen geringen Einfluss auf das Simulationsergebnis hat. (Guo, Xiong, Xu, El-Aty et al., 2018) Unter Anwendung des Simulationsmodells untersuchte Guo die Sensitivität verschiedener Materialparameter auf das Biegeergebnis. Durch die Kopplung von Eingangs- und Ergebnisgrößen konnte dabei das Verhältnis von Biegeradius und Werkzeugabstand (U-R-Verhältnis) bei einer Veränderung des Halbzeugmaterial prognostiziert und im Experiment validiert werden (Guo, Xiong, Xu, Ma et al., 2018). Neben dem Freiformbiegen mit Rundrohen sind nach dem Stand der Technik zudem Arbeiten zu finden, die sich beispielsweise mit rechteckigen Profilquerschnitten (Werner et al., 2019) oder auch offenen Profilen (Zhou et al., 2017) beschäftigen. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird das Biegeverfahren ausschließlich auf Rundrohre bezogen, weshalb auf letztere nicht weiter eingegangen wird.

2.5 Analytische Berechnung des Biegemoments am Rohr

Zur einfachen und schnellen Berechnung verschiedener mechanischer Effekte beim Rohrbiegen, wie beispielsweise der Rückfederung nach der Biegeentlastung, wurde von Engel, Gerlach und Cordes (2008) eine analytische Beschreibung des Rohrbiegemoments hergeleitet und validiert. Dabei kann das Rohrbiegemoment auf Basis verschiedener Vereinfachungen angenähert werden. Für die Berechnung wird ein Rohrbogen mit konstantem Radius angenommen, welcher ausschließlich durch ein Biegemoment belastet wird. Bei der Biegung tritt weder eine Verschiebung der neutralen Faser, noch eine Deformation des Rohrquerschnittes auf. Die auftretenden Spannungen werden ausschließlich in Rohrlängsrichtung berücksichtigt und somit das Problem durch die Beschreibung als einachsiger Spannungszustand vereinfacht. Als Grundlage wird ein homogener und isotroper Werkstoff angenommen. Eine Skizze der auftretenden Spannungen und Dehnungen, sowie der benötigten geometrischen Größen sind in Abbildung 2.11 dargestellt.

Daraus lassen sich zunächst die Spannungen im elastischen und plastischen Verformungszustand ableiten (*Formel 2.5*), welche ausgehend von der neutralen Faser bei $y=0$ in Richtung der Rohrmantelfläche zunehmen. y_e beschreibt dabei den Übergang zwischen elastischer und plastischer Formänderung und errechnet sich aus der Dehngrenze $R_{p0,2}$, dem Biegeradius R und dem Elastizitätsmodul E . Die plastische Vergleichsspannung k_f kann aus realen Versuchsdaten oder

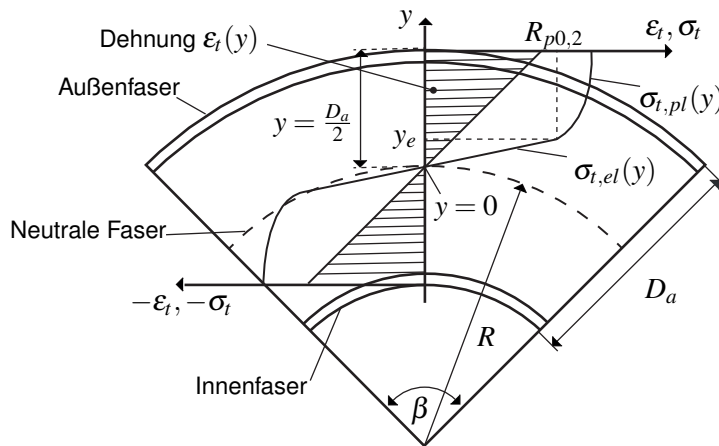


Abbildung 2.11: Spannung und Dehnungszustand im gebogenen Rohr (mod. von (Kersten, 2013))

einer Modellbeschreibung entnommen und in die Berechnung überführt werden. Je nach eingesetztem Werkstoff sollten dazu verschiedene Approximationsmodelle der Fließkurve verglichen werden, um die Abweichung zu den Versuchsdaten möglichst gering zu halten (Mertens, 2018).

$$\begin{aligned} \sigma_{t,el}(y) &= E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{y}{R} && \text{für } y \leq y_e = R_{p0,2} \cdot \frac{R}{E} \\ \sigma_{t,pl}(y) &= k_f(\varepsilon) = k_f\left(\frac{y}{R}\right) && \text{für } y > y_e \end{aligned} \quad (\text{Formel 2.5})$$

Zusammen mit der Beschreibung der Rohrquerschnittsfläche in Abhängigkeit von den Rohrabmessungen und der Laufvariablen y (Formel 2.6) kann das Rohrbiegemoment $M_{b,ges}$ in Formel 2.7 bestimmt werden. Die gesamte Herleitung aller in diesem Abschnitt aufgezeigter Formeln ist durch Kersten (2013) detailliert beschrieben worden.

$$\begin{aligned} dA &= 2 \cdot \sqrt{r_a^2 - y^2} && \text{für } y > r_i \\ dA &= 2 \cdot (\sqrt{r_a^2 - y^2} - \sqrt{r_i^2 - y^2}) && \text{für } y \leq r_i \end{aligned} \quad (\text{Formel 2.6})$$

$$M_{b,ges}(R) = 2 \cdot \int_{A_{r,el}} \sigma_{t,el}(y) \cdot y \cdot dA + 2 \cdot \int_{A_{r,pl}} \sigma_{t,pl}(y) \cdot y \cdot dA \quad (\text{Formel 2.7})$$

2.6 Grundlagen der statistischen Prozess- und Messmittelqualifikation

Bei der Industrialisierung von neuartigen und innovativen Fertigungsverfahren ist es neben einem generellen Prozessverständnis besonders wichtig Informationen über die Stabilität, Robustheit und Wiederholgenauigkeit des Prozessergebnisses zur generieren. Dazu werden in der

industriellen Anwendung Methoden zur statistischen Prozess- und Messmittelqualifikation verwendet.

Die Durchführung einer Prozessqualifikation wird z.B. von Dietrich und Schulze (2014) detailliert beschrieben. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Methode ist im folgenden Absatz zusammengefasst. Dabei wird für die zu bestimmende Messgröße zunächst eine Vielzahl an Messungen aufgenommen, welche die Stichprobe n umfasst. Daraus lässt sich dann nach *Formel 2.8* der arithmetische Mittelwert μ bestimmen.

$$\mu = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Formel 2.8})$$

Des Weiteren ist aus dem Stichprobenumfang n und dem Mittelwert die Standardabweichung σ nach *Formel 2.9* zu berechnen. Diese beschreibt ein Maß für die Streubreite der Stichprobenwerte um deren Mittelwert.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{Formel 2.9})$$

Daraus kann anschließend der Prozessfähigkeitsindex nach *Formel 2.10* errechnet werden. Nachdem sich dessen Berechnung auf die Standardabweichung bezieht, ist die Bewertung der Messwerte nur unter der Annahme eines normalverteilten Stichprobenumfangs gültig. Für anders verteilte Messwerte sind in DIN ISO 22514-2 (2019) weitere Methoden aufgeführt. In Abbildung 2.12 sind die berechneten Kennzahlen, sowie die Verteilung der Messwerte eingezeichnet. Dabei umfasst die Streubreite von 6σ 99,73% aller auftretender Prozessergebnisse. Andererseits grenzt dies ein fehlerhaftes Prozessergebnis auf 0,135% an der oberen Spezifikationsgrenze (OSG) und der unteren Spezifikationsgrenze (USG) ein.

$$c_p = \frac{OSG - USG}{6 \cdot \sigma} \quad (\text{Formel 2.10})$$

$$c_{pk} = \frac{\min(\mu - USG, OSG - \mu)}{3 \cdot \sigma} \quad (\text{Formel 2.11})$$

Des Weiteren ist zu beachten, dass der Prozessleistungsindex c_p nur die Streubreite der Messwerte bzgl. des gewählten Intervalls der Standardabweichung betrachtet, nicht allerdings die

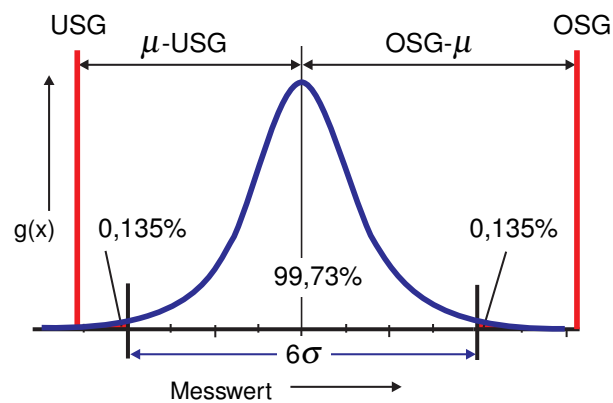


Abbildung 2.12: Definition des Fähigkeitsindex (mod. von (Dietrich und Schulze, 2014))

relative Lage der Messwerte in Bezug auf die Spezifikationsgrenzen. Um dazu den Messwert weiter zu spezifizieren, wurde der Leistungsindex c_{pk} eingeführt, dessen Berechnung in *Formel 2.11* dargestellt ist. Dabei wird zur Bestimmung der Leistungskennzahl das Minimum des unteren und oberen Leistungsindex herangezogen, welche jeweils nur die Hälfte der Normalverteilung in Relation zur jeweiligen Spezifikationsgrenze betrachten. (Dietrich und Schulze, 2014; DIN ISO 22514-2, 2019)

2.7 Forschungsbedarf

In diesem Abschnitt wurden bereits einige Arbeiten aufgeführt, welche sich mit Biegeverfahren und Freiformbiegeverfahren im Speziellen beschäftigen. Dabei wurden neben Simulationstechniken auch Richtlinien zur Auslegung und Prozesssteuerung ermittelt und wissenschaftlich erfasst. Das Freiformbiegen mit bewegter Matrize spielt dabei in der industriellen Anwendung noch immer eine untergeordnete Rolle, da insbesondere die kinematische Prozessführung nicht vollständig beschrieben und erfasst wurde. Dies führt in der tatsächlichen Anwendung der Maschine zu hohen Erprobungs- und Korrekturaufwendungen, weshalb die Entwicklung einer Methodik zur Kinematikberechnung beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize einen der Forschungsschwerpunkte darstellt. Außerdem soll durch die Vertiefung von Ursache-Wirkungsketten das Prozessverständnis erhöht werden, um zukünftig Prozessfehler effizient, präzise und nachhaltig beheben zu können. Neben den prozessualen Forschungsschwerpunkten soll durch die Definition und Ableitung einer Methodik zur virtuellen Prozessauslegung das Biegeverfahren der Industrie leichter zugänglich gemacht werden, damit auch in den frühen Phasen der Bauteil- und Prozessplanung die Herstellbarkeitsprognose von Biegebauteilen verlässlich durchführbar ist.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Gegenstand dieser Arbeit ist das Biegeverfahren „Freiformbiegen mit bewegter Matrize“ (nach Nissin), welches das dreidimensionale Biegen von Rohrprofilen ermöglicht und als einleitendes Umformverfahren in der Prozesskette des Innenhochdruckumformens eingesetzt wird. Ziel der Arbeit ist es, dieses Verfahren detailliert zu analysieren, die grundlegenden Wirkmechanismen zu erarbeiten und darauf aufbauend eine Methodik zur Auslegung und Bewertung räumlicher Biegegeometrien abzuleiten. Weiterhin liegt der Anspruch in der Identifikation und Quantifizierung der Verfahrensgrenzen, sowie in der Entwicklung eines Prozessmodells auf Basis der FEM. Das in dieser Dissertation erarbeitete Prozesswissen dient dabei als Grundlage für die Weiterentwicklung der Biegetechnik und Auslegung der Werkzeuggeometrie. Die entwickelten Methoden und Modelle ermöglichen dem Anwendenden eine zuverlässige und schnelle Prognose der Bauteilherstellbarkeit und führen somit zu einer Reduzierung von Aufwand und Kosten bei der Erprobung neuer Biegekonturen. Neben der virtuellen Prozessabsicherung soll durch die Bewertung der Sensitivität wichtiger Prozess- und Werkzeugparameter auf das Biegeergebnis die Prozesssteuerung verbessert und somit die gesamte Prozessrobustheit erhöht werden.

Zur Erreichung der oben definierten Ziele wird das Biegeverfahren eingehend durch eine Prozessanalyse charakterisiert. Neben der kinematischen Prozessführung und den eingesetzten Biegewerkzeugen wird auch die Schwankung der Halbzeuge und der gebogenen Rohre experimentell untersucht. Mit den gewonnenen Erkenntnissen wird ein Prozessmodell auf Basis der FEM für die Abbildung des Fertigungsprozesses vom ebenen Blech bis zum gebogenen Bauteil entwickelt und durch den Abgleich mit experimentellen Daten validiert. Die Einflüsse verschiedener Design- und Prozessparameter auf den Fertigungsprozess werden anschließend in einer Sensitivitäts- und Robustheitsanalyse gegenübergestellt und bewertet. Dabei sollen unter anderem Prozessgrenzen unter Berücksichtigung von Halbzeug und Prozessführung erarbeitet werden. Die Verknüpfung der gewonnenen Erkenntnisse liefert die Grundlage für eine Methodik zur Bewertung der Bauteilherstellbarkeit, die sowohl die Prozessgrenzen des Halbzeugs, der Biegewerkzeuge, der Biegemaschine als auch der kinematischen Prozessführung berücksichtigt. Dazu notwendige Modelle oder Standards sollen durch den Einsatz ausgewählter Methoden erarbeitet und validiert werden. Anschließend soll durch die Abschätzung relevanter Prozessparameter durch die Approximation mit analytischen Modellen, die Herstellbarkeitsbewertung und die damit verbundene Prozessauslegung auch ohne aufwändige FEM-Simulation zeit- und kosteneffizient ermöglicht werden. Die vollständige Validierung der eingesetzten Methoden, die Dokumentation und Verknüpfung aller Erkenntnisse und die Übertragung der Methodik auf das Biegen von Profilen runden die Arbeit ab. Die Vorgehensweise zur Bearbeitung der For-

schungshypothese wurde dazu in mehrere Arbeitspakete unterteilt, welche in Abbildung 3.1 zusammengefasst sind.

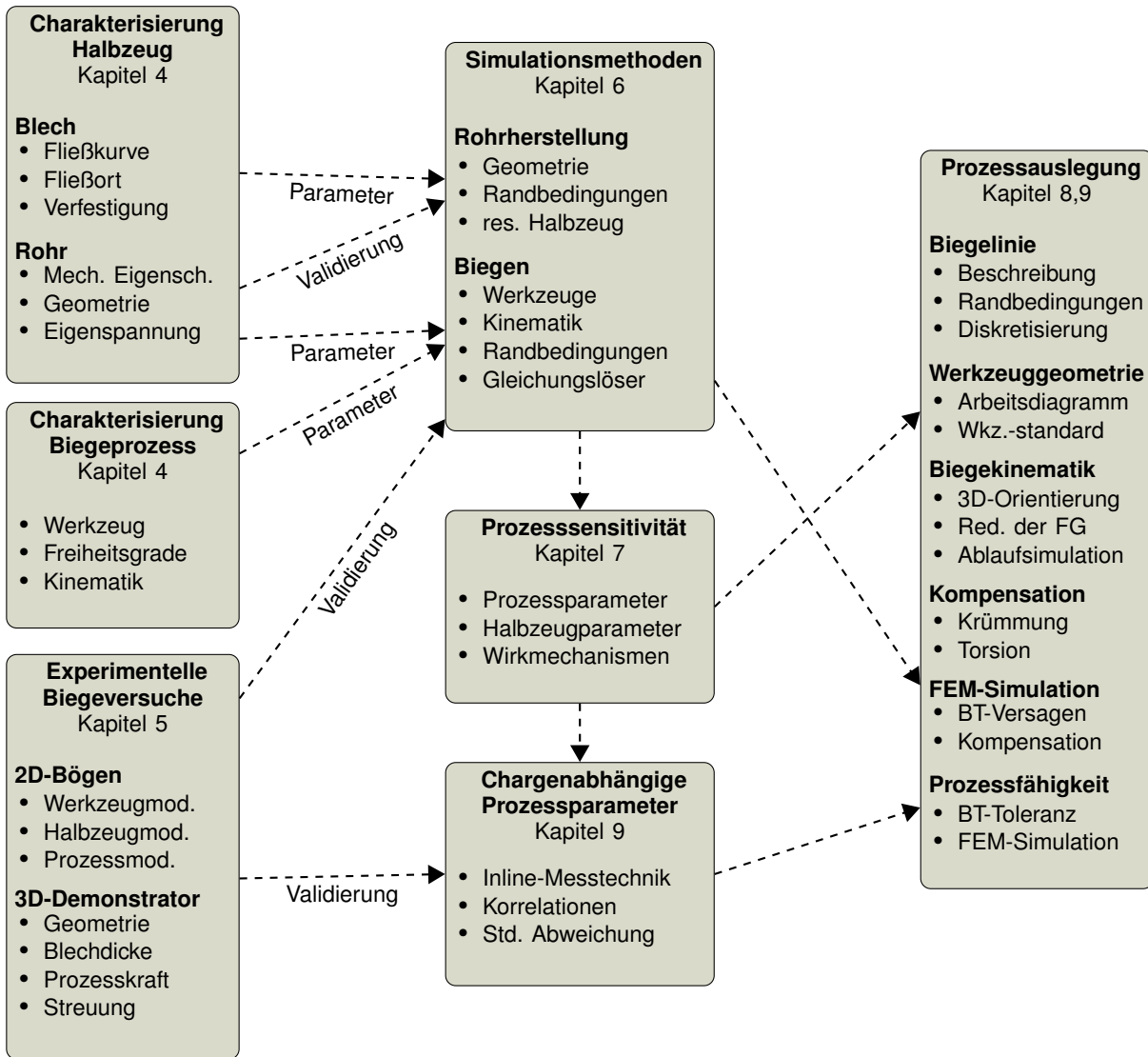


Abbildung 3.1: Arbeitspakete und Aufbau der Dissertation

4 Halbzeuge, Demonstrator, Versuchsanlagen, Messeinrichtungen

Im folgenden Kapitel werden die verwendeten Halbzeuge, Biegegeometrien, Versuchsanlagen und Messeinrichtungen beschrieben. Dabei wird in Abschnitt 4.1 zunächst auf die Biegemaschine und die serienmäßig verbaute Werkzeuggeometrie eingegangen, welche im Rahmen der Arbeit für experimentelle und virtuelle Versuche verwendet werden. In Abschnitt 4.2 werden die eingesetzten Messmethoden und -systeme dargelegt, sowie deren Messfähigkeit bewertet. Dabei werden neben standardisierten Systemen, wie z.B. dem Zugversuch nach DIN EN ISO 6892-1 (2009-12) auch Messmethoden speziell für die Charakterisierung von gebogenen Rohren aufgeführt und definiert. In Abschnitt 4.3 werden die Eigenschaften des verwendeten Aluminiumwerkstoffes EN-AW5182 sowohl am Ausgangsblech als auch an dem daraus eingeformten Rohr beschrieben. Zuletzt werden in Abschnitt 4.4 die Geometrie und die zur Herstellung benötigten Maschineneinstellungen und -parameter des Biegedemonstrators dargelegt, welcher als Zielbauteil für die in dieser Arbeit entwickelten Methoden gilt.

4.1 Biegeanlage

4.1.1 Biegemaschine

Die in dieser Arbeit erarbeiteten Methoden, Modelle und Erkenntnisse basieren grundlegend auf der Technologie des Freiformbiegens, welches bereits in Abschnitt 2.3 einleitend beschrieben wurde. Für experimentelle Versuche und Messungen im laufenden Prozess wurde eine Biegemaschine der Firma J. Neu verwendet, welche dem Prinzip des Freiformbiegens mit bewegter Matrize zuzuordnen ist (Kuhn, 2012). Die Biegemaschine steht im BMW Werk 2.4 in Dingolfing und ist als einleitendes Umformverfahren im Verbund des IHU-Prozesses im Einsatz. Die vollautomatisierte Biegezone umfasst dabei neben der Biegemaschine auch deren automatische Beladung mit Halbzeugen aus einem Rohteilbehälter, sowie deren Entladung und Weiterverarbeitung in einer Vorformpresse. In Abbildung 4.1 ist die Biegemaschine dargestellt, sowie die Maschinenachsen eingezeichnet. Insgesamt besitzt die Maschine 5 Freiheitsgrade (FG), die in drei translatorische und zwei rotatorische unterteilt werden können. Der Vorschub des Rohres erfolgt dabei entlang der X-Achse (x_t) und die Positionierung der Biegematrize im Raum in Y-Richtung durch die Kombination der FG y_t und z_r , sowie in Z-Richtung durch z_t und y_r . Bevor der Biegevorgang startet, wird die Maschine mit einem Halbzeug von vorne (negative X-Richtung) beladen und das Halbzeug im geraden Bereich (hinter den Werkzeugen) durch zwei Halbschalen von oben und unten gestützt. Die Formgebung eines Rohres erfolgt anschließend durch das Zusammenspiel von Rohrvorschub und der benötigten Matrizenpositionierung im Raum. Die Achsenkinematik wird dabei durch die Biegesoftware der Fa. Neu erstellt und über

einen Mitsubishi Meldas CNC Controller nach DIN 66025 (1983-01) an die Anlage übertragen (Murata und Kato, 2004). Die Funktionsweise der Maschinenprogrammierung und die Auswirkung auf die Biegekinematik wird anhand des Demonstrators in Abschnitt 4.4 erläutert. Zur Stabilisierung des Verfahrens und zur Reduktion von Verschleiß wird das Halbzeug während des Biegens sowohl auf der Außenseite des Rohres als auch von innen beölt. Die Schmierstoffmenge lässt sich in der Maschinensteuerung einstellen und regelt dadurch die Leistung zweier Schmiermittelpumpen.

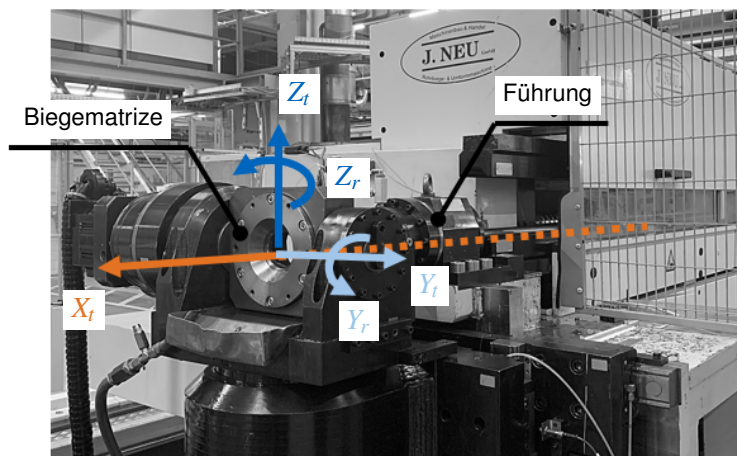


Abbildung 4.1: Freiformbiegemaschine mit 5 Freiheitsgraden der Firma Neu

4.1.2 Biegewerkzeug

Das Biegewerkzeug ist ein zentraler Bestandteil der Biegemaschine und besteht aus drei Hauptkomponenten, der Biegematrix (Bm), der Führung (Fm) und dem Biegedorn (Bd). Dabei wirken die Biegematrix und die Führung von außen auf das Halbzeug ein und erzeugen durch die geregelte Matrizenbewegung das notwendige Biegemoment zur Formgebung des Rohres. Der Biegedorn stützt währenddessen das Halbzeug von innen, wobei er der Matrizenbewegung passiv folgt und zu einer Erweiterung des Prozessfensters führt. In Abbildung 4.2 ist ein Schnitt durch die Konstruktion der Biegewerkzeuge dargestellt. Für die Bemaßung der Komponenten geht man dabei von dem Abstand zwischen Führung und Biegematrix-Mittelpunkt aus (Bm_{kval}). Darauf aufbauend wird die Führung auf der Biegemaschine fixiert und der Maschinennullpunkt durch den Schnittpunkt der Rohrachse mit dem vorderen Ende der Führung (in Richtung Bm) bestimmt. Für die Auslegung der Werkzeuge wird neben erfahrungsbasierten Standardwerten auch die Soll-Geometrie des zu biegenden Halbzeugs als Referenz herangezogen. Somit ergeben sich die Dimensionen von Führung und Biegematrix:

- Der Innendurchmesser der Führung (Fm_d) entspricht dem Außendurchmesser des Rohres (D_a) und einem umlaufenden Abstand (Fm_{tol}).
- Der Auslauf der Führung besteht aus einem tangential zum Innendurchmesser beginnenden Radius (Fm_r) und dessen Länge (Fm_{rl}).
- Der Innendurchmesser der Biegematrix (Fm_d) entspricht dem Außendurchmesser des Rohres (D_a) und einem umlaufenden Abstand (Bm_{tol}).
- Der Einlauf- (Bm_{we}) und Auslaufwinkel (Bm_{wa}) der Biegematrix mit Bezug auf die Rohrachse basieren auf Erfahrungswerten.
- Der Innenradius (Bm_r) der Biegematrix ist ein Standardwert.

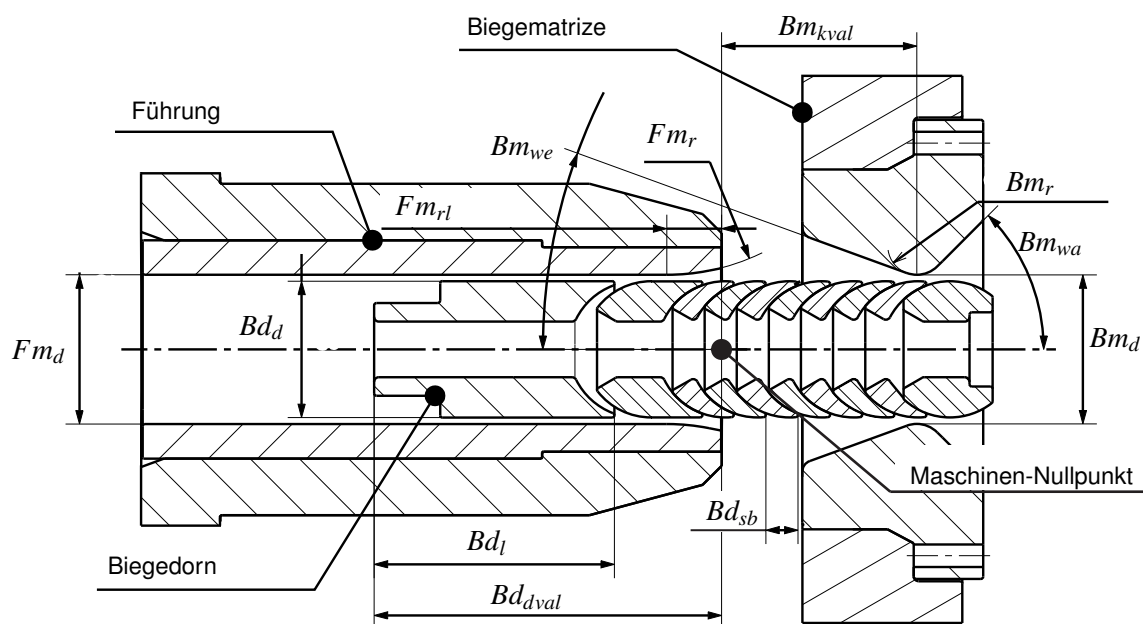


Abbildung 4.2: Konstruktionszeichnung der Biegewerkzeuge in Verbausituation

Für die Geometrie des Biegedorns gibt es je nach Anwendungsfall und gewünschter Biegegeometrie unterschiedliche Konstruktionsansätze. Bei BMW werden dabei vorzugsweise so genannte (sog.) Seildorne eingesetzt. Diese bestehen aus einem länglichen und mehreren kugelförmigen Dornsegmenten, welche durch ein Stahlseil miteinander verspannt werden.

- Der Außendurchmesser der Biegedorns (Bd_d) entspricht dem Innendurchmesser des Rohres (D_i) und einem umlaufenden Abstand (Bd_{tol}).

- Das längliche Dornsegment hat die Länge Bd_l und dient auch zur Fixierung des Biegedorns an der Biegemaschine über die sog. Dornstange.
- Die kugelförmigen Dornglieder mit der Anzahl Bd_{sgnum} und der Segmentbreite Bd_{sb} sind in Richtung der Biegematrix positioniert und bewegen sich entsprechend der Verformungsrichtung des Rohres.
- Die Dornposition in Relation zum Maschinennullpunkt wird mit Bd_{dval} angegeben und kann auch noch im Serienprozess zur Optimierung der Biegequalität verwendet werden.

Die aufgezeigten Zusammenhänge von Werkzeugauslegung und der Rohrgeometrie führen somit zur Auslegung und Konstruktion von halbzeugspezifischen Biegewerkzeugen. Das für diese Arbeit verwendete Biegewerkzeug ist als Serienwerkzeug für die Produktion des in Abschnitt 4.4 beschriebenen Demonstrators im Einsatz.

4.2 Messsysteme und -methoden

4.2.1 Messsysteme zur Charakterisierung der Werkstoffeigenschaften

Für die Charakterisierung des Halbzeugs in Abschnitt 4.3 sollen verschiedene standardisierte Messmethoden verwendet werden. Dafür benötigte Versuche werden bei BMW im eigenen Materiallabor durchgeführt und ausgewertet. Eine Universalprüfmaschine 1485 der Fa. Zwick wird dabei zur Abwicklung von standardisierten Zugversuchen an Blech- und Rohrproben verwendet. Daneben werden hydraulische Tiefungsversuche an Blechronden zur erweiterten Charakterisierung von Blechwerkstoffen an einer elektro-hydraulischen Prüfmaschine 161 der Fa. Erichson durchgeführt. Letztere Versuche werden mit Hilfe des optischen Messsystems Aramis der Fa. Gom ausgewertet, welches eine Analyse der Formänderung der Blechprobe über die Versuchsdauer ermöglicht. Die Anwendung der beiden Maschinen, sowie die Beschreibung ausgewählter Versuche und deren Ergebnisse sind in Abschnitt 4.3.1 und 4.3.2 detailliert beschrieben.

4.2.2 Mobiles Universalmesssystem

Das mobile Messsystem der Fa. Hexagon mit der Bezeichnung Romer 7520 basiert auf einem Gelenksarm mit 7 Achsen und einer maximalen Messspannweite von 2,0 m. Die Fixierung des Messarms kann sowohl auf einem fest installierten Messtisch als auch über einen Magnetfuß an schlecht zugänglichen Objekten erfolgen. Das Gerät bietet zweierlei Messmethoden an, das Tasten von 3D-Punkten nach DIN EN ISO 10360-12:2018-02 (2018) und das 3D-Scannen von Oberflächen. Dadurch lassen sich ortsunabhängig sowohl hochgenaue Messpunkte bestimmen

als auch Bauteile digitalisieren, denen keine Regelgeometrie zu Grunde liegt. Herstellerspezifisch wird die Einzelpunkt-Reproduzierbarkeit mit 0,016 mm und die volumetrische Genauigkeit mit $\pm 0,023$ mm angegeben. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Messsystem zunächst für die Vermessung des Biegewerkzeugs eingesetzt (Abschnitt 4.1.2). Des Weiteren wird die Methode des Flächenscans zur Vermessung von gebogenen Rohren angewendet. Die Messdaten werden vom Messarm an die Software Polyworks Inspector 2018 der Fa. duwe-3d gesendet und darin weiterverarbeitet. Neben der Betrachtung der aufgezeichneten Daten, beinhaltet PolyWorks eine Vielzahl an geometrischen Tools zur Erstellung von Regelgeometrien oder auch der Rückführung von Punktwolken über NURBS-Flächen zu CAD-tauglichen Flächendaten.

4.2.3 Quantitative Bestimmung von Biegeverlauf und Biegekenngößen

Biegelinie aus optischem 3D-Laserscan

Die Rekonstruktion der Rohr-Biegelinie zur Kontrolle der Maßhaltigkeit des Biegeverfahrens oder zur Validierung von Simulationen gehört bereits zum Stand der Technik, wie Grimson et al. (1993) bereits bei der Entwicklung eines automatisierten Rohr- Vermessungssystems gezeigt hat. Unter der Annahme einer idealen Biegung ohne Querschnittsdeformation, lässt sich die vermessene Rohroberfläche durch Zylinder- und Torussegmente approximieren. Als Ausgangsgröße wird dafür eine mittels Laserscan erzeugte Punktwolke verwendet (Abschnitt 4.2.2). Die Kombination der Mittellinien der approximierten Segmente ergibt die Biegelinie, welche anschließend geglättet und für die weitere Verarbeitung durch einen Spline approximiert wird. Ein Beispiel der beschriebenen Methode ist in Abbildung 4.3 dargestellt und zeigt ein vermessenes Biegebauteil mit rückgeführter Biegelinie. (U. Bauer und Polthier, 2007; U. Bauer und Polthier, 2009; Grimson et al., 1993)

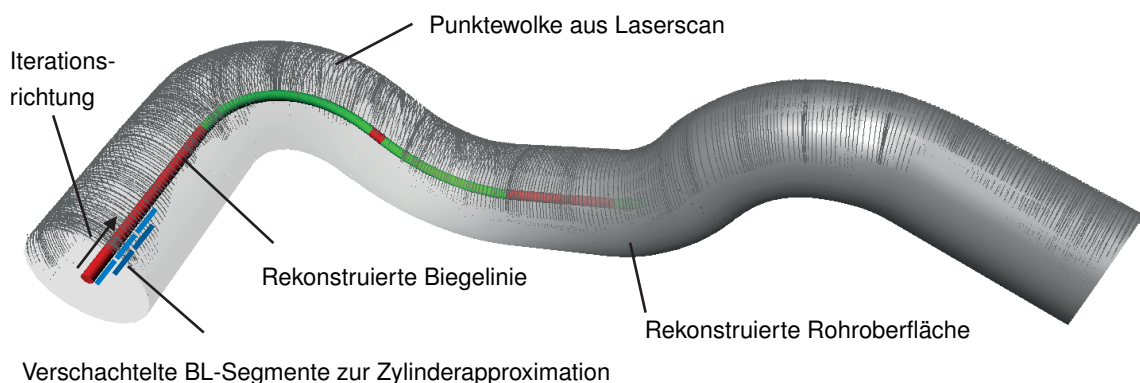


Abbildung 4.3: Rückführung einer Biegelinie mittels Laserscan (mod. von (U. Bauer und Polthier, 2007))

Die in dieser Arbeit eingesetzte Methode zur Rückführung der Biegelinie orientiert sich dabei an der zuvor beschriebenen Vorgehensweise und wurde in Matlab R2018b umgesetzt. Dazu wird zunächst die Punktwolke der Rohroberfläche aus PolyWorks exportiert und in Matlab eingelesen. Anschließend werden die Rohrendpunkte durch approximierten Zylinder in den Randbereichen der Biegung bestimmt. Dies ist mit hoher Präzision möglich, da beim Freiformbiegen sowohl am Rohranfang als auch am Rohrende ein gerader Rohrabschnitt von mindestens 100 mm vorliegt und dieser einer Regelgeometrie gleicht. Anschließend wird ausgehend vom Startpunkt und dem Richtungsvektor des Start-Zylinders in einem Abstand von 10 mm (mit einer Breite von 20 mm) ein neuer Zylinder approximiert, was zu einer Erneuerung des Richtungsvektors der Rohr-Mittellinie führt und einen weiteren Biegelinienpunkt im Mittelpunkt des neuen Zylinders erzeugt. Dieses Verfahren wird so lange wiederholt, bis der Rohr-Endpunkt erreicht wird (Abbruchkriterium). Die Aneinanderreihung aller Zylindermittelpunkte führt somit zur Biegelinie. Die Mindestbreite der approximierten Zylinder (20 mm) und das Berechnungsintervall (10 mm) sind abhängig von der Dichte und Qualität der Punktwolke und können bei Unterschreitung zu einer Verkippung der einzelnen Zylindersegmente und somit zu einer Verfälschung der Biegelinie führen. Um das Berechnungsintervall der Methodik zu erhöhen, wird eine zweite Iterationsschleife entlang der Biegerichtung durchgeführt. Dabei wird in Abständen von je 1,0 mm entlang der ersten Biegelinie jeweils die Normalenebene dazu aufgestellt. Die Projektion umliegender Flächenpunkte (Abstand 0,25 mm) auf die erzeugte Ebene liefert eine Beschreibung aller Rohrquerschnitte entlang der Biegerichtung. Durch die Approximation eines Kreises auf den Profilquerschnitt mittels Kreisregression kann der Biegelinienpunkt auf der Schnittebene erzeugt werden (Chernov, 2011). Die korrigierte Biegelinie ergibt sich dementsprechend aus der Zusammenführung aller Kreismittelpunkte der Rohrquerschnitte. Für die weitere Verwendung der Biegelinie wurde diese geglättet und entsprechend der Bogenlänge mit einem Intervall von 1,0 mm interpoliert.

Zur Plausibilisierung der erarbeiteten Methodik wurden ein einfacher Bogen (2D) mit Biegeradius 350 mm und Biegewinkel 105° , sowie das Demonstratorbauteil (Abschnitt 4.4) mit dreidimensionalem Biegeverlauf vermessen und die Berechnungsmethodik jeweils mit einer Anzahl von 20 Wiederholungen durchgeführt. In Tabelle 4.1 sind die Ergebnisse dargestellt. Dabei beträgt die gemessene Standardabweichung (Std) pro Messpunkt 0,097 mm (2D-Rohrbogen) und 0,106 mm (3D-Biegeverlauf).

Zur Bewertung des Messsystems bzgl. der möglichen Prozesstoleranzen wurde das 3D-Bauteil 20 mal vermessen und ausgewertet. Der Abstand der Rohrenden diente dazu als Bezugsgröße. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.3 dargestellt. Die obere und untere Spezifikationsgrenze ist

Tabelle 4.1: Berechnungsgenauigkeit der Biegelinienrückführung

Geometrie	Bogenlänge	Messpunkte	Std/Messpunkt
2D	1500 mm	1500	0.097 mm
3D	2650 mm	2650	0.106 mm

für dieses Bauteil nach der Umformstufe Freiformbiegen von BMW mit 1020 mm und 970 mm definiert. Zusammen mit dem Nennmaß der Profilöffnung (995,0 mm) und der Standardabweichung der Messung von 0,2235 mm berechnen sich die Messfähigkeits-Indizes mit 7,46 (Cg) und 7,15 (Cgk) (Dietrich und Schulze, 2014).

Tabelle 4.2: Messsystemanalyse - 3D-Bauteilvermessung und Prüfung der Profilöffnung bei Anwendung des Universalmessarms

Prüfkriterium	Nennmaß	OSG	USG	Std	Cg	Cgk
Abstand der Rohrendpunkte	995,0 mm	1020,0 mm	970,0 mm	0.2235 mm	7,46	7,14

Biegelinie aus FE-Simulation

Neben der Biegelinienrückführung aus dem Experiment soll sich auch die Auswertung virtueller Versuche auf dieselben Auswertegrößen beziehen. Dabei kann bei einer Simulation mittels der Finiten-Elemente-Methode (FEM) auf die Knotenpunkte des netzbasiert-beschriebenen Halbzeugs zurückgegriffen werden. Im unverformten Rohrzustand werden zunächst Pfade in Längsrichtung des Rohres definiert (für jeden Umfangsknoten 1 Pfad). Diese werden im gebogenen Zustand des Rohres reselected und die Raumkoordinaten aller Pfadpunkte exportiert. Durch die Betrachtung aller Pfade entlang der Biegerichtung ergeben sich die einzelnen Rohrquerschnitte, dessen Flächenschwerpunkte je einen Punkt der Biegelinie beschreiben. Äquivalent zur experimentellen Biegelinienrekonstruktion wird auch die FE-Biegelinie entsprechend der Bogenlänge mit einem Intervall von 1,0 mm interpoliert.

Bestimmung der Biegekenngößen

Für den besseren Vergleich unterschiedlicher Biegungen werden die ermittelten Biegelinien in Biegekenngößen ausgedrückt. Dabei wird zwischen zweidimensionalen (2D) Biegungen mit einem konstanten Radius und dreidimensionalen (3D) Biegeverläufen unterschieden. Bei einfachen 2D Bögen wird die Biegung durch die Kenngößen Radius und Biegewinkel beschrieben. Dabei ist zu beachten, dass beim Freiformbiegen ein prozessbedingter, undefinierter Übergang

zwischen geraden Rohrsegmenten und dem Bereich der konstanten Kurvenkrümmung vorliegt (Groth, Engel und Langhammer, 2018). Dementsprechend wird der angegebene Biegeradius mittels Regression (Chernov, 2011) nur im Bereich der konstanten Kurvenkrümmung bestimmt. Der Biegewinkel wird aus den Richtungsvektoren approximierter Geraden am Anfang und Ende der Biegelinie errechnet. Räumlich gebogene Freiformgeometrien werden eindeutig durch einen Krümmungs- und Torsionsverlauf beschrieben. Für deren Berechnung wird die geglättete Biegelinie aus dem Laserscan oder der FE-Simulation zuerst durch einen kubischen Spline approximiert (Hoschek und Lasser, 1992). Die Berechnung von Krümmung und Torsion erfolgt standardisiert gemäß den Frenetschen Formeln (Kühnel, 2008). Die Genauigkeit der Bestimmung der Biegekenngößen wurde für je ein Bauteil aus Tabelle 4.1 mit je 20 Wiederholungen ermittelt und ist in Tabelle 4.3 dargestellt.

Tabelle 4.3: Berechnungsungenauigkeit der Biegekenngößen

2D-Rohrbogen	Radius	Biegewinkel
	350,18 mm ± 3,88	104,84° ± 1,26
3D-Biegeverlauf	mittlere Krümmung	mittlere Torsion
	0,0015 ± 2,87 * 10 ⁻⁵	4,37 * 10 ⁻⁴ ± 1,76 * 10 ⁻⁵

Quantifizierung von Biegefalten im Innenbogen

Um eine Bewertung der Stärke von Falten im Rohrinnebogen zu treffen, wurde von Engel, Zehner et al. (2014) der Vergleichswert Ω eingeführt. Dieser ist dimensionslos und errechnet sich nach Gleichung 4.1 aus der Summe der Verhältnisse von Ist- zur Soll-Rohrquerschnittsfläche für den betrachteten Rohrabschnitt. In Abbildung 4.4 ist eine Prinzipskizze zur Ermittlung des Vergleichswertes dargestellt. (VDI-Richtlinie 3431, 2016-08)

$$\Omega = \frac{1}{i} \sum_i \left| \frac{\Delta A_{ist,i}}{A_{soll,i}} \right| \cdot |\sin(\zeta_i)|; A_{soll,i} = y_{soll} \cdot \Delta s \quad (\text{Gleichung 4.1})$$

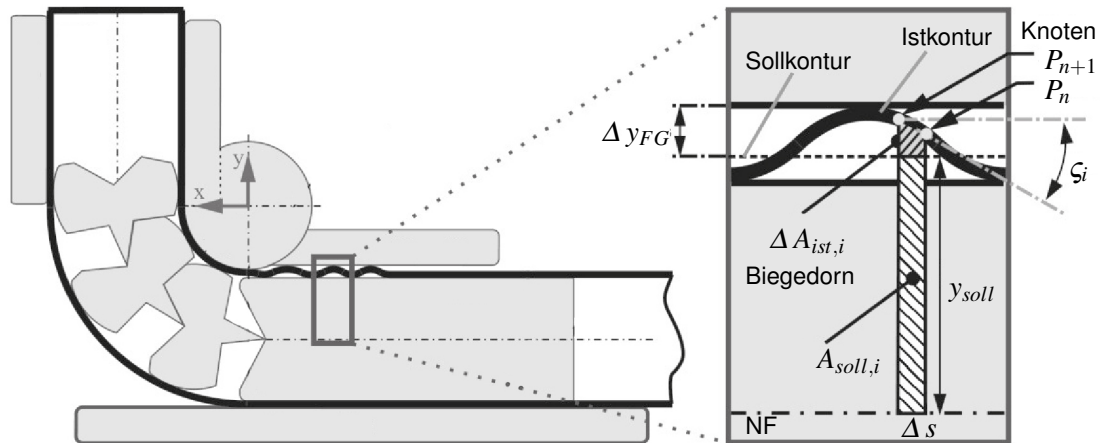


Abbildung 4.4: *Prinzipskizze für die Quantifizierung von Biegefalten (mod. von (VDI-Richtlinie 3431, 2016-08))*

4.2.4 Inline-Messtechnik

Neben den bereits aufgezeigten Messmethoden, die vom Produktionsprozess entkoppelt sind, wird für die Prognose der Prozessfähigkeit und der Prozessrobustheit in Abschnitt 9 auch eine Information über die Streuung einzelner Halbzeug- und Prozessparameter, sowie des Prozessergebnisses benötigt. Dazu werden Messmethoden aufgezeigt, die eine Bestimmung ausgewählter Parameter (Abschnitt 7) während der laufenden Serienproduktion an jedem Bauteil ermöglichen (s.g. In-Line Messtechnik).

Rohrdurchmesser

Für die messtechnische Erfassung des Rohraußendurchmessers wird ein optisches CCD-Mikrometer der Fa. Keyence ausgewählt. Dabei wird ein gleichförmiger, paralleler Lichtstrahl von einer Seite auf das Messobjekt gelenkt und auf der anderen Seite von einem CCD-Element empfangen. In dem Bereich des Messobjektes registriert das CCD-Element folglich kein eintreffendes Licht. Über den gesamten Messbereich ergeben sich dadurch zwei Übergänge von hell zu dunkel, welche den Außendurchmesser des Rohres beschreiben. In der Produktionsanlage wurde der Sensor mit der Bezeichnung LS-7070 an der Schweißnahtorientierung der Halbzeuge verbaut, da durch das automatisierte Drehen des Rohres eine Erfassung des Durchmesserlaufes möglich ist. Der verbaute Sensor ist in Abbildung 4.5 (b) dargestellt. Der Messbereich beträgt 0,5 mm bis 65 mm, die Wiederholbarkeit wird herstellerspezifisch mit 0,0002 mm und der Messfehler mit $\pm 0,003$ mm angegeben. Für die Bewertung des Messsystems im verbauten Zustand wurde eine Messsystemanalyse mit $n=50$ Wiederholungen durchgeführt. Als Nennmaß wurde dazu ein Rohr an der Innen- und Außenseite überdreht, um ein zylindrisches Prüfmittel

herzustellen. Die Ergebnisse der Messsystemanalyse sind in Tabelle 4.4 dargestellt. Die dabei erreichte Messmittelfähigkeit in Bezug auf die Spezifikationsgrenzen liegt bei 21,28 (Cg) und 17,02 (Cgk).

Tabelle 4.4: Messsystemanalyse der Inline-Durchmessererfassung

Prüfaufbau	Nennmaß	OSG	USG	Std	Cg	Cgk
In-Line bzgl. abgedrehtes Rohr	64.04	64.1	63.9	0.0003	21.28	17.02

Ein Beispiel für ein im Serienprozess vermessenes Rohr ist in Abbildung 4.5 (a) dargestellt. Es zeigt den Verlauf des Messwertes während der Rohr-Rotation in der Schweißnahterkennung. Dabei wurden 1474 Messwerte aufgezeichnet. Zwei Messspitzen beschreiben den Durchmesserverlauf für eine halbe Umdrehung (180 Grad). Die Bestimmung des mittleren Durchmessers erfolgt für drei ganze Umdrehungen und liegt bei 64,058 mm. Der Maximalwert liegt bei 64,117 mm und der Minimalwert bei 64,007 mm.

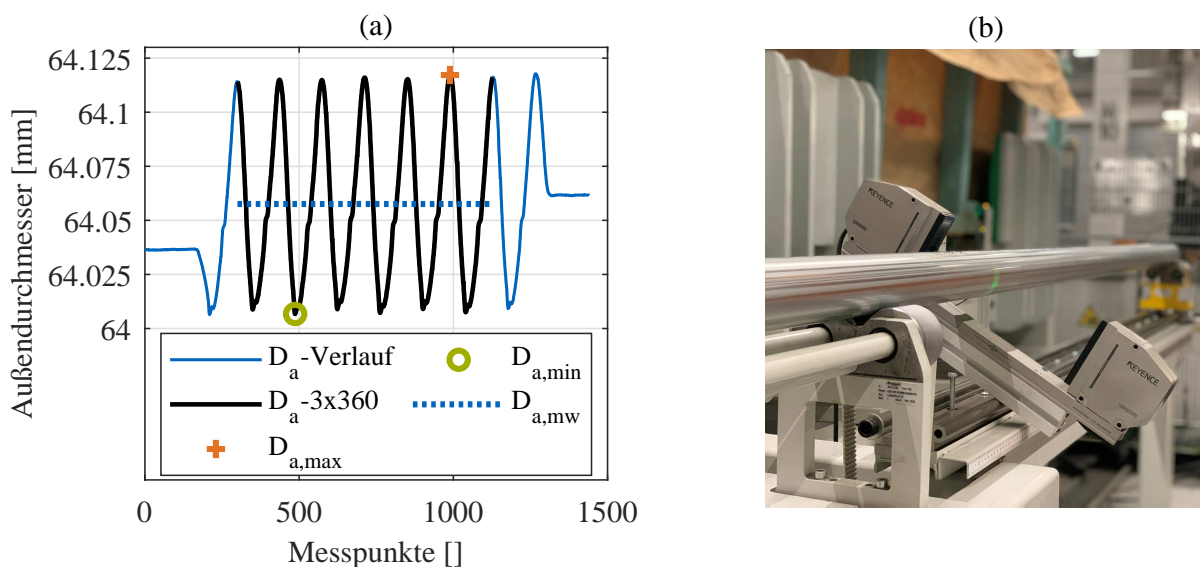


Abbildung 4.5: In-Line Durchmessererfassung: (a) Gemessenes Rohr (b) Aufbau der Sensorik

Rohrblechdicke

Die Messung der Blechdicke erfolgt durch die Differenzbildung zweier Laser-Abstandssensoren, die zangenförmig auf einer Metallkonstruktion befestigt sind. Der Prüfaufbau ist in Abbildung 4.6 (b) dargestellt und zeigt die Verbausituation der Messzange an der Schweißnahtorientierung. Die zwei Laser-Triangulationssensoren vom Typ LH-H150 der Fa. Keyence haben einen Messabstand von 150 ± 40 mm und sind herstellerspezifisch mit einer Messungenauigkeit von

0,00025 mm angegeben. Die Dickenmessung zwischen zwei Sensoren erfordert des Weiteren die nahezu kollineare Ausrichtung der Laserstrahlen zueinander und deren Treffpunkt unter Berücksichtigung des Referenzabstandes. Die Validierung der Sensorenausrichtung erfolgt dazu zunächst außerhalb der Biegezone bzgl. eines kalibrierten Endmaßes von 2,0 mm. Bei der gemessenen Standardabweichung nach 50 Wiederholungen von 0,0014 mm, errechnen sich die Prüfmittelfähigkeit-Indizes zu 7,15 (Cg) und 6,39 (Cgk) (Tabelle 4.5). Für die Messung der Rohrblechdicke im Prozess wird die Messzange bzgl. der Rohrachse verdreht. Der Messpunkt liegt dabei ca. 15 mm von Rohrende entfernt, um Einflüsse der Kanten-Entgratung auszuschließen. Für die Bestimmung der Blechdicke wird der Winkel zwischen Messzange und Oberflächennormale des Rohres berücksichtigt. Die Prüfung des Messmittels in der Biegezone erfolgt bzgl. eines abgedrehten Rohres mit einem Nennmaß von 1,98 mm. Die Ergebnisse der Messsystemanalyse sind in Tabelle 4.5 dargestellt. Die Prüfmittelfähigkeit liegt bei 6,04 (Cg) und 4,51 (Cgk).

Tabelle 4.5: Messsystemanalyse der Inline-Blechdickenmessung

Prüfaufbau	Nennmaß	OSG	USG	Std	Cg	Cgk
Offline bzgl. Endmaß	2.000	2.100	1.900	0.0014	7.15	6.39
Inline bzgl. abgedrehtes Rohr	1.98	2.100	1.900	0.0011	6.04	4.51

Ein Beispiel des Blechdickenverlaufes über den Rohrumfang für ein in-line gemessenes Rohr ist in Abbildung 4.6 (a) dargestellt. Äquivalent zur Durchmessererfassung rotiert das Rohr bei der Ausrichtung der Schweißnaht. Die Spitzen der Blechdicke zeigen die Überhöhung der Schweißnaht im Rohrinnen. Somit liegt die Blechdicke der Schweißnaht bei 2,177 mm. Der Bereich zwischen zwei Spitzen beschreibt den Blechdickenverlauf bei einer Umdrehung (360 Grad). Daraus lassen sich die mittlere Blechdicke (2,029 mm), die min. Blechdicke (1,986 mm) und die max. Blechdicke (2,072 mm) bestimmen.

Rohrbeölung

Ein Vergleichswert für die auf dem Rohr aufgetragene Schmiermittelmenge wird über die mittlere Durchflussmenge des Umformöls während des Biegevorgangs gebildet. Dazu ist ein Durchflusssensor der Fa. Keyence (FD-X) an die Schmierölzuleitung der Führungsmatrize angeklemt, welche für die Außenbeölung des Rohres sorgt. Der vom Sensor erfasste Wert ist als Relativwert zu sehen, da keine laborseitige Kalibrierung der Sensoreinstellungen auf das verwendete Schmiermittel durchgeführt wurde. Herstellerseitig wird die Wiederholgenauigkeit der momentanen Durchflussrate für das verwendete 8 mm Kunststoffrohr mit $\pm 2,6$ mL/min an-

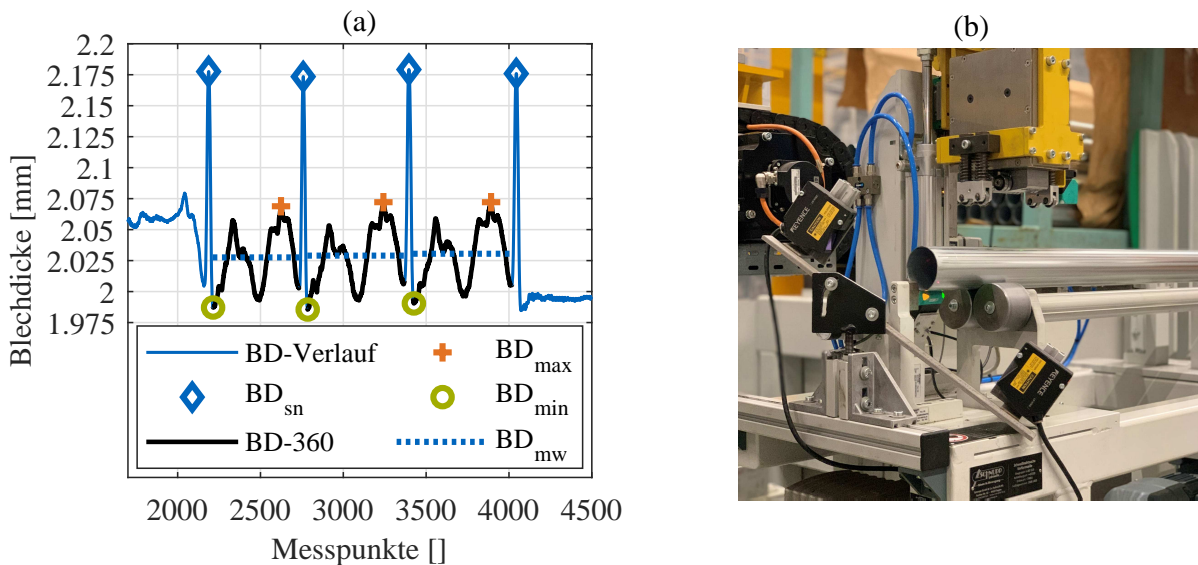


Abbildung 4.6: In-Line Blechdickenmessung: (a) Gemessenes Rohr (b) Aufbau der Sensorik

gegeben. Die in Abschnitt 9 gezeigten Messwerte entsprechen dem Sensormittelwert über die Dauer des Biegevorgangs.

Biegegeometrie

Für die Bestimmung der Streuung des Biegeprozesses wird die Biegegeometrie nach erfolgtem Biegevorgang über ein Kamerasystem vermessen. Dabei wird die Profilöffnung der Rohrendpunkte des Demonstrators (Abschnitt 4.4) bestimmt. Das Rohrende, welches nach dem Ende des Biegevorgangs in der Biegemaschine verbleibt, wird dazu als 0-Punkt gesetzt. Die Position des im Raum stehenden Rohrendes wird über ein Kamerasystem der Fa. Keyence dreidimensional vermessen. Dazu wird ein Bildverarbeitungssystem der Produktreihe XG-X2500 eingesetzt, welches in Bezug zum Biegewerkzeug ausgerichtet und eingemessen wurde (Abbildung 4.7). Die 3D-Punktwolke des Rohrendes wird dabei durch die Kombination eines 2D-Bildes und einer Streifenlichtprojektion erzeugt. Für die Rekonstruktion des Mittelpunktes am Rohrende wird eine 3D-Kreisregression verwendet. Die Aufnahmezeit der 3D-Punktwolke beträgt 1648 ms. Für die Validierung der Prüfmethode wurde die Prüfmittelfähigkeit bzgl. der zulässigen Prozessstreuung ermittelt. Die Kennwerte C_g (3,67) und C_{gk} (3,60) erfüllen dabei die von BMW gestellte Mindestanforderung von $C_g, C_{gk} > 2,0$.

Tabelle 4.6: Messsystemanalyse der Inline Geometrieerkennung

Prüfaufbau	Nennmaß	OSG	USG	Std	C_g	C_{gk}
Abstand der Rohrendpunkte	1001.32,0	1020,0	970,0	0.455	3.67	3.60

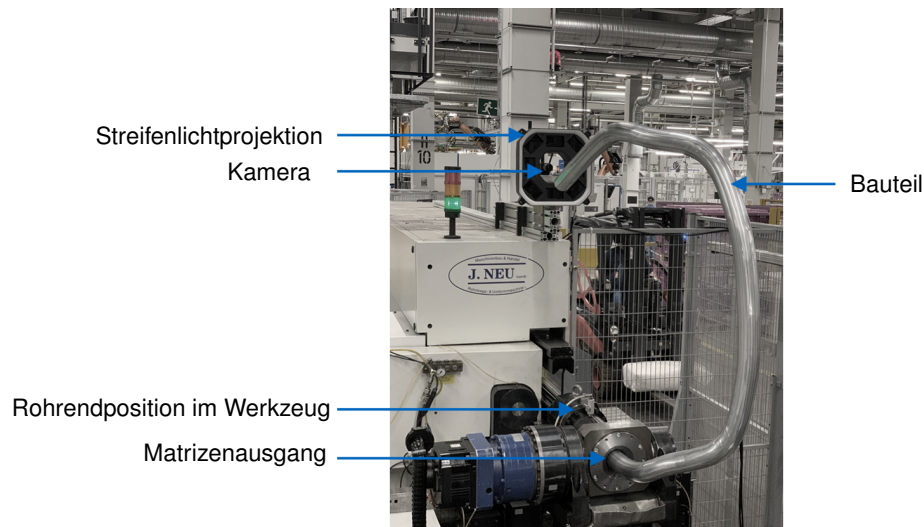


Abbildung 4.7: Messaufbau der Biegeprofilvermessung mittels 3D-Kamerasystem

Kraftmessung am Biegedorn

Für die Validierung der Simulationsmodelle in Abschnitt 6 wird der Verlauf der Zugkraft am Biegedorn gemessen. Dazu wird ein Kraftaufnehmer (Modell 1000) der Fa. Interfaceforce in die Montagegange des Biegedorns integriert. Der Sensor kann Zug- und Druckkräfte bis 225 kN aufnehmen und ist herstellereitig mit einer Genauigkeit von $\pm 0,067$ kN angegeben. Die Auswertung des Messsignals erfolgt durch den Universal DMS-Messverstärker der Fa. Interfaceforce (Modell IFF9330).

4.3 Versuchshalbzeug, Werkstoff und Materialkarte

Im Rahmen dieser Arbeit wird als Werkstoff eine Aluminium-5000 Knetlegierung (EN AW-5182) der Fa. Constellium eingesetzt (DIN EN 573-3:2019-10, 2019). Das Ausgangsblech hat eine Sollwandstärke von 2,0 mm und eine EDT-Oberflächentextur (H. G. Bauer und Schadt, 2017). Das Flachband wird anschließend von der Fa. Welser Profile zu einem Rundrohr eingeformt und verschweißt. Im folgenden Abschnitt wird zunächst das Ausgangsblech charakterisiert und ein Materialmodell für die virtuelle Prozessabbildung in Abschnitt 6 erstellt. Anschließend werden die Eigenschaften des angelieferten Rohres bestimmt und mit denen des Ausgangsbleches verglichen. Um die Vergleichbarkeit sicherzustellen, entstammen sowohl das Blech als auch das eingeformte Halbzeug derselben Produktionscharge. Dies ist insbesondere notwendig, da in der Werkstoffspezifikation die erlaubte Toleranz der Dehngrenze von 110 bis 160 MPa (BMW Group Standard GS 93033, 2019-06) reicht und somit ein Vergleich spez. Rohrkenwerte zu Standard Blechkenwerten nicht aussagekräftig ist.

4.3.1 Charakterisierung des Ausgangsbleches

Die Charakterisierung des Aluminium-Flachbandes erfolgt in Hinblick auf die Erstellung eines Materialmodells für die FEM-Simulation. Der Werkstoff erfüllt dabei den BMW Group Standard GS 93033 (2019-06). Grundlegende Methoden der Kontinuumsmechanik werden dabei von Banabic (2010) beschrieben. Versuchsaufbauten und Durchführungen, sowie die Zusammenführung verschiedener Experimente wurde von Mertens (2018) erläutert.

Mechanischen Kennwerte

Die standardisierte Methode zur Beschreibung des elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens erfolgt durch den einachsigen Zugversuch (EZV) nach DIN EN ISO 6892-1 (2009-12). Daraus werden sowohl die mech. Kennwerte der Blechprobe, wie Streckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung, als auch die Fließkurve bestimmt. Letztere beschreibt den Zusammenhang zwischen Fließspannung und Umformgrad und charakterisiert somit das plastische Werkstoffverhalten. Neben dem Zugversuch in Walzrichtung (0°) des Bleches werden für die Beschreibung der Werkstoffanisotropie auch Versuche in 45° und 90° durchgeführt. Dazu wird die Zugprobenform H nach DIN 50125 (2009-07) verwendet. Die Versuchsdurchführung der Zugversuche zur Kennwertbestimmung erfolgte nach DIN EN ISO 6892-1 (2009-12) mit jeweils 3 gültigen Wiederholungen je Richtung. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.7 dargestellt.

Tabelle 4.7: *Mechanische Kennwerte der richtungsabhängigen Zugversuche an einer EN-AW5182 Blechprobe mit 2,0 mm Blechdicke*

Walzrichtung	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{80mm} [%]	$r_{10\%}$ []	$n_{5\%}$ []
0°	147	290	20,5	24,0	0,65	0,30
45°	144	282	22,0	26,0	0,80	0,34
90°	148	284	22,0	24,0	0,70	0,31

Fließkurve

Für die Bestimmung der Fließkurven wird ein zweiter Probensatz vorbereitet. Die Versuchsdurchführung erfolgt dabei in den drei Richtungen (0° , 45° , 90°), quasistatisch mit einer konstanten Dehnrates von 0,0067 1/s. Die resultierende Fließkurve je Richtung ist die mittlere Fließkurve aus drei gültigen Versuchen. Für eine präzise, mathematische Approximation der Fließkurve ist es erforderlich, die Fließkurve über den Dehnungsbereich des Zugversuches hinweg zu betrachten. Dafür wird in dieser Arbeit der hydraulische Tiefungsversuch (HTV) verwendet, welcher nach DIN EN ISO 16808:2014-11 (2014) spezifiziert ist. Die dabei aufgenommene Fließkurve im biaxialen Spannungszustand beschreibt die plastische Werkstoffverformung bis

zu einem Umformgrad von ca. 0,5. Für das zu erstellende Materialmodell muss die Fließkurve durch eine mathematische Funktion beschrieben werden. Dazu sind im Stand der Technik verschiedene mathematische Funktionen (z.B. Swift, Gosh oder Hocket-Sherby) zu finden, welche auch untereinander durch einen Gewichtungsfaktor kombiniert werden können. Als Basis für die Approximation wird eine Fließkurve verwendet, welche aus den beiden beschriebenen Versuchen (EZV (0°) und HTV) kombiniert wird. Die dazu benötigte Umrechnung der biaxialen Fließkurve aus dem HTV in den einachsigen Spannungszustand des Zugversuches ist durch Hora (2011) beschrieben. Für die geprüfte Materialcharge konnte die beste Approximation mittels der Funktion nach Gosh (Gleichung 4.2) erzielt werden. Die Funktionsparameter sind in Tabelle 4.8 aufgelistet. Die Fließkurve aus dem EZV, die umgerechnete FK aus dem HTV und das approximierte Modell sind in Abbildung 4.8 (b) dargestellt.

$$\sigma = k_1(k_2 + \varphi)^n + k_3 \quad (\text{Gleichung 4.2})$$

Tabelle 4.8: Parameter für die Fließkurvenapproximation nach Gosh (Gleichung 4.2)

Parameter	k_1	k_2	k_3	n
Wert [-]	-64,6830	0,0831	518,2574	-0,7370

Fließbedingung

In der Umformtechnik treten durch die Überlagerung von Kräften und Momenten mehrachsige Spannungszustände in verschiedenen Belastungsrichtungen des Werkstückes auf. Um diese Eigenschaften auch numerisch abbilden zu können, werden Fließortmodelle eingesetzt, welche die Fließbedingung definieren. Diese beschreiben den Fließbeginn bzgl. des mehrachsigen Spannungszustandes und können durch verschiedene, einfache, sowie komplexe Modelle beschrieben werden. Eine Übersicht etablierter Modelle in der Umformtechnik wurde durch Banabic (2015) erstellt. Im industriellen Umfeld hat sich für komplexere Stahlwerkstoffe und Aluminiumlegierungen insbesondere der Fließort YLD2000 nach Barlat et al. (2003) etabliert. Methoden zur Bestimmung der dazu notwendigen 8 Modellparameter wurden beispielsweise von Hora et al. (2009) und Heinle (2012) beschrieben, wobei letztere im Rahmen dieser Arbeit zur Anwendung kamen. Zum Lösen des aufgestellten Gleichungssystems werden 8 Versuchspunkte benötigt, welche in den vorgehenden Experimenten ermittelt wurden. Der Fließortexponent, welcher die Form des Fließortes insbesondere im Bereich der ebenen Dehnung beschreibt, wird für den eingesetzten Werkstoff mit $m=6$ angenommen (Camberg et al., 2019). Die ermit-

telten Modellparameter sind in Tabelle 4.9 aufgeführt. Die resultierende Fließortkurve und die zugehörigen Versuchspunkte sind in Abbildung 4.8 (a) dargestellt.

Tabelle 4.9: Parameter für die Fließortbeschreibung nach Barlat 2000

Parameter	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	m
Wert [-]	0,891	1,043	0,978	1,011	1,012	1,064	0,988	1,013	6

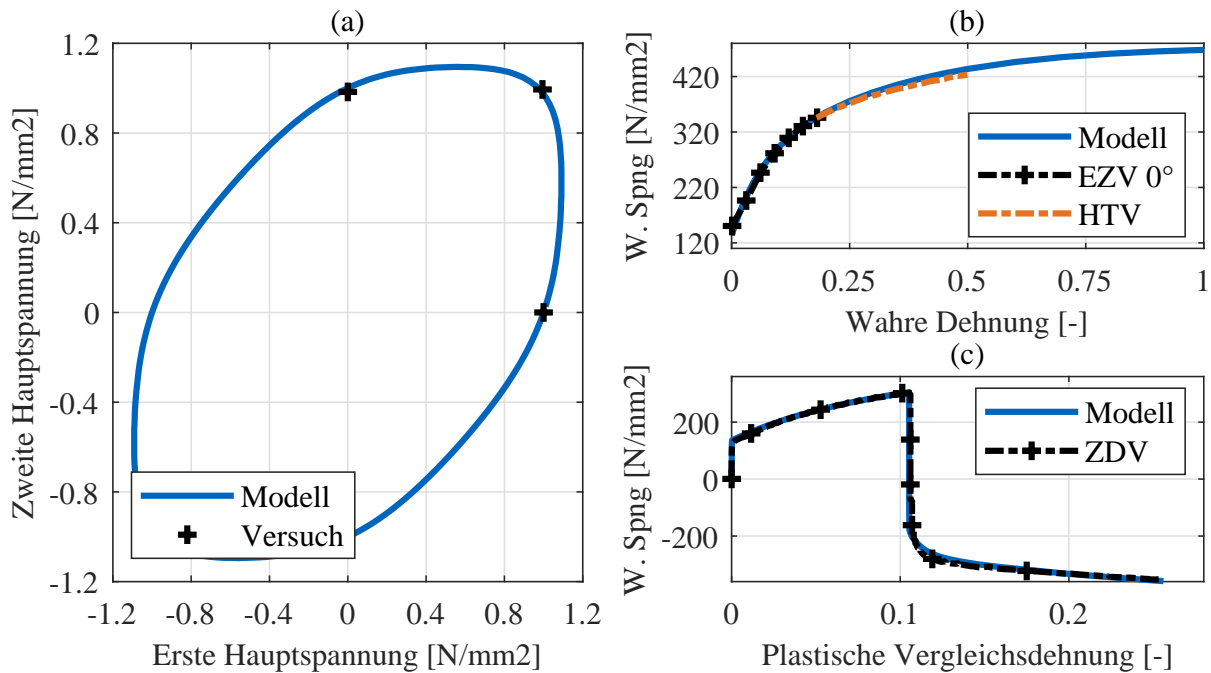


Abbildung 4.8: Analytische Beschreibung des elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens im Vergleich mit den zugrundeliegenden Versuchen: (a) Fließort (b) Fließkurve (c) Isotrop-kinematisches Verfestigungsverhalten

Verfestigungsgesetz

Durch das Verfestigungsgesetz wird die Art des plastischen Fließens beschrieben. Dabei kann grundlegend zwischen zwei Methoden unterschieden werden. Die rein isotrope Verfestigung führt bei einer Vergrößerung der Fließspannung zu einer Expansion der Fließortfläche. Bei der rein kinematischen Verfestigung erfährt die Fließortfläche bei gleichbleibender Größe eine Translation des Mittelpunktes, was zu einer Reduzierung der Fließspannung führt. Dieser Effekt ist als Bauschinger Effekt (Bauschinger, 1881) bekannt und tritt bei einem Richtungswechsel der Belastung auf. Im realen Prozessverhalten liegt eine Kombination beider Effekte vor, welche isotrop-kinematische Verfestigung genannt wird. Im Zuge dieser Arbeit gilt es den Lastwechsel mathematisch zu berücksichtigen, da bei der virtuellen Aneinanderreihung mehre-

rer Umformprozesse Entlastungen des Materials und Belastungswechsel auftreten können. Lee zeigt in seiner Arbeit beispielsweise die zyklische Belastung eines Werkstoffes beim Rollprofilieren und beschreibt die Notwendigkeit zur mathematischen Berücksichtigung des Bauschinger-effektes in Simulationsmodellen. (J. Lee et al., 2017; J.-s. Lee et al., 2018) Eine etablierte Methode zur numerischen Beschreibung des isotrop-kinematischen Verfestigungsverhaltens ist durch Chaboche und Rousselier (1983) beschrieben. Dabei werden zunächst zyklische Zug-Druck-Versuche an Minizugproben für verschiedene Umformgrade durchgeführt. Anschließend werden die benötigten Modellparameter unter Anwendung von Optimierungsmethoden kalibriert. Ein kalibrierter Parametersatz ist dabei abhängig von Fließkurve und Fließort und muss bei deren Änderung neu erstellt werden. Eine Möglichkeit zur Identifikation und Validierung der Modellparameter für die Anwendung in der FEM-Software LS-Dyna wurde von Suttner, Rosenschon und Merklein (2015) beschrieben. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Kalibrierung mit einem bereits existierenden Algorithmus innerhalb BMW durchgeführt. Ein Vergleich der Versuchsdaten mit dem kalibrierten Modell ist in Abbildung 4.8 (c) dargestellt.

4.3.2 Charakterisierung des Halbzeugs

Die bei BMW eingesetzten Rohre sind im allgemeinen längsnahtgeschweißt und folgen einer strengen Qualitätskontrolle, sowie engen Toleranzen. Im folgenden Abschnitt werden Experimente am angelieferten Halbzeug durchgeführt, um insbesondere Informationen über die Werkstoffverfestigung und die Eigenspannungen im Rohr zu bekommen. Die am Rohr geforderten Toleranzen, Schweißspezifikationen und Prüfkriterien sind im BMW Group Standard GS 93040 (2016-06) beschrieben. Versuche zur Charakterisierung von Rohren wurden von Hartl (2008) zusammengefasst. Neben rohrspezifischen Versuchen, wie bereits in Abschnitt 2.1.1 beschrieben, können auch Standardzugproben in Längsrichtung des Rohres entnommen und geprüft werden. Green (2008) beschreibt damit die im Rohr eingebrachte Kaltverfestigung, welche insbesondere eine Auswirkung auf nachgelagerte Umformprozesse hat.

Tabelle 4.10: Aufsprung des Rohres nach dem Aufsägen an verschiedenen Umfangspositionen

Rohrprobe	1	2	3	4	5	6	7	8	MW
Aufsprung [mm]	5,59	6,05	5,86	5,76	5,38	5,62	6,06	5,93	5,78

In DIN EN ISO 6892-1 (2009-12) Anhang E ist die Versuchsdurchführung und Berechnungsanweisung für Zugproben an Rohren beschrieben. Dabei wird der zur Bestimmung der Spannungs-Dehnungs-Kurve berechnete Anfangsquerschnitt auf den Rohrabschnitt übertragen und ist so-

mit auch vom Rohraußendurchmesser abhängig. Für die Zugprobenherstellung wird das Rohr zunächst abgelängt und anschließend in Längsrichtung aufgesägt. Dabei findet eine Rückfederung des Werkstoffes statt, bei dem die Eigenspannungen, welche durch das Verschweißen des Rohres beim Einformen erhalten bleiben, freigesetzt werden. Abbildung 4.9 (b) zeigt das dabei aufgesprungene Rohr. Der resultierende Aufsprung wurde an 8 Rohrproben mit unterschiedlichen Schnittpositionen gemessen und ist in Tabelle 4.10 dargestellt. Der Mittelwert wurde mit 5,78 mm berechnet.

Tabelle 4.11: Mechanische Kennwerte der Zugversuche an einer rollprofiliierten EN-AW5182 Rohrprobe in Abhängigkeit der Probenlage zur Schweißnaht

Probenlage (SN)	R_{p0,2} [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{80mm} [%]
0°	213	311	14,5	16,5
45°	207	308	15,0	19,0
90°	209	309	14,5	17,0
135°	201	304	15,0	18,0
180°	195	301	15,0	20,0
225°	201	303	15,0	18,5
270°	208	306	15,5	19,0
315°	203	303	16,0	19,5

Durch einen zweiten Längsschnitt erhält man den Blechabschnitt für die Zugprobe, welche abschließend entsprechend der Probenform H (DIN 50125, 2009-07) gefräst wird. Die ermittelten mechanischen Kennwerte am Rohr sind in Tabelle 4.11 dargestellt. Für die Aufnahme der Fließkurve wurde die Zugprobe in 45° zur Schweißnaht entnommen und wie in Abschnitt 4.3.1 mit konstanter Dehnrage von 0,0067 1/s geprüft. Ein Vergleich der Blech- und der Rohr-Fließkurve ist in Abbildung 4.9 (a) dargestellt. Der dabei zu erkennende, ruckelige Verlauf der Fließkurve kann durch den Effekt nach Protevin-Le Chatelier (PLC) erklärt werden und wird auch als dynamische Reckalterung bezeichnet (Macherauch und Zoch, 2011). Dieses Verhalten wird durch eine räumlich inhomogene und zeitlich instabile Verformung des Werkstoffes hervorgerufen und kann zu einem ungleichmäßig verfestigten Werkstück und rauen Bauteiloberflächen führen. Bei der Werkstoffauswahl und den geforderten Bauteileigenschaften gilt es diese Einflussfaktoren zu berücksichtigen.

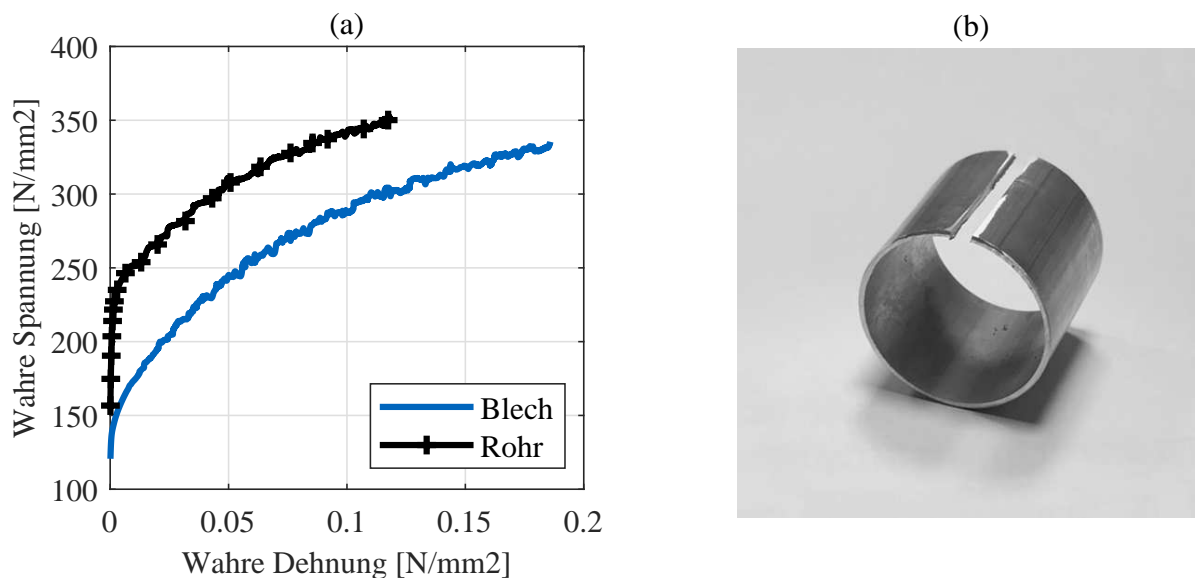


Abbildung 4.9: Ergebnisse der Rohr-Charakterisierung : (a) Vgl. von Blech- und Rohr-Fließkurve (b) Beispiel des Rohraufsprungs

4.4 Demonstrator

Als Zielbauteil für diese Arbeit wird die gebogene Zwischenstufe eines IHU- Heckklappenrahmens verwendet. Das gebogene Halbzeug wird dazu im Folgenden als Demonstrator bezeichnet und dient als Beispiel für die Durchführung und Validierung der entwickelten Methoden. Dieses Bauteil wird im BMW Werk Dingolfing bereits in Serie produziert, wodurch der Zugang zu Halbzeug, Werkzeug und Biegeteilen vereinfacht wird. Das fertige Bauteil ist in Abbildung 4.10 (a) dargestellt. Das Ausgangsrohr ist aus dem zuvor charakterisierten Werkstoff EN AW-5182 mit einem Soll-Rohraußendurchmesser 64,0 mm und einer Soll-Wandstärke von 2,0 mm spezifiziert. Die Soll-Rohrlänge beträgt 2650 mm. Nach Abschnitt 4.2.3 wurde das Bauteil digitalisiert und der Krümmungs- und Torsionsverlauf der Bauteil-Biegelinie zurückgeführt (Abbildung 4.10 (b,c)).

Das CNC-Biegeprogramm zur Herstellung des Bauteils ist in Tabelle 4.12 dargestellt. Darin sind gerade Segmente, sowie auch räumlich orientierte Bögen miteinander kombiniert. Der Prozessalgorithmus, der in der Maschinensteuerung der Fa. Neu implementiert ist (Murata und Kato, 2004), errechnet daraus die Bewegungskurven der Biegematrixe (Abbildung 4.11). Die Umrechnung des Biegeprogramms in den NC-Code wurde von Gantner (2008) beschrieben. Bei der Betrachtung der Bewegungskurven ist zu erkennen, dass die translatorischen und die rotatorischen Freiheitsgrade miteinander verknüpft sind. Diese Abhängigkeit lässt sich für die definierten Prozessparameter durch Gleichung 4.3 (mit $u_{k1} = -0,008138 \text{ mm}^{-1}$ und $u_{k2} = 1,154$) ausdrücken und reduziert somit die zu bestimmenden Freiheitsgrade auf den Rohrvorschub und

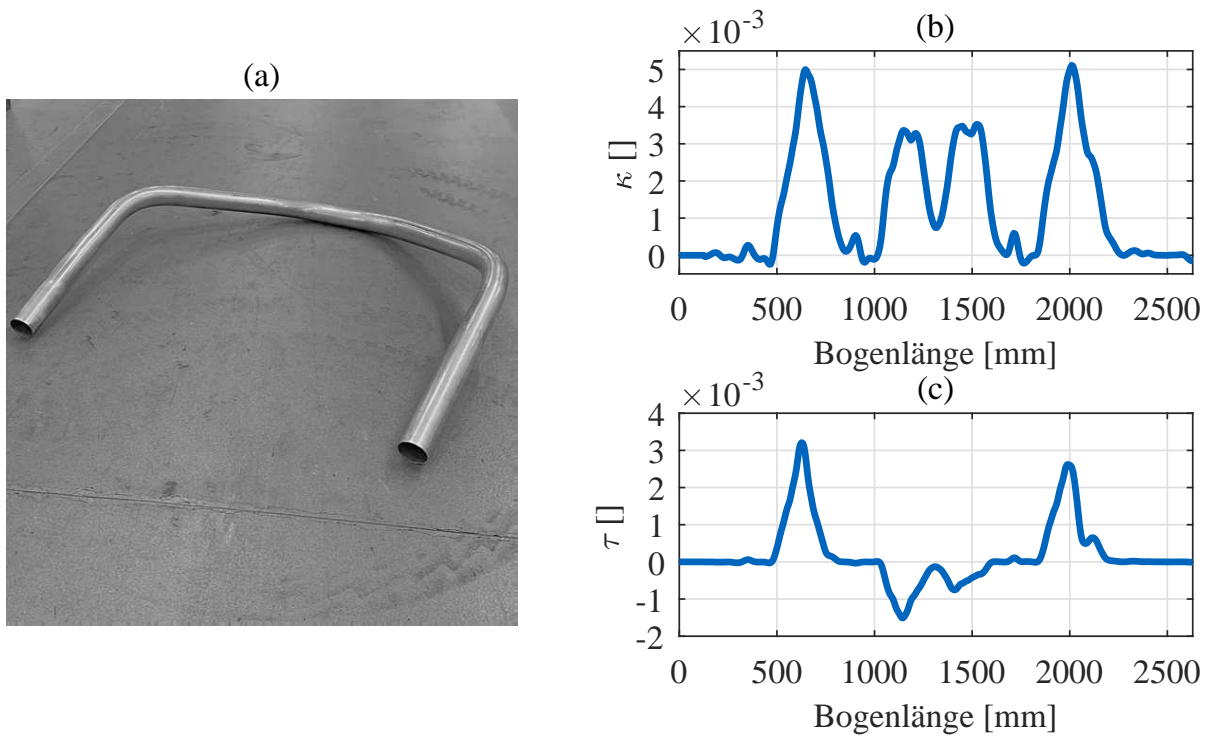


Abbildung 4.10: Geometrie des Demonstrators: (a) Bild des gebogenen Rohres (b) Krümmungsverlauf der Biegelinie (c) Torsionsverlauf der Biegelinie

zwei Translationsrichtungen der Biegematrixe.

$$r_{abs} = u_{k1} \cdot u_{abs} + u_{k2} \quad (\text{Gleichung 4.3})$$

Da die Erstellung des Biegeprogramms auf Experimenten basiert, muss bei einer Chargen- oder Prozessänderung dieses erneut ermittelt werden, welches insbesondere bei komplexen Geometrien einen entsprechenden zeitlichen und auch finanziellen Aufwand bedeutet.

Tabelle 4.12: Biegeprogramm zur Herstellung des Demonstrators

Zeile	Gerade [mm]	Radius [mm]	Winkel [°]	Richtung [°]
1	143.0			
2		2838.6	5.5	-175.5
3		196.4	67.0	104.6
4	311.0			
5		307.3	41.5	74.2
6		700.0	10.5	62.3
7		296.1	34.0	73.1
8	285.0			
9		185.1	75.5	107.6
10		2978.4	4.5	174.4

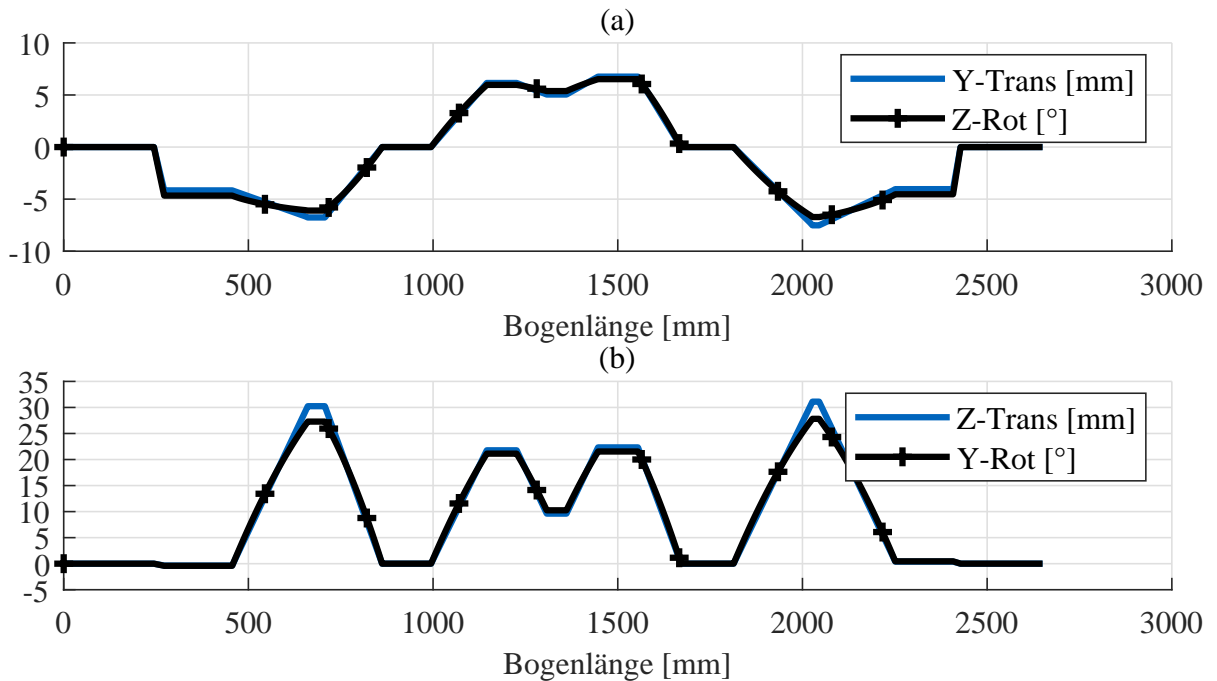


Abbildung 4.11: Biegekinematik der Maschinenachsen zur Herstellung des Demonstrators:
 (a) Translation der Y-Achse gekoppelt mit der Rotation um die Z-Achse (b)
 Translation der Z-Achse gekoppelt mit der Rotation um die Y-Achse

5 Experimentelle Biegeversuche

Im folgenden Abschnitt werden Biegeexperimente mit 2D- und 3D-Geometrien durchgeführt. Die Versuche liefern dabei Erkenntnisse über Prozesseinflussfaktoren und die vom Biegeverfahren erreichte Genauigkeit in der Serienproduktion. Die Auswertung der gebogenen Bauteile wird dabei so aufbereitet, dass ein Abgleich von Versuch zu Simulation in Abschnitt 6 möglich ist.

5.1 Zweidimensionale Untersuchungen

Zunächst soll an einfachen Bögen die von Murata und Mochizuki (1997) beim Freiformbiegen mit Matrize und von Hagenah, Vipavc, Vatter et al. (2010) beim 3-Rollenbiegen beschriebene Biegecharakteristik untersucht werden. Diese zeigt den Zusammenhang von Matrizenauslenkung und Biegeradius im konstanten Bereich (Groth, Engel und Langhammer, 2018) des Krümmungsverlaufes. Dazu wurden in der ersten Versuchsreihe verschiedene zweidimensionale Bögen hergestellt, wobei die Matrizenauslenkung (u_{abs}) variiert wurde. Die verwendete Halbzeug-Werkzeug Kombination entsprach dabei dem Serienwerkzeug (Abschnitt 4.1.2) und dem Halbzeug des Demonstrators (Abschnitt 4.3). Die Schweißnaht der Rohre wurde mit 90° zur Biegeebene festgelegt, um dessen Einfluss zu minimieren. Bei der Versuchsdurchführung wurde zunächst mit einer kleinen Matrizenauslenkung begonnen und diese anschließend schrittweise erhöht. Dabei konnte festgestellt werden, dass äquivalent zu den vorhergehenden Arbeiten (Murata und Mochizuki, 1997; Hagenah, Vipavc, Vatter et al., 2010) der Biegeradius mit zunehmender Auslenkung abnimmt. Währenddessen wurde beobachtet, dass bei kleiner werdenden Radien die Faltenbildung im Innenbogen des Radius zunimmt. Um eine Beschädigung des Biegewerkzeugs oder der Maschine, z.B. durch Knicken des Rohres zwischen den Werkzeugen zu verhindern, wurde die Versuchsreihe bei zu starker Faltenbildung abgebrochen. Der Biegewinkel resultiert aus der Länge des Rohrvorschubs während des Biegevorgangs und wurde bei abnehmendem Radius schrittweise erhöht. Dies ist notwendig, damit die Bogenlänge im konstanten Bereich für die Auswertung des Biegeradius nach Abschnitt 4.2.3 mindestens 200 mm beträgt (Vatter, 2014). Die gebogenen Bauteile sind in Abbildung 5.2 (a) dargestellt. Darüber hinaus wurde anschließend der Abstand von Biegematrize zu Führung (Bm_{kval}) von 84,87 mm auf 74,87 mm und 64,87 mm verringert. Halbzeug und Prozessparameter blieben dabei unverändert. Die ausgewerteten Bauteile sind in Abbildung 5.1 (a) dargestellt. Dabei ergibt sich für jeden Werkzeugabstand ein spezielles Verhältnis von Auslenkung zu Biegeradius (Biegecharakteristik). Für die Herstellung sehr großer Radien ist zunächst eine Mindestauslenkung zu erreichen, damit das Halbzeug überhaupt gebogen wird. Dies ist zum einen aus den Ab-

standstoleranzen zwischen den Werkzeugen und dem Halbzeug zu begründen, da zunächst bei beiden Werkzeugen der Kontakt zum Halbzeug hergestellt werden muss. Zum anderen wurde von Gerlach (2010) bereits beim 3-Rollenbiegen festgestellt, dass beim Initialkontakt zwischen Rohr und Werkzeug zunächst die elastische Formänderung überwunden werden muss, bis sich die plastische Verformung einstellt. Der elastische Spannungsanteil wird nach Verlassen der Werkzeuge durch den Modus der Rückfederung wieder freigesetzt. (Gerlach, 2010) Mit zunehmender Matrizenauslenkung ist bei allen Werkzeugabständen eine Abflachung der Biegecharakteristik zu erkennen, was auch bedeutet, dass eine kleine Abweichung der Matrizenposition bei einem großen Biegeradius einen höheren Einfluss auf die Geometrie ausübt als bei einem kleinen Biegeradius. Der kleinste Biegeradius wurde für die drei Werkzeugabstände (84,87 mm, 74,87 mm, 64,87 mm) mit 207,5 mm, 231,7 mm und 292,9 mm ermittelt. Nach Murata und Mochizuki (1997) ist beim Freiformbiegen der kleinste Biegeradius nicht vom Werkzeugabstand abhängig. Allerdings beginnt die Faltenbildung bei der Reduzierung des Werkzeugabstandes bereits bei größeren Biegeradien, weshalb der kleinste Radius mit verschiedenen Werten bestimmt wurde. Zusammenfassend betrachtet ist durch die Veränderung des Werkzeugabstandes ein deutlicher Einfluss auf den resultierenden Biegeradius und den Beginn von Biegefalten festzustellen.

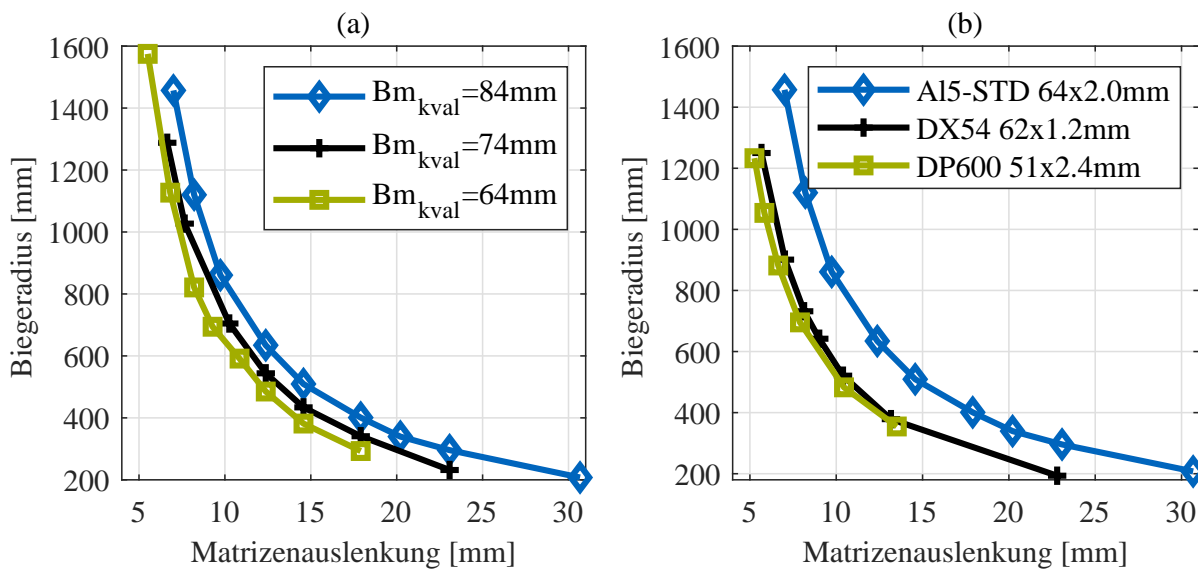


Abbildung 5.1: Zusammenhang zwischen Matrizenauslenkung und Biegeradius einzelner zweidimensionaler Bögen: (a) Einfluss des Werkzeugabstandes bei gleichbleibenden Halbzeug (b) Einfluss bei Veränderung von Halbzeug und Werkzeug

Die zweite Versuchsreihe wurde nach dem gleichen Ablauf, wie die erste Versuchsreihe durchgeführt. Dabei wurden diesmal neben der Halbzeug- Werkzeugkombination des Demonstra-

tors noch zwei weitere Halbzeug- Werkzeugkombinationen untersucht: ein Rohr mit einem Außendurchmesser von 62,0 mm und einer Wandstärke von 1,2 mm des Werkstoffes DX54 (BMW Group Standard GS 93032-2, 2017-01) und ein Rohr mit einem Außendurchmesser von 51,0 mm und einer Wandstärke von 2,4 mm des Werkstoffes DP600 (BMW Group Standard GS 93032-7, 2019-04). Eine Übersicht der Halbzeugparameter ist in Tabelle 5.1 ersichtlich. Da die Halbzeuge 2 und 3 nur im Rahmen der experimentellen Versuche und zur Validierung des Simulationsmodells in Abschnitt 6 eingesetzt wurden, wird auf die Beschreibung detaillierter Parameter verzichtet.

Tabelle 5.1: Eigenschaften der eingesetzten Halbzeuge

Halbzeug	Werkstoff	Durchmesser [mm]	Blechdicke [mm]	Werkzeugabstand [mm]
1	Al5-STD	64	2.0	84.87
2	DX54	62	1.2	72.12
3	DP600	51	2.4	61.12

Die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe sind in Abbildung 5.1 (b) dargestellt und zeigen eine ähnliche Biegecharakteristik wie die erste Versuchsreihe. Auffällig dabei ist der Abstand zwischen der Aluminiumlegierung und den beiden Stahlhalbzeugen, wobei hier mehrere Parameter gleichzeitig geändert wurden und somit keine genauen Schlussfolgerungen gezogen werden können. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Rohre des DX54 und des DP600 fast die gleiche Biegecharakteristik aufweisen, sich allerdings in ihren Abmessungen und den Werkstoffkennwerten deutlich unterscheiden. Dies führt zu der Erkenntnis, dass auch aus der Kombination unterschiedlicher Parameter eine ähnliche Biegecharakteristik resultieren kann. Der kleinste Biegeradius für das DP-600 Rohr wurde mit 354,6 mm gemessen. Bei größeren Matrizenauslenkungen wurde der Biegeprozess durch die Notabschaltung der Maschine unterbrochen, welche durch die Überschreitung des zulässigen Motordrehmoments ausgelöst wurde. Für die Beschreibung des Prozessverhaltens beim Freiformbiegen kann somit festgestellt werden, dass die Biegecharakteristik bei jeder Veränderung von Prozess-, Halbzeug- und Werkzeugparametern neu ermittelt werden muss.

Da bei der Durchführung der zwei Versuchsreihen vermehrt Falten im Innenbogen des Radius aufgetreten sind, wurde zuletzt der Einfluss der Rohrbeölung auf die Entstehung von Biegefallen ermittelt. Zum Einsatz kam wiederum die Halbzeug-Werkzeug Kombination des Demonstrators. Die Matrizenauslenkung wurde mit 25 mm festgelegt, was einen Biegeradius von ca. 270 mm ergibt. Die Menge der Rohrbeölung von außen durch die Führung und von innen durch

den Biegedorn wurde dabei von 0 (kein Öl) bis 9 (max. Ölmenge) variiert. Der einzustellende Beölungswert in der NC-Steuerung regelt dabei die Pumpenleistung der Schmieraggregate. Der Einfluss der Beölung auf die Faltenbildung ist mit zunehmender Schmierung von links nach rechts in Abbildung 5.2 (b) dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Tendenz zur Ausbildung von Falten mit zunehmender Beölung steigt. Des Weiteren ist im Bereich der Biegefalten auch eine Veränderung der Rohroberfläche festzustellen. Unabhängig von der Beölungsmenge konnte zudem beobachtet werden, dass der Schmiermittelauftrag sowohl in Rohrumfangsrichtung als auch in Rohrlängsrichtung inhomogen erfolgt.

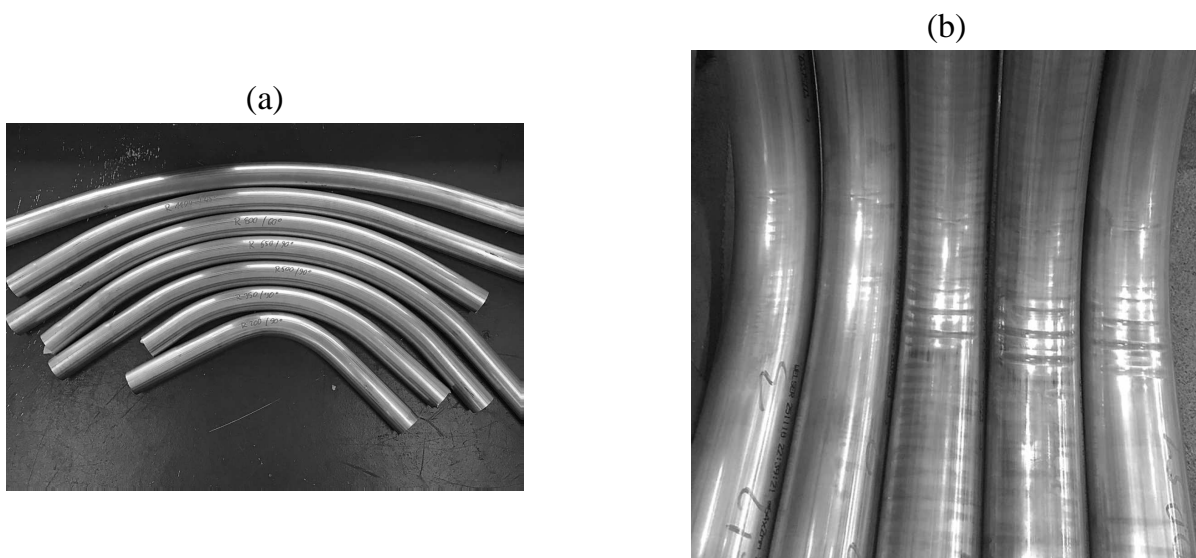


Abbildung 5.2: *Biegung einzelner zweidimensionaler Bögen: (a) Variation der Matrizenauslenkung zur Biegung unterschiedlicher Radien (Zunehmende Auslenkung von oben nach unten) (b) Variation der Beölungsmenge bei gleichbleibender Auslenkung (Zunehmend von Links (1) nach Rechts (9))*

5.2 Dreidimensionale Untersuchungen

Die räumlichen Biegeversuche wurden anhand der in Abschnitt 4.4 beschriebenen Demonstratorgeometrie durchgeführt. Dabei war das Ziel, die Maßhaltigkeit des Bauteils zu bewerten und die Prozessfähigkeit zu bestimmen. Die Schweißnahtlage der Rohre wurde entsprechend des Serienprozesses beibehalten. Insgesamt wurden 33 Biegeteile im vollautomatischen Programm der Biegezone hergestellt. Dies umfasst die Entnahme des Halbzeugs aus dem Rohrbehälter, die Ausrichtung der Schweißnaht, das Beladen der Biegemaschine, das Biegen und Entladen des Bauteils sowie das Ausschleusen des Bauteils vor der Vorformpresse. Die Taktzeit liegt hierfür bei ca. 30 Sekunden pro Bauteil. Nach der Entnahme der Bauteile wurden diese mittels des Universalmessarms (Abschnitt 4.2.2) digitalisiert und die Biegelinie zurückgeführt (Abschnitt

4.2.3). Bei der Messung wurde festgestellt, dass die Länge des Rohres nach dem Freiformbiegen im Vergleich zum Ausgangsrohr abgenommen hat. Die Messergebnisse sind in Tabelle 5.2 dargestellt. Die Ausgangslänge des Rohres beträgt nach der Spezifikation 2650 mm. Nach dem Biegeprozess wurde die mittlere Länge der Biegelinie mit 2630,6 mm bestimmt, was einer Stauchung des Bauteils von 19,4 mm entspricht.

Tabelle 5.2: Rohrlänge vor und nach dem Biegevorgang

Ausgangslänge	Mittlere Endlänge	Std	Min	Max
2650 ±1 mm	2630.6 mm	0.7525 mm	2629.3 mm	2632.0 mm

Da ein gebogenes Rohr keinerlei definierte Aufnahmepunkte für die Fixierung in einer Messvorrichtung besitzt, wurde die Biegelinie im Koordinatensystem entsprechend der Skizze in Abbildung 5.4 (a) ausgerichtet. Dazu wurde die Biegelinie anhand des, in der Biegemaschine verbleibenden Rohrendpunktes, in den Ursprung (0,0,0) verschoben. Anschließend wurde die Rohrgerade durch den 0-Punkt parallel zur globalen X-Achse ausgerichtet. Zuletzt wurde der Rohrendpunkt (des im Raum gelegenen Endes) in der XZ-Ebene fixiert, sodass $y=0$ und $z>0$ ist. Dadurch ist die räumliche Orientierung der 3D-Biegelinie eindeutig bestimmt und das Bauteil virtuell gelagert. Für die Bewertung der Bauteilstreuung wurde zunächst die mittlere Biegelinie bestimmt. Die Abweichung der einzelnen Biegeteile in den drei Richtungen zur Mittellinie ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Die max. Abweichungen treten in allen Richtungen gleichermaßen auf und liegen in X-Richtung bei +7,56 mm und -7,55 mm, in Y-Richtung bei +8,1 mm und -8,0 mm und in Z-Richtung bei +5,5 mm und -7,6 mm. Bei der Betrachtung einzelner Bauteile ist zu erkennen, dass die Biegelinien untereinander Schnittpunkte aufweisen, welches zu der Erkenntnis führt, dass der Krümmungs- und Torsionsverlauf nicht gesamthaft größer oder kleiner wird. Hier kann als Beispiel das Rohr 13 herangezogen werden, welches in Z-Richtung zunächst auf ca. +4,5 mm ansteigt und anschließend auf -7,5 mm abfällt. Um die Streuung des Biegeprozesses besser beurteilen zu können wird deshalb die Standardabweichung der totalen Abweichung von Bauteil zur mittleren Biegelinie bestimmt. Diese errechnet sich aus der Quadratwurzel der Summe der Varianzen in X-, Y- und Z-Richtung für jeden Punkt auf der Biegelinie.

Der Verlauf der Standardabweichung ist in Abbildung 5.4 (b) dargestellt. Diese steigt dabei, fast linear, mit zunehmender Bogenlänge auf 3,42 mm. Durch die lineare Betrachtung kann die Standardabweichung pro Meter Bogenlänge mit 1,3 mm angegeben werden. Die absoluten, maximalen und minimalen Abweichungen bzgl. der Mittellinie sind durch das Streuband ange-

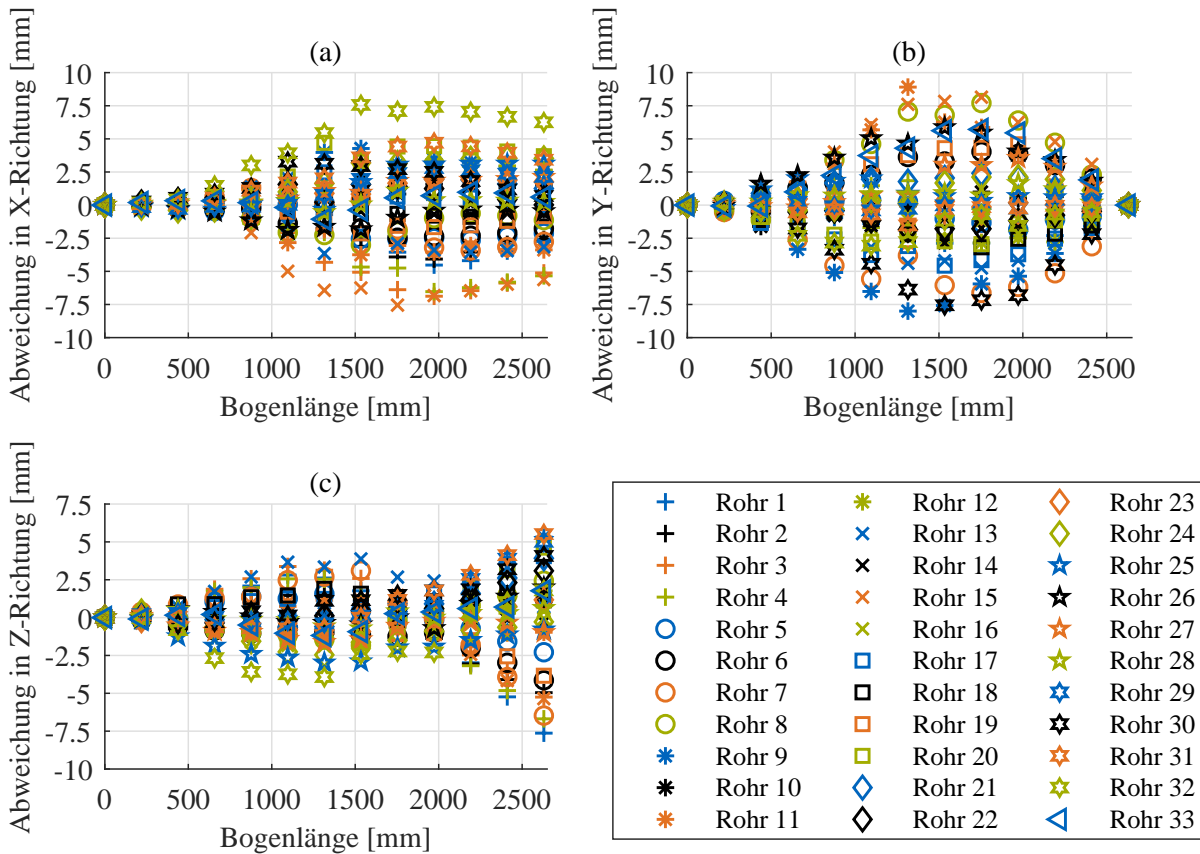


Abbildung 5.3: Auswertung der Biegeversuche mit der Demonstratorgeometrie: Abweichung der Bauteile bzgl. der Bogenlänge entlang der (a) X-Richtung (b) Y-Richtung (c) Z-Richtung

geben und betragen im Endpunkt der Biegelinie +4,92 mm und -7,11 mm. Die Prozessfähigkeit des Biegeverfahrens bzgl. der Biegelehre errechnet sich nach Dietrich und Schulze (2014) unter Verwendung der Standardabweichung zu 2,44 (Cp) und 2,14 (Cpk) und erfüllt somit den von BMW definierten Zielwert für den Biegeprozess (Cp/Cpk > 2).

Tabelle 5.3: Prozessfähigkeitsanalyse - 3D-Biegedemonstrator im Serienprozess

Prüfkriterium	Mittelwert	OSG	USG	Std	Cp	Cpk
Abstand der Rohrendpunkte	997,39 mm	1020,0 mm	970,0 mm	3,42 mm	2,20	2,14

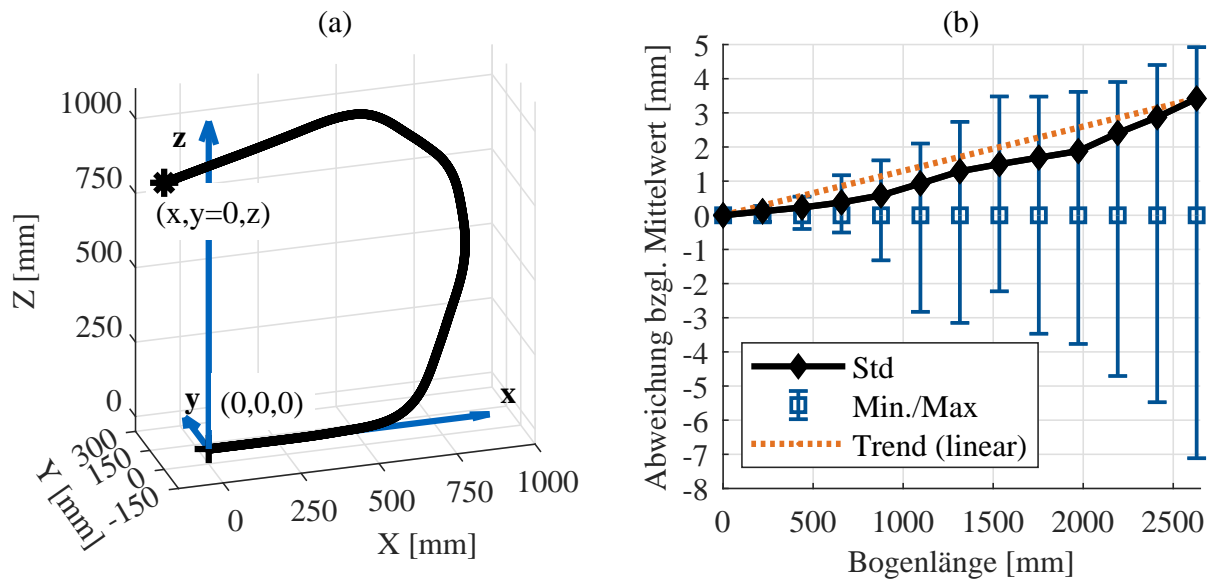


Abbildung 5.4: Auswertung der Biegeversuche mit der Demonstratorgeometrie: (a) Mittlere 3D-Biegelinie und Koordinatensystem für die Ausrichtung der Biegeteile (b) Gesamte Standardabweichung der Bauteile bzgl. der Bogenlänge gemessen zum Ursprung

5.3 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Die zuerst durchgeführten Versuche beschränkten sich auf 2D-Biegungen, welche zur Aufnahme der beschriebenen Biegecharakteristik dienten. Die Veränderung von Halbzeug- und Werkzeugparametern zeigte dabei die Sensitivität auf den Biegeprozess. Dies führt zu der Erkenntnis, dass die Biegecharakteristik bei unterschiedlichen Parametersätzen zwar einen ähnlichen Verlauf aufweist, die genaue Lage im Diagramm aber individuell zu ermitteln ist. Des Weiteren konnte bei den Versuchen die Entstehung von Biegefalten beobachtet werden, welche bei abnehmen Radien verstärkt wurde. In einem Nebenversuch konnte zudem die Abhängigkeit der Faltenbildung vom tribologischen Systems nachgewiesen werden. Neben den Biegefalten konnte auch das Knicken von Bauteilen zwischen den Werkzeugen beobachtet werden. Ursache hierfür war meist eine zu stark ausgelenkte Biegematrize. Dabei können neben dem zeitlichen Aufwand zum Entfernen des Bauteils auch Beschädigungen an den Werkzeugen, wie z.B. dem Abriss des Biegedorns, verursacht werden. Bei der Begutachtung der Rohroberfläche nach dem Biegen ist im Bereich des Erstkontaktes von Matrize zu Rohr eine Einfallstelle zu erkennen. Diese ist in Abbildung 7.5 ersichtlich und kann durch die Kombination einer starken Matrizenauslenkung mit erhöhten geometrischen Toleranzen von Rohr zu Biegewerkzeug entstehen. Effekte durch Veränderung von Prozess- und Werkzeugparametern werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit diskutiert (Abschnitt 7).

Die Produktion von 33 3D-Bauteilen der Demonstratorgeometrie ermöglicht im Rahmen dieser Arbeit die Bewertung der Prozessfähigkeit des Freiformbiegeverfahrens mit bewegter Matrize. Dabei wurden zunächst die vermessenen Bauteile gegenübergestellt und die Abweichung zur mittleren Biegelinie bewertet. Es ist zu erkennen, dass die Streuung der Bauteile in allen Koordinatenrichtungen gleichermaßen auftritt. Die Betrachtung der totalen Abweichung zwischen den Biegelinien ermöglicht die Bestimmung des Verlaufs der Standardabweichung, welche einen linearen Trend aufweist und bei 3,42 mm liegt (2630 mm Bogenlänge). Die daraus errechneten Prozessfähigkeitskennwerte erfüllen die vorgegebenen Zielwerte und ermöglichen die Qualifikation und Anwendung des Biegeverfahrens. Hierbei ist allerdings anzumerken, dass das dafür benötigte Toleranzband für die Weiterverarbeitung der Biegeteile von 50 mm im Vergleich zu herkömmlichen Toleranzen in der Blechverarbeitung von unter 2 mm um ein Vielfaches höher ist. Daraus ist abzuleiten, dass das Freiformbiegeverfahren derzeit nur in Verbindung mit einem nachgeschalteten Kalibrierprozess, wie dem IHU eingesetzt werden kann. Die Analyse relevanter Prozessstörgrößen ist in Abschnitt 7 beschrieben. Um den zeitlichen und finanziellen Aufwand an Experimenten dabei zu gering wie möglich zu halten, wird im folgenden Abschnitt zunächst ein detailliertes Simulationsmodell ausgearbeitet und den experimentellen Versuchen dieses Abschnittes gegenübergestellt.

6 Simulationsmodell für die Prozesskette Freiformbiegen

Für die Prognose der Bauteilherstellbarkeit und der virtuellen Prozessanalyse (Abschnitt 7) wird im folgenden Kapitel ein Simulationsmodell zur virtuellen Prozessabbildung erarbeitet. Dabei führt neben der Modellierung von Werkzeuggeometrien und der korrekten Prozessführung insbesondere die Beschreibung des elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens zu realitätsnahen Ergebnissen. Letztere zeigt sich vor allem bei der Modellierung von rohrförmigen Halbzeugen als schwierig, da es dafür abgesehen vom einachsigen Zugversuch keine standardisierte Testverfahren gibt. In Abschnitt 4.3 wurde bereits aufgezeigt, dass für die Definition eines Materialmodells eine Kombination mehrerer Versuche notwendig ist. Derzeit ist die auf einem einachsigen Zugversuch basierende, vereinfachte Werkstoffbeschreibung bei Rohren als Stand der Technik anzusehen. Hartl (2008) beschreibt in seiner Arbeit, dass die Durchführung von Zugversuchen zwischen ebenem Blech und Rohr auf Grund der Kaltverfestigung der Werkstoffe, besonders bei rollprofilierten und geschweißten Rohren zu unterschiedlichen Ergebnissen führen kann. Bei der Charakterisierung der Rohreigenschaften in Abschnitt 4.3.2 konnte eine Rückfederung des Rohres bei der Entnahme von Zugstäben beobachtet werden. Diese Entlastung entsteht dabei durch die Freisetzung von Eigenspannungen, welche in nachgelagerten Experimenten allerdings nicht weiter berücksichtigt werden. Um genau das Aufsummieren dieser Fehler bereits bei der Modellierung der gerollten Rohre auszuschließen, wird in dieser Arbeit eine alternative Möglichkeit zur virtuellen Beschreibung von eingeformten Halbzeugen aufgezeigt. Dabei wird der Simulationsprozess ausgehend vom ebenen Blech aufgebaut. Die mechanischen Eigenschaften lassen sich dabei durch standardisierte Versuche definieren und auch die Erstellung von Materialkarten (Abschnitt 4.3.1) ist in der Industrie weit verbreitet und zählt zum Stand der Technik (Banabic, 2010). Äquivalent zum Realprozess wird das ebene Blech zuerst zum Rohr eingeformt. Die Simulationsmethodik dieses Prozesses wird zunächst in Abschnitt 6.1 dargestellt und validiert. Anschließend ist in Abschnitt 6.2 das Simulationsmodell für den Freiformbiegeprozess beschrieben, welches danach in Abschnitt 6.3 anhand von Realversuchen validiert wird.

Die im Folgenden erarbeiteten Simulationsmodelle wurden in der kommerziellen Software LS-Dyna der Fa. LSTC umgesetzt. Dabei wurden grundlegende Einstellungen und Parameter gemäß dem Stand der Technik übernommen. Die Definition eines Simulationsmodells basiert auf der Beschreibung durch sog. Keywords, welche die Einstellungen, Netzinformationen, Knotenpunkte sowie Randbedingungen in strukturierter Form an den Gleichungslöser übermitteln. Wagner (2017) beschreibt in seinem Buch die Erstellung von Simulationsmodellen in der Umformtechnik mit LS-Dyna. Weiterführende Methoden und Modelle wurden beispielsweise von

Valberg (2010) zusammengefasst und erklärt. Standardparameter für die Umformsimulation mit LS-Dyna wurden von Maker und Zhu (2000) zusammengefasst. Eine Auflistung und Erklärung aller Keywords ist im LS-Dyna Manual zu finden (LSTC, 2016a; LSTC, 2016b). Die Theorie der implementierten Modelle und Routinen ist in einem separaten Theorie-Manual zu finden (LSTC, 2014).

6.1 Modellierung der Halbzeugherstellung

Die Simulation des kontinuierlichen Einformens von Rohren oder Profilen durch Rollengerüste mit geschlossenem oder auch offenem Querschnitt ist im Stand der Technik bereits erschlossen. In der industriellen Praxis wird dazu vorwiegend das Simulationstool Copra RF der Fa. DataM eingesetzt (Data M GmbH, 2018), welches auf dem FE-Solver Marc der Fa. MSC basiert. Simulative Untersuchungen und eine Beschreibung der Modellierungstechnik unter Anwendung von Copra RF wurde von Ferreira (2016) ausgeführt. Kang et al. (2014) beschreibt in seiner Arbeit die Simulation eines hochfesten Stahls in ABAQUS. Sheikh und Palavilayil (2006) simulieren die Herstellung eines offenen Profilquerschnittes in der Softwareumgebung SHAPE. Fei-chin und Oladipo (2000) verwendet die LSTC Software LS-Dyna, welche auch im Rahmen dieser Arbeit für die virtuelle Prozessmodellierung eingesetzt wird.

Eine Prinzipskizze des Rollprofilierens ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Dazu ist in Abschnitt 2.1.1 der grundlegende Prozessablauf beschrieben. Der Aufbau des Simulationsmodells ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Dabei lässt sich die Einformstrecke in zwei Bereiche unterteilen: die Umformgerüste, durch die die Formänderung der Platine zum Profil ausgelöst wird und die Kalibriergerüste. Letztere dienen zur Stabilisierung des Profils, sodass der geometrische Verzug durch das Schweißen oder die Materialrückfederung minimiert wird. Breitenbach (2007) hat in seiner Arbeit den Einfluss unterschiedlicher Einformstrecken hinsichtlich des verbleibenden Formänderungsvermögens untersucht. Dabei konnten die Einformgeometrie und die Stärke der Kalibrierung als Haupteinflussfaktoren benannt werden. In weiterführenden Arbeiten wurde die Einformgeometrie optimiert und somit die Kaltverfestigung im Rohr reduziert (Groche, Breitenbach et al., 2016). Da im Rahmen dieser Arbeit die genaue Einformstrecke des Rohrherstellers nicht bekannt war und auch zukünftig in der Phase der virtuellen Bauteilbewertung noch nicht bekannt sein wird, wird die Einformstrategie entsprechend der Analysen von Breitenbach (2007) umgesetzt.

Als Geometrievariante für die Einformung wird eine vereinfachte Art der zwei Radien- Einformung angewendet. Dabei wird das ebene Blech über eine Einformstrecke von 5 m und einer Gerüstanzahl von 17 von der Blechkante zur Blechmitte schrittweise weiter gekrümmt. Der

Einformradius jeder Umformstufe entspricht dabei dem Radius des fertigen Rohres, welcher mit zunehmendem Winkel tangential an das gerade Mittelstück des Werkzeugs angefügt wird. Die vertikale Ausrichtung der Einformstrecke wird als Talfahrt beschrieben. Dies bedeutet, dass der Mittelpunkt des Rohres nach dem Einformvorgang in der gleichen Ebene liegt, wie das Ausgangsblech vor Beginn des Prozesses. Zur Ausrichtung und Normalisierung des Rohres wurde der Außendurchmesser der Kalibrierstufe um 0,9 mm zum Sollmaß reduziert. Die Geschwindigkeit der Platine während der Umformung wurde entsprechend des Realprozesses auf 40 m/min festgelegt.

Bei der Definition des Simulationsmodells wurde auf Grund der vereinfachten Geometrie auf die Modellierung der Rollenkinematik verzichtet, welches auch den geometrischen Aufbau der Werkzeuge als Regelgeometrien ermöglicht. Numerisch sind sowohl die Umform- als auch die Kalibriergerüste als Starrkörper beschrieben und mit einer Elementkantenlänge von 1 mm approximiert. Zur Vermeidung von Beschleunigungseffekten der Platine zu Beginn der Berechnung, wurde der Prozess kinematisch invertiert, was bedeutet, dass die Platine im Raum fixiert wird und sich die Werkzeuge relativ dazu mit konstanter Geschwindigkeit entgegen der Einformrichtung bewegen. Um die Randeinfüsse in der vorderen Platinenkante bzgl. dessen Kontakts mit den Werkzeugkörpern zu reduzieren, werden die Ecken der Platine angespitzt. Die Länge der Platine wurde mit 400 mm festgelegt, die Breite errechnet sich aus der Abwicklung der neutralen Faser des Rohres. Die Platine wird durch ein elastisch-plastisches Materialmodell (Mat 133) definiert, dessen Kennwerte in Abschnitt 4.3.1 beschrieben werden. Als Elementformulierung werden standardmäßig unterintegrierte Schalenelemente vom Typ Belytschko-Tsay mit 7 Integrationspunkten über die Blechdicke eingesetzt. Die Kontaktformulierung zwischen Halbzeug und Werkzeug ist standardmäßig durch einen Penalty-Kontakt beschrieben. Die Elementkantenlänge des Rohres wurde mit 4 mm festgelegt, da dies eine Durchgängigkeit des FEM-Netzes bis zur fertigen Biegesimulation erlaubt und über alle Umformstufen hinweg zu genauen und effizienten Ergebnissen führt (Beulich, Craighero und Volk, 2017). Die Berechnung wurde mit einem expliziten Gleichungslöser durchgeführt. Zur Weiterverwendung der berechneten Ergebnisse des Einformverfahrens müssen anschließend die Rohrkanten in Längsrichtung geschlossen werden, was im Realprozess dem Schweißprozess gleichkommt. Dazu werden die Spannungs- und Dehnungsinformationen der Elemente der eingeformten Platine zuerst in Längsrichtung gemittelt und anschließend für alle Positionen in Umfangsrichtung exportiert. Die abgeleiteten Elementinformationen werden dann auf ein neu erzeugtes FEM-Netz eines geschlossenen Rohres übertragen, um die in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Eigenspannungen in den Folgeprozessen zu berücksichtigen (Beulich, Mertens et al., 2019).

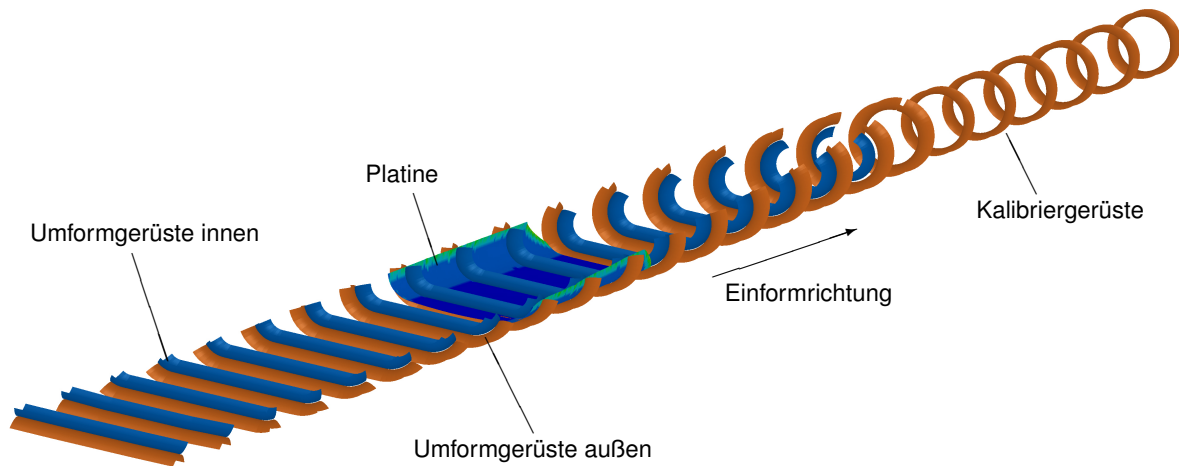


Abbildung 6.1: Simulationsmodell für das Rollprofilieren mit LS-Dyna

Validierung des Rollprofilierens

Zur Validierung des beschriebenen Simulationsmodells für die Rohreinrichtung werden im folgenden Abschnitt die in Abbildung 4.9 gezeigten mechanischen Eigenschaften des Rohres gegenübergestellt und mit den Ergebnissen des unter gleichen Bedingungen virtuell durchgeführten Versuchs verglichen. Als erster Abgleich dient der Zugversuch an der Rohrprobe, welcher im Realversuch einen Anstieg der Dehngrenze der Rohrprobe im Vergleich zum ebenen Blech gezeigt hat. Die Grundlage des virtuellen Zugversuchs bildet das virtuell eingeformte Rohr, welches äquivalent zum realen Halbzeug nach dem oben beschriebenen Prozess auch unter Eigenspannung steht. Der virtuelle Aufbau des Zugversuchs und der Zugprobe wurden parallel zum realen Versuch durchgeführt (Abschnitt 4.3.2) und als resultierende Kenngrößen die Dehngrenze $R_{p0,2}$ und die Zugfestigkeit R_m abgeleitet. Die Tabelle 6.1 zeigt die Gegenüberstellung der Kennwerte des Realversuchs mit denen des virtuellen Experiments. Dabei kann im Realversuch der beschriebene Anstieg des $R_{p0,2}$ von 147 MPa auf 209 MPa hervorgehoben werden. In der virtuellen Umgebung wurden zweierlei Rohrproben im Zugversuch ausgewertet. Dabei ist ersichtlich, dass ein Rohr ohne die Berücksichtigung der Vorverfestigung einen $R_{p0,2}$ von 137,57 MPa aufweist, was der Dehngrenze des ebenen Bleches entspricht. Die zweite Rohrprobe, mit Berücksichtigung der Vorverfestigung, zeigt hingegen äquivalent zum Realversuch auch im virtuellen Versuch einen Anstieg des $R_{p0,2}$ auf 210,3 MPa. Der Vergleich der Zugfestigkeiten weist auch einen ähnlichen Anstieg zwischen dem Blech und dem Rohr ohne Verfestigung (290 MPa zu 268,95 MPa) und den Rohren mit Vorverfestigung (309 MPa und 309 MPa) auf. Als zweiter Validierungsversuch wurde der Aufsprung des Rohres nach dem Aufsägen in Längsrichtung verglichen. Die numerische Berechnung der Rückfederung wurde dabei entsprechend der Parameter von Maker und Zhu Xinhai (2001) durchgeführt. In Tabelle 6.1 ist der

gemittelte Aufsprung der Rohrproben aus Abschnitt 4.3.2 mit 5,78 mm angegeben. Der virtuell ermittelte Vergleichswert liegt bei 7,3 mm. Trotz der festzustellenden Abweichung im Aufsprung von 1,55 mm zwischen Realversuch und Simulation, zeigen beide Versuche die gleiche Tendenz im Werkstoffverhalten und Spannungszustand. Unter Berücksichtigung der Sensitivität des Aufsprungsverhaltens von Werkstoffen auf Prozessparameter in der Umformtechnik und den bei der Erstellung des Simulationsmodells getroffenen Annahmen, kann das Validierungsergebnis bzgl. des Aufsprungs trotzdem als plausibel und aussagekräftig beschrieben werden. Die Ergebnisse der Validierung, die mittels des Vergleiches zweier Realexperimente und deren virtueller Nachbildungen durchgeführt wurden, zeigen in Bezug auf die Simulation des Rohrherstellungsprozesses dessen Notwendigkeit für die korrekte Modellierung der Halbzeuge als Basis für den nachfolgenden Freiformbiegeprozess. Die gute Übereinstimmung der Simulationen mit der Realität ermöglicht zudem die Weiterverwendung der Ergebnisse des Rohrherstellungsprozesses im Rahmen dieser Arbeit. (Beulich, Mertens et al., 2019)

Tabelle 6.1: Vergleich der real und virtuell bestimmten Kennwerte am Blech und am Rohr in 90° zur SN

Vgl. Zugversuch	Real		Virtuell	
	Blech	Rohr	Rohr ohne Verfestigung	Rohr Rollprofiliiert
$R_{p0,2}$ [MPa]	147	209	137,57	210,30
R_m [MPa]	290	309	286,95	309
Vgl. Eigenspannung				
Rohraufsprung gemittelt [mm]		5,78		7,3

6.2 Abbildung des Biegeverfahrens

Das Simulationsmodell zur virtuellen Abbildung des Freiformbiegens mit bewegter Matrize basiert auf den Annahmen, die zuvor bereits für den vorgelagerten Rohrherstellungsprozess definiert wurden. Dadurch ist eine Durchgängigkeit der Berechnung und der Ergebnisgrößen gewährleistet. Das Prinzip des Freiformbiegeverfahrens wurde bereits in Abschnitt 2.10 einleitend beschrieben und die relevanten geometrischen Zusammenhänge in einer Prinzipskizze (Abbildung 2.10) zusammengefasst. Die Konstruktion der Biegewerkzeuge ist in Abbildung 4.2 dargestellt und wurde für das Simulationsmodell entsprechend den Randbedingungen des Halbzeugs abgeleitet. Abbildung 6.2 stellt das Simulationsmodell während einer Biegeoperation dar. Im folgenden Kapitel wird nun auf die spezifischen Parameter des numerischen Modells eingegangen, Standardannahmen in der Umformsimulation und Einstellungen zu Biegeverfahren

sind in der Literatur detailliert beschrieben (Murata und Mochizuki, 1999; Gantner, H. Bauer, Harrison und De Silva, 2004; Gantner, H. Bauer, Harrison und Silva, 2005; Vipavc, 2018; Shi, Fu und Li, 2019; Beulich, Craighero und Volk, 2017).

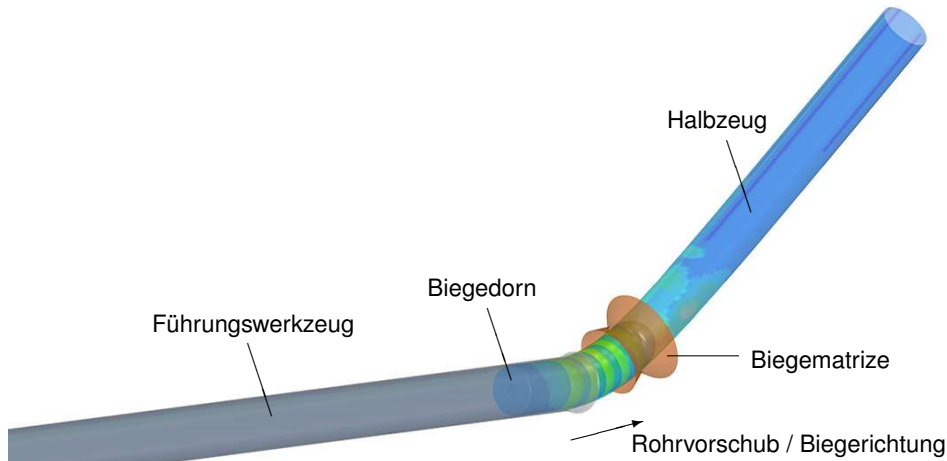


Abbildung 6.2: Simulationsmodell für das Freiformbiegen mit LS-Dyna

Halbzeug

Die korrekte Modellierung des Halbzeugs zur Biegesimulation ist als Grundlage für präzise Ergebnisse anzusehen. Dafür wurde das im vorigen Kapitel berechnete, eingeformte Rohr übernommen. Um die Durchgängigkeit der numerischen Berechnungen nicht zu verfälschen, resultiert daraus auch die Übernahme von Elementformulierung, Anzahl der Integrationspunkte über die Blechdicke sowie das Materialmodell aus der Rohreinformsimulation. Die Blechdicke des Rohres wird anschließend in zwei Sektionen unterteilt. Dabei wird im Bereich der Bandkanten die Blechdicke einer Elementreihe in Längsrichtung des Rohres als Schweißnaht definiert und dabei entsprechend des Halbzeugs eine erhöhte Blechdicke in Richtung Rohrinneenseite angenommen. Der Rest des Rohres wird mit einer konstanten Blechdicke in Umfangsrichtung definiert. Bei der Positionierung des Halbzeugs innerhalb der Biegewerkzeuge kann die Schweißnaht über eine initiale Rotation des Rohres entsprechend der Position im Realprozess oder Versuch ausgerichtet werden.

Biegewerkzeug

Die Biegewerkzeuge, die das Halbzeug von außen stützen, sind beim Freiformbiegen als Drehteile aus Werkzeugstahl ausgeführt und werden vor der Anwendung oberflächengehärtet und poliert. Davon abgeleitet kann eine Verformung der Werkzeuge während des Biegevorgangs vernachlässigt werden, was deren Definition als Starrkörper im Simulationsmodell ermöglicht. Die Positionierung der Werkzeuge im Simulationsmodell erfolgt entsprechend der halbzeugspezifischen Werkzeugkonstruktionen. Die Vernetzung der Werkzeuggestaltkörper wurde mit 1 mm Ele-

mentkantenlänge durchgeführt. Dabei ist insbesondere auf eine korrekte Darstellung der Werkzeuggraden von Biegematrix und Führung zu achten, da diese das Biegeergebnis maßgeblich beeinflussen.

Biegedorn

Der Biegedorn, der im Inneren des Rohres positioniert wird, besteht wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, aus mehreren Kugelsegmenten, die über ein Stahlseil miteinander verspannt werden. Die numerische Definition der Kugelsegmente und deren Ausrichtung zueinander wird über Gelenksbeschreibungen umgesetzt, welche mit Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften zur Stabilisierung der Dornbewegung beaufschlagt werden (Wong, Hamouda und Hashmi, 2002). Die Definition des Stahlseils und die dazu benötigten Materialparameter wurden von Stolle und Reid (2010) übernommen. Der Biegedorn ist innerhalb des Rohres entsprechend der realen Werkzeugbedingungen nur in Biegerichtung fixiert und kann somit innerhalb des Rohres dessen Bewegung folgen und Defekte, wie z.B. Biegefallen, realitätsnah darstellen.

Kontaktbedingung und Tribologie

In der numerischen Simulation erfolgt die Definition des Kontaktes zwischen zwei Körpern durch sog. Kontaktbedingungen, welche beim Biegen einerseits zu der Verformung des Halbzeugs führen, andererseits die Definition des tribologischen Systems zwischen diesen Körpern ermöglicht. Die Interaktion wird in LS-Dyna als Penalty-Kontakt beschrieben, welcher eine stabile und effiziente Berechnung zulässt. Die Beschreibung der Tribologie jeder Kontaktpaarung ist in Realität von einer Vielzahl an Parametern abhängig. Dazu zählen insbesondere die Menge und Art des Schmiermittels, die Oberfläche und das Material von Halbzeug und Werkzeug sowie die Bedingungen in der Kontaktzone, wie Flächenpressung und Relativgeschwindigkeit der Oberflächen (Eichhorn, Häfke et al., 1990). Im Rahmen dieser Arbeit werden diese Einflussfaktoren durch den konstanten Coulomb-Reibwert approximiert, da die speziell für die Umformung von Blechen entwickelten, mehrdimensionalen Reibmodelle auf Grund einer anderen Prozessführung und veränderten Beölungseigenschaften der Bauteile nicht auf das Rohrbiegen übertragbar sind. Gantner (2008) hat für das Freiformbiegen von Stahlrohren einen Reibwert zwischen Rohr und den Außenwerkzeugen von 0,04 angenommen, welcher für diese Arbeit übernommen wurde. Der Reibwert für Aluminiumrohre wurde auf 0,06 etwas erhöht sowie die Reibwerte für den Kontakt zwischen Biegedorn und der Rohrinneenseite auf Grund der geringeren Beölung im Rohrinneinneren mit 0,08 und 0,10 angenommen.

Biegekinematik und Simulationsablauf

Die Formgebung des Halbzeugs beim Freiformbiegen erfolgt durch die Kombination aus dem Vorschub des Rohres und einer dazu definierten Bewegung der Biegematrix im Raum. Die

Abbildung der Rohrtranslation wurde im Simulationsmodell durch eine Geschwindigkeitsrandbedingung definiert, welche bei allen Versuchen entsprechend der Realität während des Versuchsablaufs konstant ist. Die Bewegung der Biegematrize teilt sich, wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, in zwei translatorische und zwei rotatorische Freiheitsgrade auf. Diese Bewegungen werden im Simulationsmodell als Weg- bzw. Rotationsrandbedingungen beschrieben und erfordern die Definition der jeweiligen Position über den Biegeverlauf in Bezug auf die Simulationszeit (Gantner, Harrison et al., 2007). Die Translation wirkt dabei auf den gesamten Starrkörper und ermöglicht eine einfache Definition der Matrizenbewegung entlang der globalen Koordinatenachsen. Für die Definition der Rotationsbewegung muss entsprechend der Werkzeugkonstruktion der Drehpunkt der Biegematrize mitberücksichtigt werden, um die genaue räumliche Positionierung korrekt abbilden zu können. Für alle Simulationsexperimente im Rahmen dieser Arbeit wurde der Biegeablauf durch die Randbedingung aller 5 Freiheitsgrade in Abhängigkeit der Simulationszeit definiert.

Numerische Einstellungen

Die Einstellung und Parametrierung des FEM-Gleichungslösers beeinflusst neben der Berechnungsgenauigkeit auch die Berechnungsgeschwindigkeit und somit die Möglichkeit des Einsatzes der Modelle in der Industrie. Die im Rahmen dieser Arbeit gewählten Parameter sollen somit einen guten Kompromiss aus Berechnungsgeschwindigkeit und Aussagefähigkeit der Ergebnisse liefern. Dazu wurde ein explizites Berechnungsverfahren gewählt, da dies durch die kleinen Berechnungsintervalle in der Umformtechnik für das Abbilden von Defekten, wie z.B. Biegefalten, sehr gut geeignet ist (Wagner, 2017). Der Nachteil der expliziten Lösungsverfahren geht allerdings mit hohen Rechenzeiten einher, weshalb zu deren Reduzierung einige Annahmen getroffen wurden. Zum einen wurde die Geschwindigkeit der Rohrbewegung beim Freiformbiegen um den Faktor 10 erhöht, um den Berechnungsablauf zu verringern, zum anderen die Masse des zu verformenden Halbzeugs im Simulationsmodell erhöht, was bei der expliziten Berechnung einen direkten Einfluss auf die Bestimmung der Berechnungsintervalle hat und somit die Anzahl der notwendigen Rechenoperationen reduziert (LSTC, 2014). Die Berechnungen wurden auf dem BMW Highperformance-Cluster durchgeführt, was die Parallelisierung auf mindestens 20 CPU's (maximal 200) ermöglichte. Die daraus resultierende Rechenzeit lag bei kurzen (1 m) und wenig komplexen Biegeteilen bei ca. 1-2 Stunden und langen (2,5 m), sowie hochkomplexen Bauteilen bei 5-8 Stunden. Für die Komplexität des Umformverfahrens und die betrachteten Freiheitsgrade sind die angegebenen Rechenzeiten als gut zu bewerten und ermöglichen durch den Einsatz des Modells eine zeitnahe Beurteilung des Biegeverfahrens. Die Qualität und Genauigkeit der Simulationsmodelle wird im folgenden Abschnitt begutachtet und soll die Anwendbarkeit der aufgezeigten Methoden bestätigen.

6.3 Validierung und Bewertung der Ergebnisse

Für die Überprüfung der entwickelten Simulationsmodelle wurden die experimentell durchgeführten Versuchsreihen aus Abschnitt 5 verwendet. Die Validierung der Versuche wurde dazu wiederum in die Komplexität 2D Biegeversuche und Demonstratorgeometrie aufgeteilt.

Validierung der 2D Biegeversuche

Für den Abgleich des Simulationsergebnisses mit dem Realversuch wurden die Werkzeugbewegungskurven der Biegemaschine (Biegekinematik) als NC- Code exportiert, sowie die Werkzeuggeometrie und die Abmessungen der Halbzeuge in die Simulationsmodelle übertragen. Nach erfolgtem Biegevorgang wurden die Vergleichskenngrößen, Biegeradius und Biegewinkel, wie in Abschnitt 4.2.3 beschrieben, abgeleitet. Eine Gegenüberstellung von Realversuch und Simulation für die in Abschnitt 5.1 dargestellten Experimente ist in Abbildung 6.3 zu sehen. Dabei ist für die unterschiedlichen Halbzeuge und Werkzeugabstände neben der guten Übereinstimmung der Biegecharakteristik auch die Übereinstimmung der Biegewinkel festzustellen. Die relative Fehlerabweichung zwischen Experiment und Simulation ist in Tabelle 6.2 abgebildet. Der ausgewiesene mittlere, relative Fehler ($f_{\text{rel/mw}}$) beschreibt dabei den Mittelwert aller Versuchsstützstellen z.B. für eine Halbzeug-Werkzeug Kombination und ist für die Bewertung von Biegeradius und Biegewinkel getrennt aufgeführt. Dabei liegt der mittlere, relative Fehler der Aluminium-Halbzeuge für den Biegewinkel (BW) zwischen 2,27 und 3,33 % und für den Biegeradius (Rad) zwischen 2,27 und 7,27 %. Die weiteren Halbzeuge weisen eine etwas höhere Abweichung in Bezug auf den Biegewinkel von 5,40-5,52 % und Biegeradius von 4,13-10,92 % auf. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Fokus dieser Arbeit auf den Werkstoff AL5-STD gelegt wurde und dafür ein deutlich höherer Detaillierungsgrad von Material und Prozessmodell gewählt wurde.

Tabelle 6.2: Fehlerbewertung der Simulationsergebnisse

Variante	$f_{rel/mw}$ [%]	$f_{rel/min}$ [%]	$f_{rel/max}$ [%]
AL5-STD $Bm_{kval}=84$ mm Rad	2.27	0.48	4.81
AL5-STD $Bm_{kval}=84$ mm BW	2.53	0.29	7.95
AL5-STD $Bm_{kval}=74$ mm Rad	2.83	0.14	9.20
AL5-STD $Bm_{kval}=74$ mm BW	3.33	0.12	8.51
AL5-STD $Bm_{kval}=64$ mm Rad	7.27	2.94	15.20
AL5-STD $Bm_{kval}=64$ mm BW	2.27	0.48	4.81
DX54 Rad	10.92	6.08	14.77
DX54 BW	5.52	1.23	9.16
DP600 Rad	4.13	0.02	6.46
DP600 BW	5.40	1.27	7.74

Grundsätzlich zeigen die errechneten Fehler zwischen den Simulationsergebnissen und den realen Experimenten eine sehr gute Übereinstimmung. Dies gilt sowohl für die Variation der Halbzeuge, die Variation der Werkzeugparameter, als auch für die unterschiedlichen Geometrien welche durch Variation von Matrizenauslenkung und Rohrlänge erzielt wurden. Dabei ist anzumerken, dass tendenziell höhere Abweichungen im Bereich kleiner Biegeradien auftreten. Wie bereits in Abschnitt 5.1 beschrieben wurde, reagiert die Formänderung der Rohre im Bereich kleiner Matrizenauslenkungen relativ sensibel, welches zum einen an der Überlagerung von elastischer und plastischer Formänderung und zum anderen am größeren Einfluss von Werkzeugtoleranzen und Maschinengenauigkeit liegt. Die Abweichungen im Bereich der Biegewinkelgenauigkeit lassen sich einerseits auf den Fehler des Biegeradius zurückführen, welcher in einem direkten Bezug zum Biegewinkel steht, aber auch auf den Einfluss von Reibungseigenschaften sowie Biegekräfte, welche durch die Annahmen im Simulationsmodell nur annäherungsweise dargestellt werden können.

Neben der rein geometrischen Bewertung der Simulationsergebnisse wurden auch noch die Untersuchungen aus Abschnitt 5.1 zur Variation der Schmiermittelmenge herangezogen. Da die Beölung nicht als Parameter im Simulationsmodell angepasst werden kann, wurde alternativ der Coulomb-Reibwert in einer Simulationsstudie untersucht. Dazu wurden mehrere Simulationsläufe des Aluminiumrohres mit einem Biegeradius von 270 mm durchgeführt und dabei der Reibwert für jede Kontaktpaarung zwischen Halbzeug und Führung, Matrize und Biegedorn angepasst. Die gebogenen Rohre wurden dazu mit dem von Engel, Zehner et al. (2014)

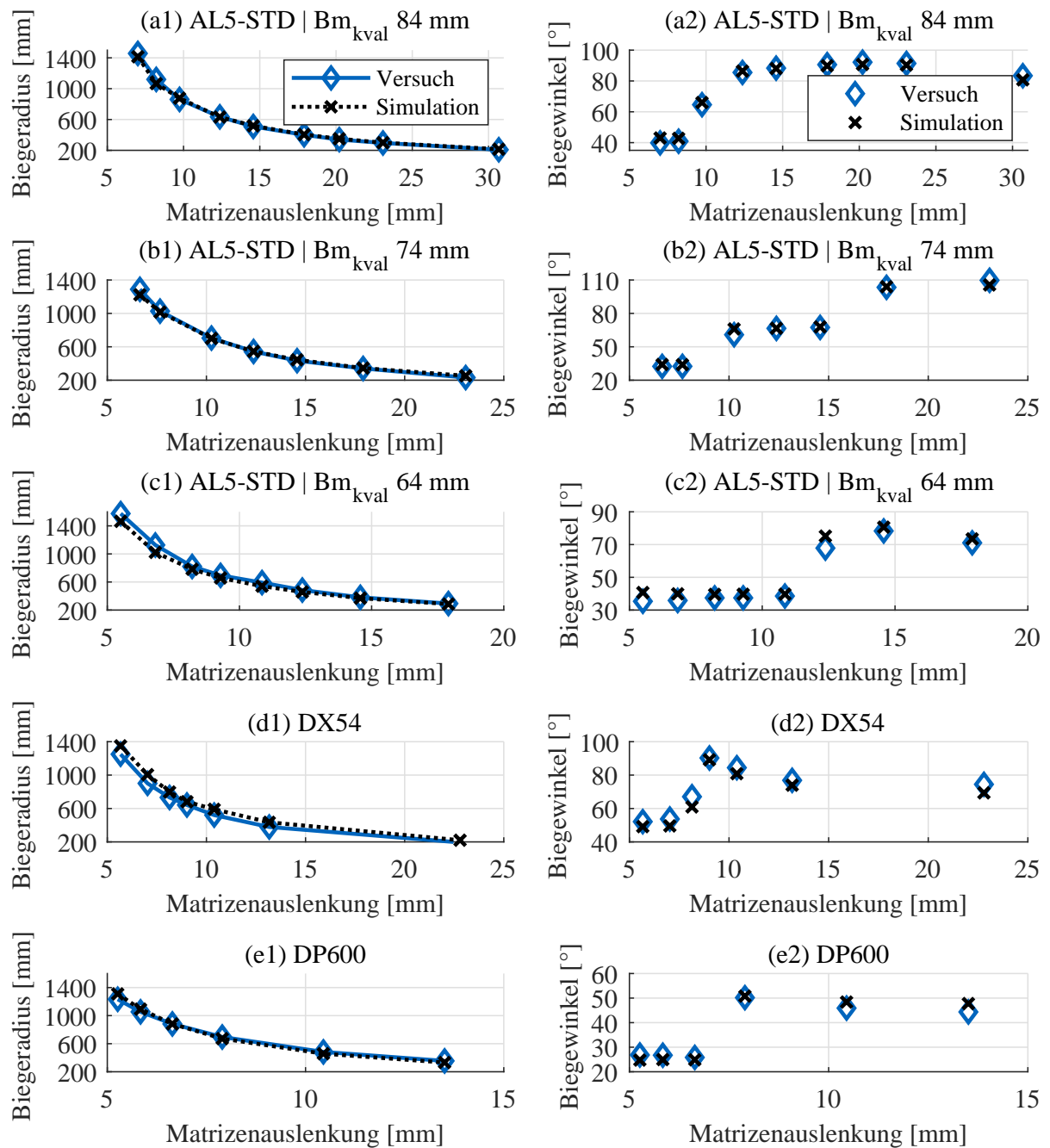


Abbildung 6.3: Vergleich zwischen 2d-Biegeversuchen und dem FEM-Simulationsmodell für verschiedene Geometrievarianten

beschriebenen Falten-Vergleichswert (Abschnitt 4.2.3) ausgewertet. Die geometrische und mathematische Ausprägung verschiedener Experimente ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Der dabei ansteigende Vergleichswert von 0,0119 zu 0,0268 beschreibt die Ausprägung und Stärke der Biegefalten. In Abbildung 6.5 ist der Einfluss der Reibwerte auf den Vergleichswert dargestellt. Darin ist für alle Kontaktpaarungen eine Abnahme der Faltenbildung mit zunehmendem Reibwert zu erkennen. Dabei weist der Kontakt zwischen Werkzeugen und der Rohraußenseite einen flacheren Kurvenverlauf als die Kontaktpaarung zum Biegedorn auf. Bei Letzterer tritt

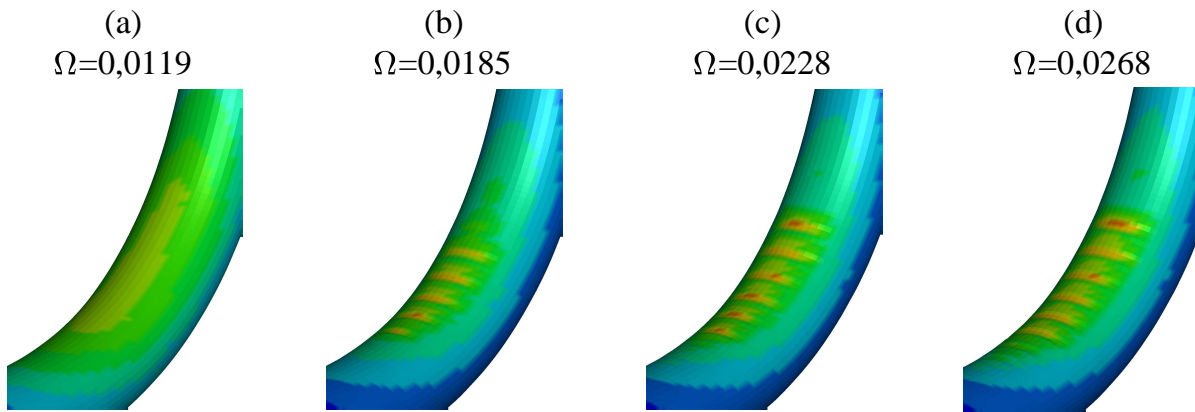


Abbildung 6.4: Faltenbewertung am Rohrrinnenbogen anhand von Beispielen (a) (b) (c) (d)

einen nahezu sprungartigen Abfall der Biegefaltenausprägung bei Reibwerten ab 0,14 auf.

In den Realversuchen konnte in Abbildung 5.2 bei Abnahme des Schmiermittels eine Korrelation zur Abnahme von Biegefalten aufgezeigt werden. Übertragen auf die dargestellten Simulationsergebnisse ist hier wiederum der gleiche Trend zu erkennen. Dabei korreliert die Zunahme des Reibwertes in der Simulation mit der Abnahme des Schmiermittels im Experiment. Neben dem Freiformbiegen reagieren auch weitere Biegeverfahren sensitiv auf die Bildung von Biegefalten, die mitunter stark durch das tribologische System beeinflusst werden (Tube Form Solutions, 2016). Eine vertiefte Analyse des Freiformbiegeprozesses, auch in Bezug auf die Faltenbildung und dessen Einflussfaktoren, wird in Abschnitt 7 diskutiert.

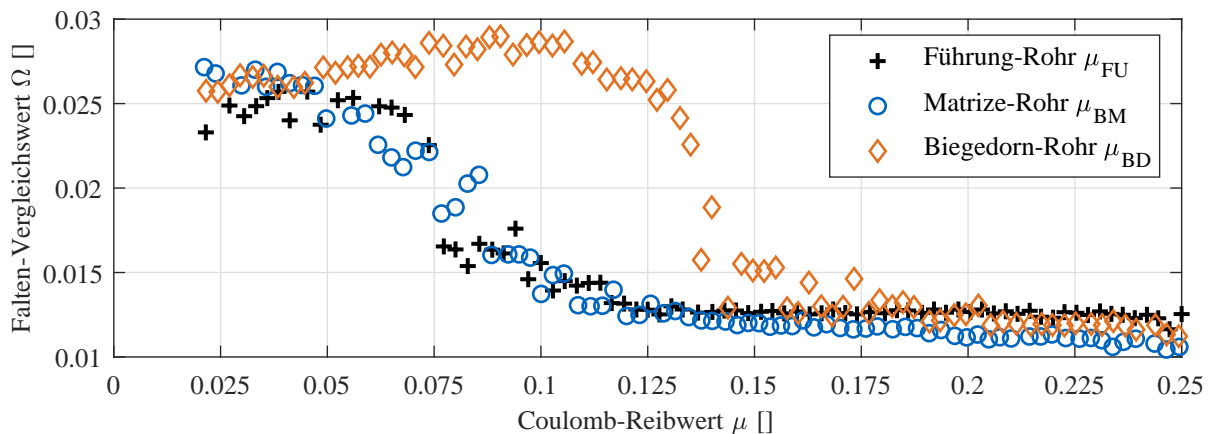


Abbildung 6.5: Einfluss der Reibwerte aller Kontaktpaarungen auf die Bildung von Falten im Rohrrinnenbogen

Validierung der Demonstrator Geometrie

Neben der Validierung einfacher Biegegeometrien muss die Simulationsmethodik auch für komplexe Rohrgeometrien mit dreidimensionalem Biegeverlauf präzise Ergebnisse liefern. Dazu wurde das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Demonstratorbauteil (Abschnitt 4.4) durch die Simulation reproduziert. Die Biegekinematik wurde wiederum vom CNC-Code der Biegemaschine in das Modell übertragen und ist durch den Verlauf aller 4 Freiheitsgrade der Biegematrix (Abbildung 4.11) bestimmt. Die Vorschubgeschwindigkeit des Rohres wurde, wie im Modellaufbau beschrieben, mit einem Faktor von 10 skaliert und beträgt somit 2000 mm/s. Die Validierung des Simulationsergebnisses mit den Realversuchen (Abschnitt 5.2) wurde anhand mehrerer Kenngrößen durchgeführt und ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Als erstes Vergleichskriterium für dreidimensionale Bauteile dient die Geometrie des simulierten Rohres, welche durch den Krümmungs- und Torsionsverlauf (Abb. 6.6 (b),(c)) beschrieben wird und in einer 3D-Biegelinie (Abb. 6.6 (a)) resultiert. Die zum Vergleich verwendete Versuchs-Biegelinie umfasst die Mittelkurve aller in Abschnitt 5.2 vermessenen Bauteile und ist zur errechneten Biegelinie mittels Best-Fit ausgerichtet. Dabei beträgt die absolute Abweichung der Biegelinien-Endpunkte 42,57 mm am oberen Kurvenende (+Z-Richtung) und 1,58 mm am unteren Kurvenende (-Z-Richtung). Bezogen auf die Öffnung des Profils, gemessen zwischen den Endpunkten der Rohre, beträgt der relative Fehler von Simulation zu Versuch 5,19 %. Dies ist, bezogen auf die Komplexität der Biegegeometrie und die Annahmen der Simulationsmethodik, sowie die Fehlern in der Messmethodik ein realistisches Ergebnis, was wiederum die Funktion und Präzision des Simulationsmodells bestätigt. Dieses Ergebnis spiegelt sich auch im Krümmungsverlauf wider, welcher bzgl. Position und Verlauf der Biegungen eine sehr gute Übereinstimmung der Experimente aufweist. Lediglich im Torsionsverlauf zeigt sich eine leichte Abweichung in der Ausprägung den Torsionsspitzen, welche die räumliche Verdrehung des Bauteils leicht beeinflussen können und zur zuvor beschriebenen Abweichung führen können.

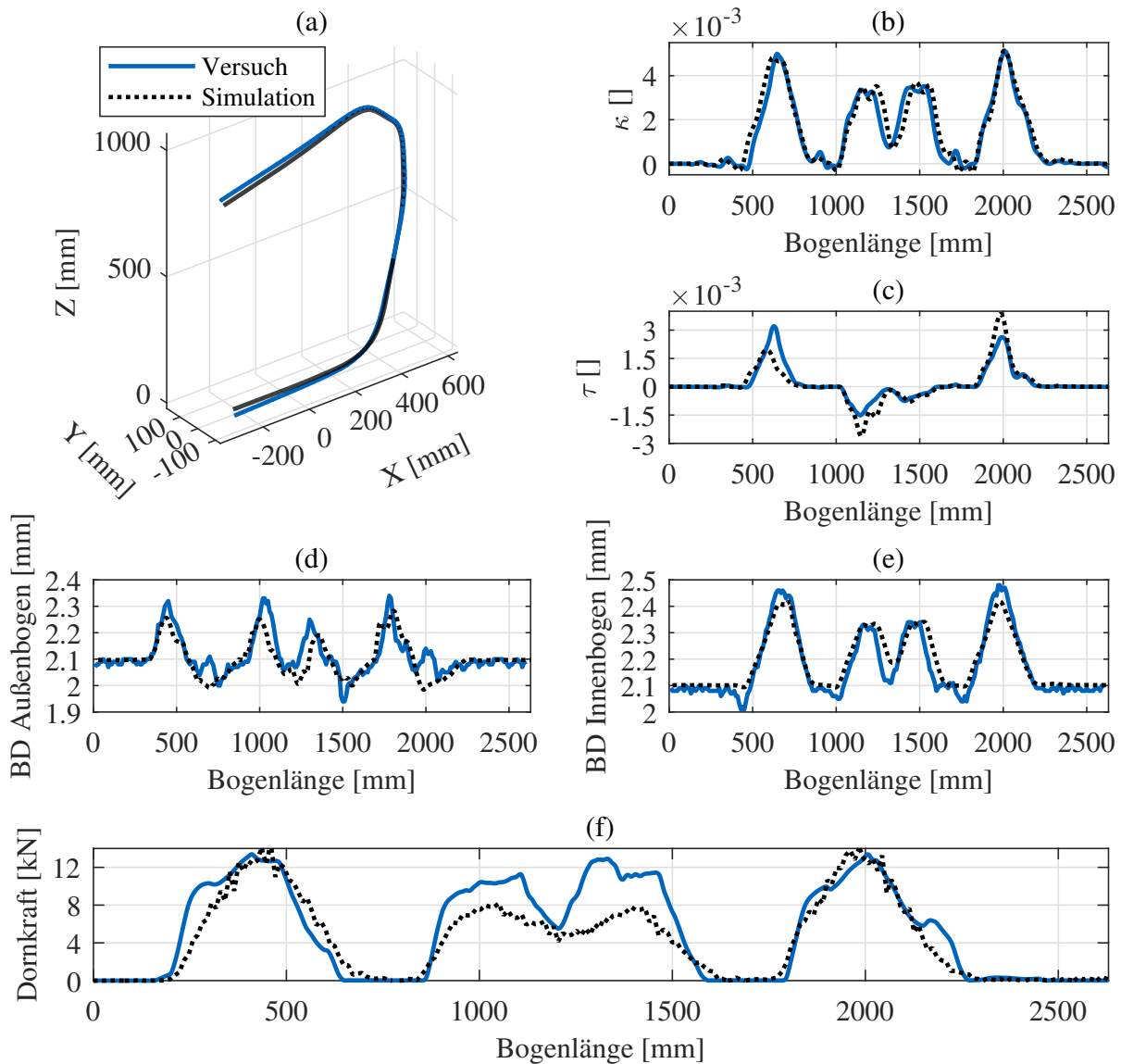


Abbildung 6.6: Vergleich des Demonstrators und dem FEM-Simulationsmodell (a) 3D-Biegelinie (b) Krümmungsverlauf (c) Torsionsverlauf (d) Blechdickenverlauf am Außenbogen (e) Blechdickenverlauf am Innenbogen (f) Dornkraftverlauf

Neben den geometrischen Ergebnissen der Simulation soll durch den Vergleich der Rohrblechdicke auch eine Bewertung der Umformergebnisse ermöglicht werden. Dazu sind in Abbildung 6.6(d) und (e) die Blechdickenverläufe am Rohrrinnen- und außenbogen dargestellt. In der Simulation wurde hierfür von jedem Element entlang eines Pfades am Außen- und Innenbogen die Blechdicke ausgewertet. Die Daten der Experimente basieren auf dem Mittelwert aus 3 gemessenen Demonstratorbauteilen, wobei entlang der Bögen jeweils im Abstand von 1 mm die Blechdicke bestimmt wurde. Die Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung von Experiment und Simulation. Am Innenbogen ist die Aufdickung des Materials in den jeweiligen

Bögen zu beobachten, wobei die Blechdickenzunahme bei stärkerer Bogenkrümmung größer ausfällt und im Maximum 0,4 mm beträgt. Der Blechdickenverlauf am Außenbogen zeigt zunächst eine leichte Ausdünnung des Materials in den Bögen, welche bzgl. der Position zu der Aufdickung des Innenbogens passt. Des Weiteren ist eine Aufdickung des Materials unmittelbar vor Beginn der Krümmung festzustellen, welche im Maximum 0,24 mm beträgt. Dieses Phänomen ist von klassischen Biegeverfahren nicht bekannt und zeigt eine Besonderheit des Freiformbiegens mit bewegter Matrize. Die festgestellte Aufdickung wird durch die Biegematrize verursacht, welche zur Erzeugung einer Bogenkrümmung von außen auf das Rohr drückt. Diese Kontaktstelle ist auch an der Rohroberfläche zu erkennen und kann als Delle beschrieben werden. Durch das Einwirken der Matrize auf das Rohr und dem gleichzeitigen horizontalen Vorschub des Rohres kommt es somit zu einer Stauchung des Rohres an der Außenseite, welches in der Blechdicke durch die Aufdickung erkennbar ist. Diese Beobachtung erklärt somit auch die in Tabelle 5.2 gemessene Verkürzung der Halbzeuge nach Entnahme aus dem Biegeprozess um ca. 20 mm. Neben der Bestätigung von Biegegeometrie und den Umformeigenschaften zeigt Abbildung 6.6 (f) den Vergleich der gemessenen Kraft an der Biegedornaufnahme im Experiment und in der Simulation. Dieser Vergleich soll zur Einordnung der im Simulationsmodell getroffenen Annahmen dienen und die Vergleichbarkeit der Kräftelevels bestätigen. Dafür wurde im Experiment ein Kraftaufnehmer installiert (Abschnitt 4.2.4), welcher innerhalb der Biegungen Kraftspitzen von bis zu 13,4 kN aufnimmt. Es ist zu erkennen, dass im Realversuch das Kraftniveau für alle Bögen annähernd auf demselben Niveau liegt, wobei im Simulationsmodell die Ausprägung des Kraftniveaus eine Korrelation zur Kurvenkrümmung aufweist. Diese Differenz kann generell durch eine Vielzahl an Vereinfachungen im Simulationsmodell hervorgerufen werden, wobei in der Umformtechnik insbesondere die tribologischen Eigenschaften, beeinflusst durch Schmiermittelauftrag, Flächenpressung und Wärmeeintrag in der Kontaktzone eine starke Sensitivität zu den auftretenden Kräften aufweisen. Generell beschreiben die Kraftverläufe trotzdem einen ähnlichen Verlauf, weshalb auch hier die Aussagefähigkeit des Simulationsmodells gegeben ist.

Zur Bewertung der Bauteilherstellbarkeit im Biegeverfahren ist neben der geometrischen Reproduktion auch die Abbildung des Bauteilversagens, bzw. die Darstellung von Schadensbildern in der Simulation relevant. Bei der Durchführung der Biegeversuche wurde bereits mehrfach das Knicken der Bauteile zwischen den Werkzeugen beobachtet, meistens durch eine übermäßige Auslenkung der Biegematrize verursacht. Dieser Effekt tritt dementsprechend bei einer Unterschreitung des kleinsten Biegeradius eines Halbzeugs auf und beschreibt somit eine Prozessgrenze des Biegeverfahrens. Eine direkte Vergleichbarkeit dieses Schadensmusters von Versuch zur Simulation war prozessseitig leider nicht möglich, da beim Entstehen eines Versagensbil-

des der Realprozess zur Vorbeugung von Schäden an der Biegemaschine sofort unterbrochen wird. In Abbildung 6.7(a) und (b) sind trotzdem zwei Beispiele für das Versagen der Halbzeuge bei inadäquater Prozessführung dargestellt. Dabei entsteht das Versagen bei (a) durch die Unterschreitung des kleinsten Biegeradius und bei (b) durch eine zu schnelle Verdrehung der Werkzeuge bei einer dreidimensionalen Biegung mit Torsion, wodurch sich eine Torsionsfalte im Bogenübergang ergibt. Beide Beispiele zeigen Bauteilfehler, die auch in Realität auftreten können und somit für die virtuelle Bewertung der Bauteilherstellbarkeit von Biegeteilen von großer Relevanz sind. Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass die in diesem Abschnitt entwickelte Simulationsmethodik für verschiedenste einfache und komplexe Biegegeometrien eine gute Übereinstimmung liefert und für die virtuelle Bewertung des Freiformbiegeverfahrens verwendet werden kann. Darüber hinaus wurde die Robustheit des Simulationsmodells bestätigt, indem die Veränderung verschiedener Prozessparameter wie Halbzeug, Werkzeuggeometrie und Biegekinematik untersucht wurden.

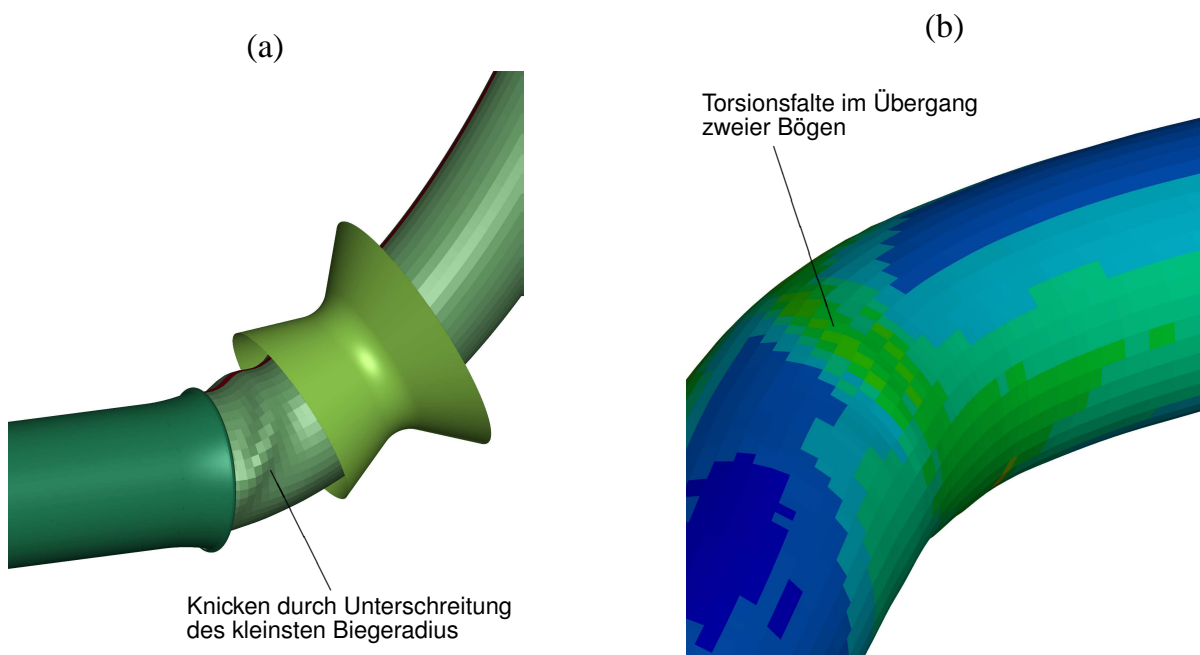


Abbildung 6.7: Beispiele für das Rohrversagen im Simulationsmodell

7 Prozesswirkmechanismen

Analysen aus dem Stand der Technik beschreiben bereits den Einfluss verschiedener Prozessparameter auf unterschiedliche Biegeverfahren. Darin werden Sensitivitätsanalysen und Parameterstudien zum Rotationszugbiegen (Strano, 2005), dem Dreirollen- Schubbiegen (Vipavc und Plettke, 2011) und dem Freiformbiegen mit bewegter Matrize (Wei et al., 2019) ausgeführt. Zudem stellt Merklein et al. (2012) den Einfluss der Fließkurven auf das Biegeverfahren dar und Vatter und Plettke (2013) analysieren die herstellungsbedingte Abweichung der Halbzeuge. Die darauf aufbauende Beschreibung von Wirkmechanismen durch mathematische Approximationen reicht von der einfachen Darstellung der Biegecharakteristik (Guo, Xiong, Xu, El-Aty et al., 2018) bis hin zu Modellen mit mehreren Eingangs- (Hagenah, Vipavc, Vatter et al., 2010) und Ausgangsparametern (Vipavc, 2018). Zusammenfassend liefert der technische Standard für diese Arbeit bereits eine gute Basis zur Definition von Prozessparametern und deren Streubändern. Darüber hinaus sind Methoden beschrieben, welche für die Approximation der erzeugten Werte weiterverwendet werden können.

Um das Freiformbiegen mit bewegter Matrize besser zu verstehen zu können, werden im folgenden Kapitel Prozessparameter mit hohem Einfluss auf das Biegeergebnis erarbeitet und deren Wirkmechanismen beschrieben. Dazu wurde die Sensitivitätsanalyse in zwei Untergruppen aufgeteilt. In Abschnitt 7.1 wird dazu zunächst ein Biegevorgang auf die Einflüsse chargen- und prozessabhängiger Parameter untersucht. Anschließend werden in Abschnitt 7.2 die Auswirkung von Prozess, Geometrie und Werkzeugveränderungen auf das Biegeergebnis dargestellt und diskutiert. Die gewonnenen Erkenntnisse werden abschließend durch Metamodelle approximiert, um die erarbeiteten Prozesswirkmechanismen bei einer Veränderung der Prozessparameter ohne Simulationsaufwand ableiten zu können.

7.1 Einfluss von Prozess- und Halbzeugparametern

In der laufenden Produktion sind bei diversen Umformverfahren immer wieder Veränderungen der Prozessergebnisse zu beobachten, welche durch regelmäßige Prüfprozesse identifiziert und durch die gezielte Anpassung der Prozessparameter korrigiert werden. Häufige Einflussfaktoren sind dabei toleranzbedingte Veränderungen beim Halbzeug, wie z.B. Materialkennwerte und Geometrie oder Prozessparameter, wie Beölung der Bauteile oder Veränderungen an den Werkzeugen. Um Ressourcen zu sparen und eine möglichst umfangreiche Untersuchung der Einflussparameter durchführen zu können, wird die Sensitivitätsuntersuchung des Freiformbiegens virtuell durchgeführt. Dazu wurde das validierte Simulationsmodell des Biegeverfahrens aus Abschnitt 6 parametrisiert und in die Optimierungsumgebung LS-Opt von LSTC eingebun-

den (Witowski, 2019). Diese Software automatisiert dabei die statistische Versuchsplanung, den Simulationsaufbau und -ablauf sowie die Versuchsdatenauswertung und deren Visualisierung. Grundlagen der statistischen Versuchsplanung wurden beispielsweise von Siebertz, van Bebber und Hochkirchen (2010) und Kleppmann (2009) beschrieben. Für jedes Experiment wird entsprechend der in Abschnitt 6 definierten Vorgehensweise zunächst das Rohr gemäß der Parametrierung aufgebaut und berechnet. Anschließend erfolgt der Übertrag der Halbzeugparameter auf den Freiformbiegeprozess, welcher eine definierte Biegekinematik abbildet. Nach einer erfolgreichen und fehlerfreien Biegesimulation wird das Simulationsergebnis durch automatisierte Funktionen ausgewertet und definierte Ergebnisgrößen nach LS-Opt zurückgegeben. Die Basis für die Sensitivitätsanalyse bilden die zu variierenden Parameter, welche in Tabelle 7.1 dargestellt sind. Diese wurden auf Grundlage der Prozessführung des Demonstratorbauteils definiert und der, aus Spezifikation und Produktion bekannte, Toleranzbereich abgeleitet. Rohrdurchmesser, Blechdicke, Schweißnahtparameter und Materialeigenschaften beziehen sich dabei primär auf die Prozessstreuungen des angelieferten Halbzeugs. Letztere werden im Modell vereinfacht durch eine Skalierung der Fließkurve innerhalb des Materialmodells abgebildet. Die Reibwerte der Kontaktpaarungen am Äußeren und Inneren des Rohres beschreiben den Einfluss des tribologischen Systems auf den Freiformbiegeprozess. Als einziger Werkzeugparameter wird die Position des Biegedorns variiert, da dieser auch im Serienprozess einfach verstellt werden kann und insbesondere zur Korrektur von Biegefallen oder Prozessoptimierungen verwendet wird. Der Versuchsplan für die Sensitivitätsanalyse umfasst 2000 Versuche, wobei die einzelnen Experimente durch die Anwendung des Space-Filling Algorithmus von LS-Opt gleichmäßig auf den Parameterraum verteilt wurden. Als Versuchsgeometrie wurde ein zweidimensionaler Bogen mit einem Radius von 230 mm und einem Biegewinkel von 90° gewählt, da die Geometrie leicht und robust bewertet werden kann und allgemeine Erkenntnisse über den Freiformbiegeprozess gewonnen werden können.

In Abbildung 7.1 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse dargestellt. Dazu wurden die beschriebenen Experimente anhand 6 verschiedener Ergebnisgrößen bewertet. Die Grafiken zeigen dazu die Ergebnisse der linearen Varianzanalyse der Prozessparameter gegenüber den Ergebnisgrößen. Die Berechnung der Sensitivitäten erfolgte automatisiert in LS-Opt ((Witowski, 2019)). Dazu wird für jede Parameter-Ergebnis-Paarung zunächst der Regressionskoeffizient (lineare Regression) und dessen Konfidenzintervall errechnet. Die Normierung der Regressionsterme für jeden Parameter bzgl. dessen Parameterraumes ermöglicht zudem den direkten Vergleich von Parametern verschiedener Art (z.B. Art, Größe oder Einheit). In der Balkendarstellung sind die normierten Regressionskoeffizienten sortiert nach deren Einfluss auf die

Tabelle 7.1: Versuchsplanung Sensitivitätsstudie Prozessparameter

Variable	Startwert	Minimum	Maximum
Skalierung der Fließkurve (FK_s)	1,0	0,9	1,1
Schweißnahtposition (SN_P)	180°	90°	280°
Schweißnahtdicke (SN_{Bd})	2,3 mm	2,1 mm	2,35 mm
Dornposition (Bd_{dval})	-120,5 mm	-127 mm	-118 mm
Rohr-Außendurchmesser (D_a)	64 mm	63,87 mm	64,13 mm
Reibwert Außenwerkzeuge (RW_a)	0,08	0,06	0,1
Reibwert Biegedorn (RW_d)	0,14	0,11	0,17
Rohr-Blechdicke (Bd)	2,0 mm	1,87 mm	2,13 mm

Ergebnisgröße aufgetragen. Die Länge der Balken zeigt dabei den Einfluss einer Variablen auf das jeweilige Ergebnis und dessen Richtung die positive oder negative Korrelation der Versuchspaarung. Darüber hinaus ist für jeden Parameter auch das 95% Konfidenzintervalle der Paarung eingezeichnet.

In Darstellung (a) ist zunächst der Parametereinfluss auf den Biegewinkel abgebildet. Hier ist zu erkennen, dass die Position des Biegedorns den größten Einfluss auf den Prozess aufweist. Der eingezeichnete Wert beschreibt dabei eine positive Korrelation zwischen der Zunahme der Dornposition und einer daraus resultierenden Erhöhung des Biegewinkels. Grafik (b) zeigt des Weiteren die Sensitivität bzgl. des Biegeradius, und (c) den Einfluss der Prozessparameter auf den Vergleichswert der Faltenbildung. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Position des Biegedorns einen hohen Einfluss auf die Faltenbildung des Bauteils haben kann, aber auch dessen Veränderung im Prozess zu einer Abweichung der Biegegeometrie führt. Auch zeigt die Geometrie des Halbzeugs, bestimmt durch den Rohraußendurchmesser und die Blechdicke einen hohen Einfluss auf die Faltenbildung, als auch auf die resultierende Biegegeometrie. Die Reibwerte an Außen- und Innenseite des Rohres weisen entgegen der vorher genannten Parameter im definierten Intervall eine deutlich geringere Sensitivität auf Biegefalten und die Geometrie auf. Trotzdem zeigt die Analyse, dass die Veränderung der Reibung auch zu einer Abweichung der Biegegeometrie führt. Die Grafiken (d-f) bilden den Einfluss der definierten Parameter auf die beim Biegeprozess auftretenden Kräfte ab. Dabei tritt eine andere Verteilung als bei zuvor aufgezeigten Auswertegrößen auf. In (d) ist die Sensitivität bzgl. der Vorschubkraft am Ende des Rohres dargestellt. Neben der Dornposition ist dabei der Einfluss der Fließkurven, bzw. des Werkstoffes zu beobachten, welcher zusammen mit den Reibwerten eine positive

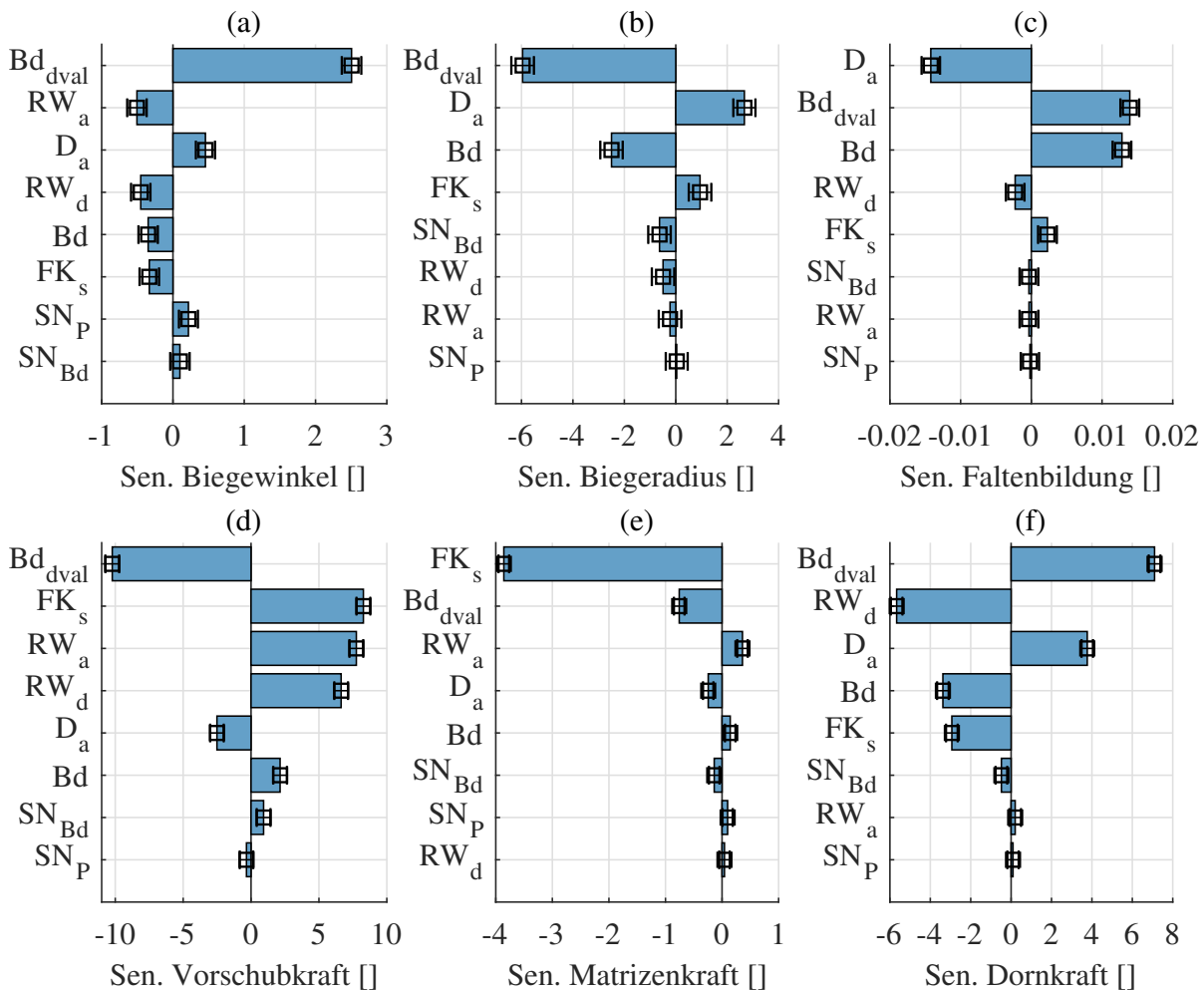


Abbildung 7.1: Sensitivität bzgl. Halbzeug Prozessparameter: (a) Biegewinkel (b) Biegeradius (c) Faltenbildung im Innenbogen (d) Vorschubkraft (e) Matrizenkraft (f) Dornkraft (Parameterabkürzungen sind in Tabelle 7.1 beschrieben)

Korrelation zur Vorschubkraft aufweist. Die notwendige Kraft der Biegematrize in (e) bei der Biegung der Zielgeometrie wird im Gegensatz zu den anderen Kraftgrößen vorwiegend durch die Fließkurve des Werkstoffes beeinflusst. Dabei führt die Skalierung der Fließkurve zu einer Veränderung der Bereiche von elastischer und plastischer Formänderung, welche sich nach gegebener Analyse besonders stark auf den Kontaktpunkt zwischen Halbzeug und Biegematrize auswirkt. Im letzten Diagramm (f) ist der Einfluss der Kraft auf den Biegedorn dargestellt. Diese wird im Vergleich mit den anderen Kraftkomponenten auch durch die Reibung zwischen Dorn und Rohrrinnenseite beeinflusst. Dabei ist auch zu erkennen, dass der Prozess des Freiformbiegens keine singuläre Betrachtung einzelner Parameter möglich macht. In einem linearen System müsste die Dornkraft eine positive Korrelation zum Reibwert des Biegedorns aufweisen. Beim Freiformbiegen hingegen beeinflusst der Reibwert die Bildung von Biegefalten, was zu einer

Veränderung der Biegegeometrie führt und somit in einer Veränderung der Biegekräfte resultiert.

Abschließend lassen sich aus der der Sensitivitätsanalyse einige Zusammenhänge ableiten, welche auch die in Kapitel 5.2 dargestellte Schwankung des Biegeprozesses erklärt. Vorausgesetzt die Position des Biegedorns wird konstant gehalten, geht die Veränderung der Biegegeometrie vorwiegend von der Geometrie des Halbzeugs aus. Diese ist überdies auch für das Auftreten von Biegefallen verantwortlich. Ein weiterer Einflussparameter ist anschließend die Reibung der Kontaktpaare, die im Realprozess z.B. durch die Homogenität des Schmiermittelauftrag beeinflusst wird. Der Werkstoff zeigt beim Freiformbiegen zwar hohe Sensitivitäten bzgl. der auftretenden Biegekräfte, welches theoretisch zu einer erhöhten elastischen Abweichung der Biegewerkzeuge führen könnte. Da die Freiformbiegemaschine nach J. Neu allerdings sehr steif konstruiert und ausgelegt ist, werden die Krafteinflüsse im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Die hier beschriebenen relevanten Parameter werden in Kapitel 9 wieder aufgegriffen und sollen dabei zum besseren Prozessverständnis detailliert werden.

7.2 Einfluss der Werkzeuggeometrie

In diesem Abschnitt werden nun auch die nur konstruktiv veränderbaren Werkzeugparameter mit einbezogen. Dabei soll eine Tendenz abgeleitet werden, welche die relevanten Parameter bei der Konstruktion und Auslegung des Freiformbiegeverfahrens definiert und eine Optimierung bestehender Werkzeuggeometrien und Leitfäden zur Auslegung des Prozesses ermöglicht. Dabei wurden insgesamt 16 Parameter ausgewählt, welche wiederum in das automatisierte Biegemodell in LS-Opt integriert wurden. Die Übersicht aller Parameter ist dabei in Tabelle 7.2 zu finden. Die Parameter des Biegewerkzeugs wurden bereits in Abbildung 4.2 eingezeichnet. Anders als im vorigen Modell wurde auch das Materialmodell parametrisiert, um somit eine Aussage für verschiedene Werkstoffe liefern zu können. Dazu wurde ein Materialmodell gewählt, welches eine einfache, parameterbasierte Fließkurvenbeschreibung nach *Gleichung 7.1* ermöglicht (Parameter K und N) und auf einem isotropen Fließort basiert. Die Verfestigung des Werkstoffes wurde als isotrop definiert.

$$\sigma_y = k * \epsilon^n \quad (\text{Gleichung 7.1})$$

Der Versuchsplan für diese Parameterstudie umfasst 5000 Experimente, welche nach demselben Prinzip wie zuvor beschrieben, geplant, ausgeführt und ausgewertet wurden. Die Bandbreite der einzelnen Parameter wurde zusammen mit Experten der Biegetechnik unter Berücksichtigung

Tabelle 7.2: Versuchsplanung Sensitivitätsstudie Werkzeugparameter

Variable	Startwert	Minimum	Maximum
Matrizenauslenkung (u_{abs})	30 mm	3 mm	45 mm
Werkzeugabstand (Bm_{kval})	84 mm	50 mm	120 mm
BM Einlaufwinkel (Bm_{we})	20°	10°	20°
BM Auslaufwinkel (Bm_{wa})	40°	20°	45°
BM Radius (Bm_r)	10 mm	6 mm	20 mm
FM Radiuslänge (Fm_{rl})	23,4 mm	15 mm	35 mm
FM Toleranz (Fm_{tol})	0,15 mm	0,05 mm	0,15 mm
Biegedorn Segmentlänge (Bd_l)	74 mm	60 mm	100 mm
Biegedorn Toleranz (Bd_{tol})	0,5 mm	0,2 mm	0,6 mm
Biegedorn Segmentbreite (Bd_{sb})	13,85 mm	10 mm	18 mm
Biegedorn Segmentanzahl (Bd_{snum})	10	7	13
Biegedorn Position (Bd_{dval})	-120,5 mm	-130 mm	115 mm
Rohr-Außendurchmesser (D_a)	64 mm	45 mm	75 mm
Blechdicke (Bd)	2 mm	1 mm	3 mm
Fließkurve K-Wert (FK_k)	495,3	350	580
Fließkurve N-Wert (FK_n)	0,236	0,15	0,35

historischer, aktueller und zukünftiger Bauteile, Werkzeuge und Prozessparametern festgelegt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.2 dargestellt. In Grafik (a) und (b) ist dabei wiederum die Sensitivität auf die Biegegeometrie ersichtlich, welche diesmal hauptsächlich durch den horizontalen Abstand der Biegewerkzeuge (Bm_{kval}) und die Matrizenauslenkung (u_{abs}) beeinflusst wird. Dieses Ergebnis korreliert auch mit den Beobachtungen aus dem Stand der Technik, da diese zwei Parameter den Biegeprozess maßgeblich beschreiben. In Grafik (c) ist zu erkennen, dass die Faltenbildung neben der Sensitivität auf die zwei Hauptparameter auch durch die Geometrie des Biegedorns beeinflusst wird (z.B. durch die Segmentbreite der Dornglieder und deren Toleranz zum Inneren des Rohres). Die drei Kraftgrößen, dargestellt in (d-f), werden hingegen von verschiedenen Parametern geprägt, welche auch die Rohrgeometrie und den Werkstoff des Halbzeugs umfassen. Auch alle weiteren Werkzeugparameter beeinflussen den Biegeprozess auf einem sehr detaillierten Level, welches auch zur gezielten Vermeidung von Biegefalten beitragen kann. Damit der Freiformbiegeprozess unter Berücksichtigung dieser Vielzahl von Parametern noch effizient ausgelegt werden kann, werden die in diesem Abschnitt beschriebenen Ergebnisse in Abhängigkeit der Eingangsparameter in Kapitel 7.4 modellbasiert beschrieben.

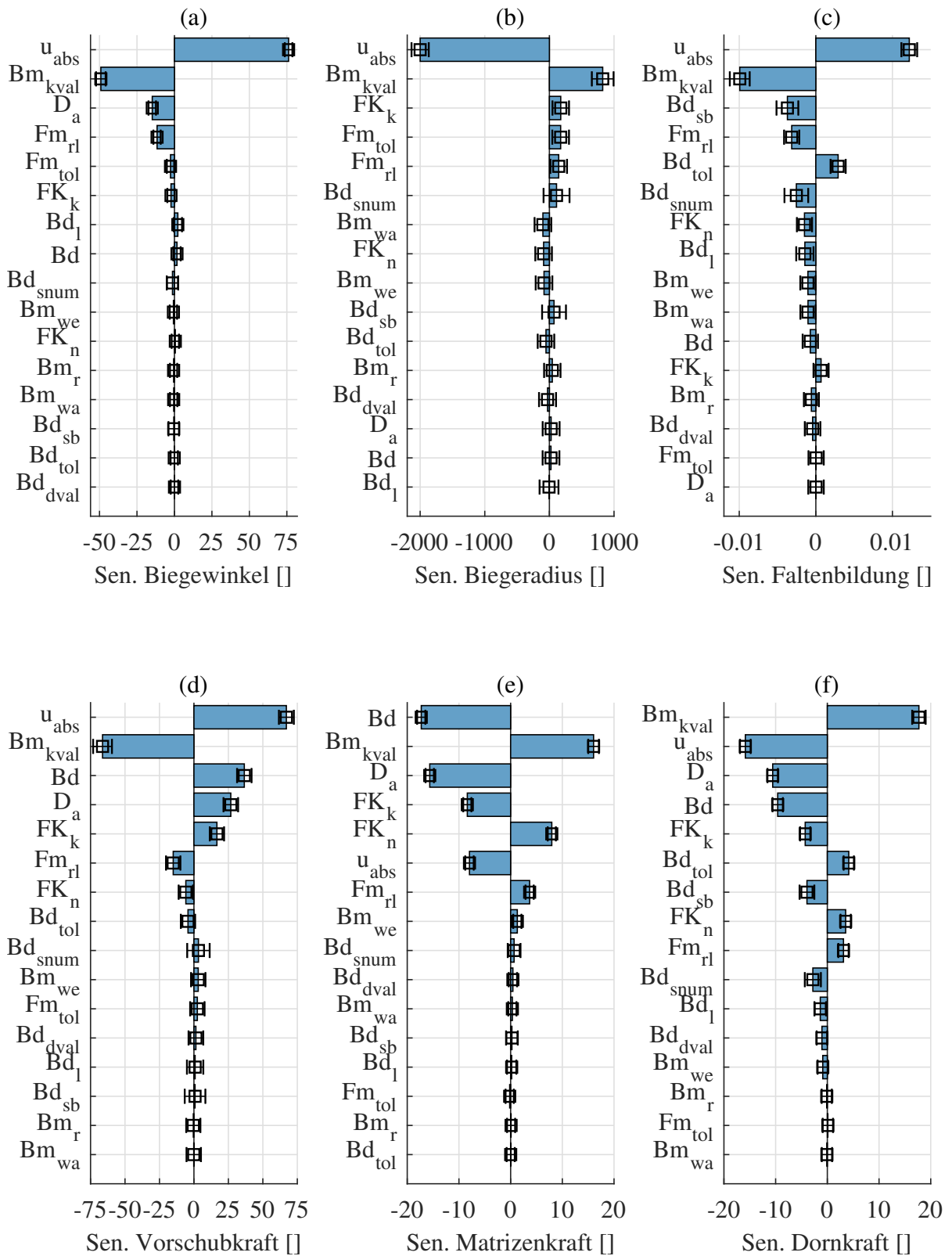


Abbildung 7.2: Sensitivität bzgl. Werkzeugparameter: (a) Biegewinkel (b) Biegeradius (c) Faltenbildung im Innenbogen (d) Vorschubkraft (e) Matrizenkraft (f) Dornkraft (Parameterabkürzungen sind in Tabelle 7.2 beschrieben)

7.3 Zusammenfassung und Gewichtung der Prozesseinflussfaktoren

In diesem Abschnitt soll zusammenfassend aus dem Stand der Technik und den beschriebenen Sensitivitätsanalysen eine Ableitung der relevanten Prozessparameter auf den Freiformbiegeprozess mit bewegter Matrize abgebildet werden. Dazu ist in Abbildung 7.3 eine Übersicht und Gruppierung aller Parameter dargestellt. Dabei sind die Parameter in die Beeinflussungsgruppen Prozess, Maschine, Halbzeug und Biegekinematik aufgeteilt. Die 5. Gruppe Schweißnaht ist dabei als Untergruppe des Halbzeugs zu sehen und wurde nur für die Übersichtlichkeit extra aufgeführt.

Die Gruppe Prozessparameter unterteilt sich demnach in die Gruppe der tribologischen Parameter, beeinflusst durch die Beölung von Biegedorn und Biegematrize sowie die Biegegeschwindigkeit und die Temperatur des Umformprozesses. Der Einfluss der Reibung wurde in den vorigen Kapiteln dieser Arbeit bereits diskutiert und auch nachgewiesen und wurde hier deshalb mit einem mittleren Einfluss bewertet. Die Biegegeschwindigkeit beim Freiformbiegen ist im Vergleich zu anderen Umformverfahren eher als langsam zu bewerten. Ferner sind keine prozessualen Effekte bei einer Veränderung der Geschwindigkeit bekannt, weshalb der Einfluss als gering zu bewerten ist. Genauso erfolgt auch die Bewertung der Umformtemperatur, solange der Biegeprozess nicht durch aktive oder passive Temperaturveränderung beeinflusst wird. Die Ausführung der Freiformbiegemaschine an sich beeinflusst das Biegeergebnis durch die Positionierungsgenauigkeit der Biegewerkzeuge und die generelle Maschinensteifigkeit. Da deren Konstruktion allerdings wie zuvor beschrieben sehr steif ausgeführt ist, wird der Einfluss dieser Parameter ebenfalls als gering eingetragen. Die definierte Werkzeuggeometrie zeigt einen hohen Einfluss auf den Biegeprozess und beeinflusst dessen Resultate maßgeblich. Der Abschnitt Halbzeug umfasst die Werkstoffeigenschaften des Materials, den Querschnitt des Halbzeugs und auch dessen Abmessungen und deren Toleranz. Dabei charakterisieren auch nach den zuvor erfolgten Analysen alle drei Untergruppen den Freiformbiegeprozess essentiell. Der Einfluss der Rohrschweißnaht auf das Biegeverfahren konnte bereits im Stand der Technik immer wieder aufgezeigt werden und führt zu einer Geometrieabweichung und dem räumlichen Verzug des Bauteils. In Relation zu anderen Parametern überwiegt deren Einfluss allerdings nicht. Die Einordnung erfolgt demnach für die Schweißnahtposition und deren Verfestigung mit „mittel“ und für die Schweißnahtüberhöhung und den Schweißprozess an sich mit „gering“. Die Kombination aus Halbzeug und Schweißnahteinfluss ist auch durch den übergreifenden Parameter des Rohrherstellungsprozesses beschrieben. Insbesondere dessen Präzision leistet einen großen Beitrag zu einem stabilen und robusten Biegeergebnis. Als letzte Parametergruppe ist die Biegekinematik aufgeführt, welche durch die gezielte Positionierung der Maschinenach-

sen in Kombination mit der Werkzeuggeometrie zur resultierenden Biegegeometrie führt. Der Einfluss ist somit mit „stark“ zu bewerten. Zusammenfassend kann abgeleitet werden, dass der Freiformbiegeprozess von vielen verschiedenen Parametern beeinflusst wird, welche in multi-dimensionalen Zusammenhängen zueinander wirken. Dabei muss auch im Realprozess bei der Veränderung von nur einem Parameter der Prozess nachkorrigiert und somit die Biegekinematik angepasst werden. Um diese Wechselwirkung und die Wirkmechanismen einzelner Parameter auch schon in der Auslegung des Biegeprozesses berücksichtigen zu können, werden im folgenden Kapitel diese Zusammenhänge modellbasiert beschreiben.

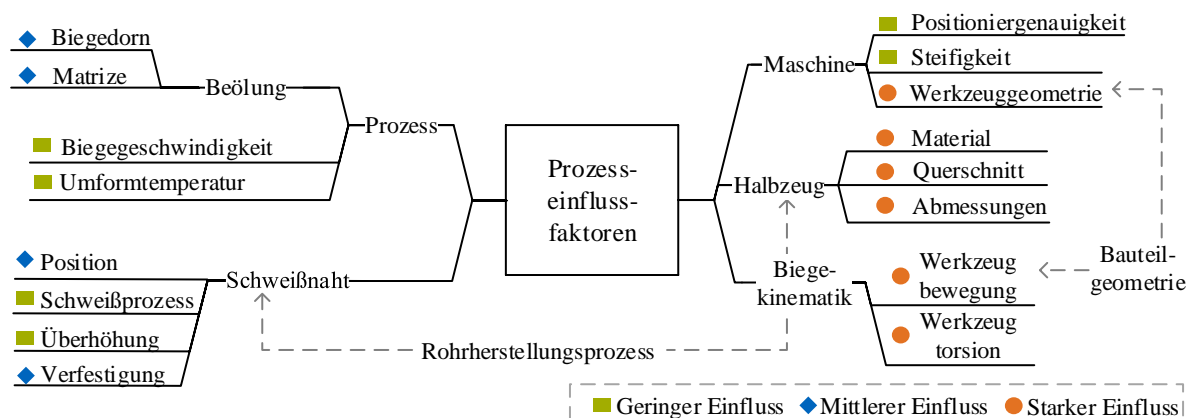


Abbildung 7.3: Einflussfaktoren des Freiformbiegeprozesses mit Gewichtung der Parameter

7.4 Modellierung der Wirkmechanismen & Optimierung des Umformpotentials

Zur modellbasierten Beschreibung der Wirkmechanismen beim Freiformbiegen mit bewegter Matriz werden die Simulationsergebnisse der Parameterstudie aus Abschnitt 7.2 verwendet. Dabei werden die Eingangsparameter für jeden Versuch des Experimentlaufes in Relation zu den Biegeergebnissen gesetzt. Letztere werden im modellbasierten Ansatz durch den Biegeradius, die maximale plastischen Vergleichsdehnung am Innen- und Außenbogen sowie die drei Kraftgrößen Rohrvorschub, Matrizenkraft und Kraft am Biegedorn beschrieben. Zur Darstellung der nichtlinearen Zusammenhänge wurde ein Feedforward Neuronal Network ausgewählt, welches durch den Approximationsalgorithmus von LS-Opt berechnet wurde. Die Genauigkeit der Modellapproximation wird anschließend durch die mittlere quadratische Abweichung (RMS-root mean squared error) und das Bestimmtheitsmaß in Relation zu den Eingangsgrößen bewertet. Eine Übersicht der Modellgenauigkeit ist in Tabelle 7.3 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass insbesondere der Biegeradius mit einem sehr kleinen Fehler von $<5\%$ in Abhängigkeit der Eingangsgrößen beschrieben werden kann. Die weiteren aufgeführten Parameter zeigen demzufolge zwar eine höhere Ungenauigkeit in der Prognose ihrer Ergebnisgrößen, al-

lerdings ist hier vorwiegend die Tendenz der Eingangsparameter auf das Biegeergebnis von Relevanz, weshalb das Metamodell zur Approximation und Beschreibung des Biegeprozesses im weiteren Verlauf dieser Arbeit verwendet werden kann.

Tabelle 7.3: Genauigkeit der Versuchsapproximation durch ein neuronales Netz zur Beschreibung der Prozesswirkmechanismen

Ausgabegröße	RMS Error	Bestimmtheitsmaß R^2
Biegeradius R [mm]	33,1 (4,97 %)	0,998
max. pl. Vergleichsdehnung am Innenbogen []	0,0269 (12,1 %)	0,959
max. pl. Vergleichsdehnung am Außenbogen []	0,0415 (15,8 %)	0,833
max. Kraft am Rohrvorschub [kN]	3,87 (16,1 %)	0,960
max. Kraft der Biegematrize [kN]	0,88 (5,23 %)	0,988
max. Kraft des Biegedorns [kN]	1,3 (19,5 %)	0,930

Abbildung 7.4 zeigt die Auswertung des Metamodells für verschiedene Eingangsparameter. In (a) wurde dazu die Biegecharakteristik des Freiformbiegens für verschiedene Werkzeugabstände bei Beibehaltung aller anderen Eingangsparameter ausgewertet. Dabei ist deren Unterschied für die unterschiedlichen Werkzeugkonfigurationen zu erkennen, welcher bereits in den Biegeexperimenten (Abschnitt 5.1) aufgezeigt wurde. In Grafik (b) ist ebenfalls eine Variation der Biegecharakteristik dargestellt, diesmal erzeugt durch die Anpassung des Rohraußendurchmessers bei gleichbleibendem Werkzeugabstand. Hier lässt sich zusammenfassen, dass die Auswertung der Biegecharakteristik mittels Metamodell plausible und schnelle Ergebnisse liefert sowie der Einfluss verschiedener Biegeparameter auf das Prozessverhalten dargestellt werden kann.

$$[R, eps_i, eps_a, f_{vorschub}, f_{matrize}] = network(p_{Werkzeug}, p_{Halbzeug}, u_{abs}) \quad (\text{Gleichung 7.2})$$

Neben der reinen Bewertung von gezielten Eingabeparametern, kann das Metamodell auch in Optimierungsverfahren eingebunden werden, um somit mehrere verschiedene Parameter in Hinblick auf die Zielgrößen einer Prozessverbesserung anzupassen. Dies soll im Folgenden zu einer Optimierung der Werkzeuggeometrie führen und zur Aufstellung von Auslegungskriterien für die Werkzeuggeometrie beim Freiformbiegen führen. Als Abprungbasis für die Optimierung wurde dabei die Werkzeuggeometrie und das Halbzeug des Demonstrators ausgewählt. Diese Kombination tendiert, wie bereits beschrieben, bei einem Biegeradius von 207,5 mm zu einer Faltenbildung im Innenbogen der Biegung. Das Modell soll nun dazu verwendet werden, genau diesen Parametersatz durch eine Optimierung so anzupassen, dass bei gleichbleibendem

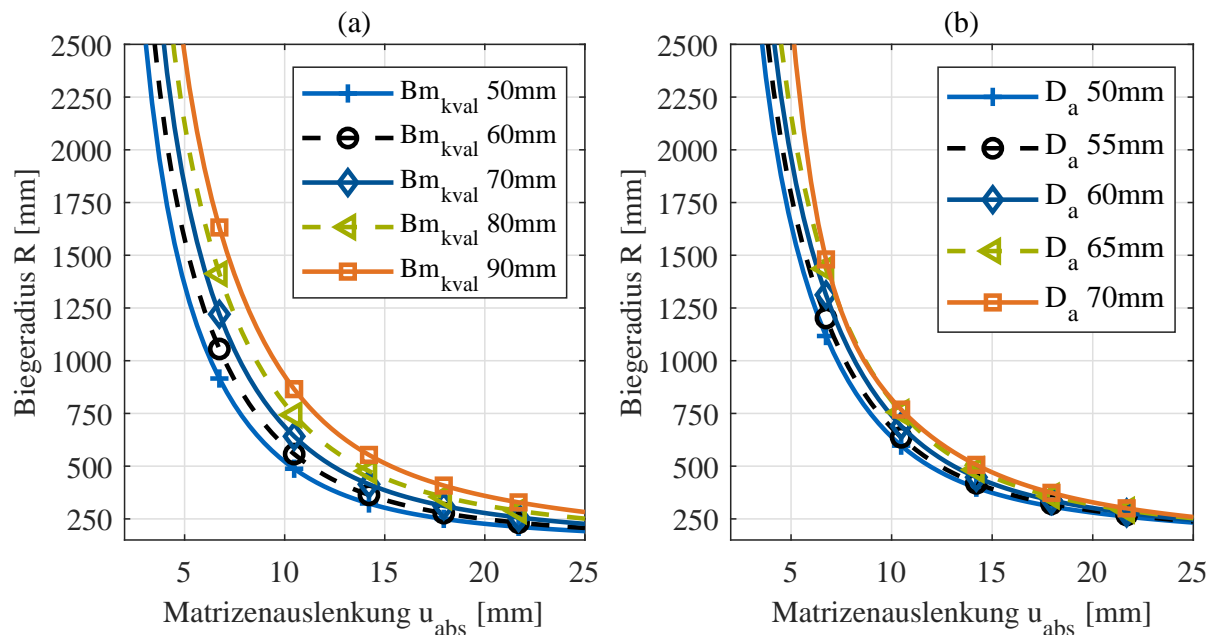


Abbildung 7.4: Metamodellbasierte Prognose des resultierenden Biegeradius in Abhängigkeit der Matrizenauslenkung u_{abs} (a) bei Variation des Matrizenabstandes Bm_{kval} (b) bei Variation des Rohraußendurchmessers D_a

Biegeradius und ohne Veränderung des Halbzeugs, Biegefalten vermieden werden. Das in die Optimierung eingebundene Modell lässt sich vereinfacht durch Gleichung *Gleichung 7.2* beschreiben.

Dabei erzeugen die Eingangsparameter von Werkzeug ($p_{Werkzeug}$) und Halbzeug ($p_{Halbzeug}$) in Kombination mit einer ausgewählten Matrizenauslenkung (u_{abs}) einen Ergebnisparametersatz. Für die Optimierung an sich wurde die Optimierungstoolbox von Matlab verwendet, welche eine einfache Parametrierung des Problems erlaubt. Dazu wurde als Gleichungslöser ein nicht-linearer Algorithmus verwendet. Als Randbedingung der Optimierung wurde der Biegeradius entsprechend der Eingangsparameter fixiert, sodass eine Vergleichbarkeit der Dehnungs- und Kraftwerte bei gleicher Biegegeometrie ermöglicht wird. Für den Optimierungslauf wurde als Zielfunktional eine Minimierung der plastischen Vergleichsdehnung an Innen- und Außenbogen (eps_i, eps_a) und der Maschinenkräfte der Schubstange ($f_{vorschub}$) und der Biegematrize ($f_{matrize}$) vorgegeben, wobei alle 4 Ausgabegrößen gleichgewichtet wurden.

Tabelle 7.4: Werkzeuggeometrie vor und nach der Optimierung

Variable	Serienwerkzeug	Optimierte Variante
Werkzeugabstand (Bm_{kval})	84 mm	97 mm
BM Einlaufwinkel (Bm_{we})	20°	10°
BM Auslaufwinkel (Bm_{wa})	45°	20°
BM Radius (Bm_r)	8 mm	20 mm
FM Radiuslänge (Fm_{rl})	23,4 mm	35 mm
FM Toleranz (Fm_{tol})	0,15 mm	0,1 mm
Biegedorn Segmentlänge (Bd_l)	74 mm	60 mm
Biegedorn Segmentbreite (Bd_{sb})	13,85 mm	18 mm
Biegedorn Segmentanzahl (Bd_{snum})	10	8

In Tabelle 7.4 sind die Werkzeugparameter des Biegevorgangs vor und nach der Optimierung dargestellt. Dabei lassen sich vier wesentliche Änderungen feststellen:

- Minimierung der Toleranzen von Werkzeug zu Halbzeug bei allen Kontaktpaarungen
- Erhöhung des Innenradius der Biegematrize und Abflachung der Winkel von Matrizen Ein- und Auslauf
- Erhöhung des Werkzeugabstands
- Reduzierung und gleichzeitige Verlängerung der Dornsegmente

In Tabelle 7.5 sind zunächst die Ergebnisgrößen des Biegevorgang vor und nach der Optimierung im Metamodell dargestellt. Dabei ist der Biegeradius, wie definiert, vor und nach der Optimierung identisch. In der Ausgangskonfiguration liegen die Dehnungswerte am Innenbogen bei 0,39 und am Außenbogen bei 0,43 sowie die Kräfte am Rohrvorschub bei 40 kN und an der Biegematrize bei 19 kN. Nach erfolgter Optimierung zeigen die Dehnungswerte eine Verringerung auf 0,14 bzw. 0,23 und die Kraftkennwerte von 20 kN und 14 kN. Dabei ist anzumerken, dass dies für ein Umformverfahren eine sehr große Verbesserung des Prozessergebnisses und des Kräftelevels aufweist. Um das Metamodell nochmals zu überprüfen, wurden die Eingangsparameter von und nach der Optimierung auch noch durch die FEM-Simulation abgesichert. Dabei ist nach der Optimierung eine kleine Erhöhung des Biegeradius auf 208,7 mm zu erkennen. Die Dehnungswerte vor der Optimierung werden dabei durch das Metamodell sehr gut abgebildet. Nach der Optimierung zeigt sich beim Dehnungswert am Innenbogen eine Abweichung von

0,14 auf 0,23. Eine ähnliche Unschärfe zeigt auch ein Vergleich der Kraftkennwerte, welche bei der Metamodellbewertung um bis zu 22 % abweichen. Wie bereits erwähnt ist eine Abweichung im Metamodell insbesondere bei den Dehnungs- und Kraftkenngrößen nicht als negativ zu bewerten, da hier vor allem die Tendenz des Modells von Bedeutung ist. Trotz den aufgezeigten Modellunschärfen prognostiziert der Optimierungsvorgang eine deutliche Verringerung des Dehnungsniveaus der Biegeteile und eine Abnahme der dazu benötigten Prozesskräfte.

Tabelle 7.5: Umformeigenschaften vor und nach der Optimierung

Metamodell	Radius	EPS innen	EPS außen	F Vorschub	F Matrize
vor Opt.	207,5 mm	0,39	0,43	40 kN	19 kN
nach Opt.	207,5 mm	0,14	0,23	20 kN	14 kN
FEM-Modell	Radius	EPS innen	EPS außen	F Vorschub	F Matrize
vor Opt.	207,5 mm	0,431	0,43	38 kN	22,5 kN
nach Opt.	208,7 mm	0,232	0,225	30 kN	18 kN

Die Veränderungen in den Werkzeugparametern vor und nach der Optimierung lassen sich wie folgt charakterisieren und als zielführend für die Dimensionierung von Biegewerkzeugen beschreiben:

- Die Minimierung der Toleranzen von Werkzeug zu Halbzeug bei allen Kontaktpaarungen führt zur Reduktion der Dehnungsspitzen und hilft bei der Vermeidung von Biegefallen.
- Die Erhöhung des Innenradius der Biegematrize und die Abflachung der Winkel von Matrizen Ein- und Auslauf verringern die Eindruckstelle an der Außenseite der Biegung. Das führt zur Reduktion der Rohrstauchung und des Weiteren zum Abbau der Spannungsspitzen auf der Rohraußenseite.
- Die Erhöhung des Werkzeugabstands sorgt für eine Abnahme der Biegekräfte.

Zur Validierung der in der Optimierung generierten Ergebnisse, wurde die verbesserte Werkzeuggeometrie entsprechend der Vorgaben nachkonstruiert und auf der Biegeanlage montiert. Anschließend wurde die Biegekinematik für einen Biegeradius von ca. 207,5 mm ermittelt und ein Biegeversuch mit bekanntem Halbzeug durchgeführt. Das Ergebnis des Experiments ist in Abbildung 7.5 dargestellt. Bei der Begutachtung des Biegeteils mit alter Werkzeuggeometrie ist beim Einlauf des Bogens eine Einfallstelle an der Rohraußenseite zu erkennen. Diese tritt bei Verwendung der verbesserten Werkzeugsegmente nicht mehr auf, welches auch auf eine

verbesserte Stützung des Rohres bei der Umformung zurückzuführen ist. Zudem entsteht bei der optimierten Werkzeuggeometrie eine glattere und homogenere Rohroberfläche, was auch Rückschlüsse auf einen stabilisierten Biegeprozess zulässt, welcher möglicherweise auch eine Reduktion der Prozessabweichungen mit sich bringt. Bei der Überführung der gewonnenen Erkenntnisse auf das Serienwerkzeug muss auf Grund der verkleinerten Toleranzen zwischen Halbzeug und Werkzeug ein Verstellmechanismus der Durchmesser-toleranzen in die Biege-werkzeuge integriert werden, sodass die Schwankungen des Halbzeugdurchmessers im Seri-enbetrieb kompensiert werden können und ein häufiger Werkzeugwechsel vermieden werden kann. Abschließend können die durch die Optimierung aufgezeigten Werkzeuganpassungen als Zielrichtung für die Entwicklung und Konstruktion neuer Biege-werkzeuge verwendet werden.

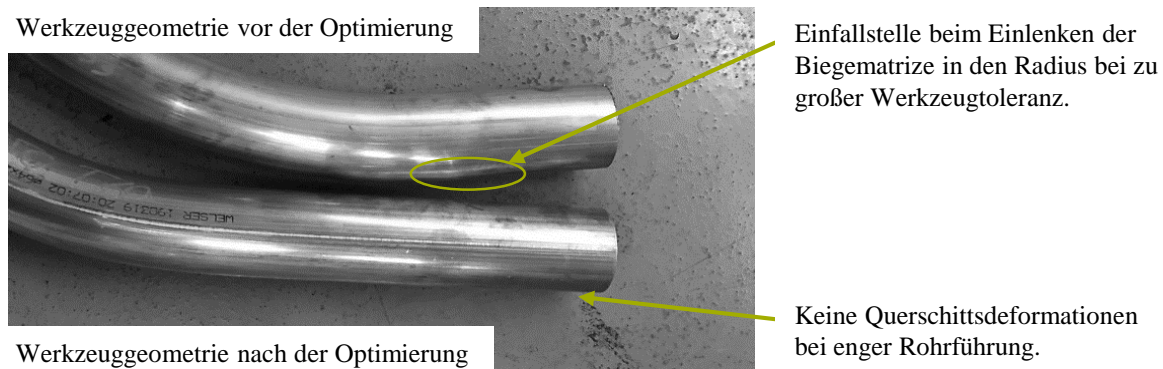


Abbildung 7.5: Erhöhung der Bauteilqualität durch Anpassung der Werkzeuggeometrie

8 Methodik zur Auslegung von Biegebauteilen

Nach Sammlung und Quantifizierung aller notwendigen Informationen zum Freiformbiegeprozess mit bewegter Matrize wird im folgenden Abschnitt eine Methodik zur Auslegung des Biegeprozesses beschrieben. Diese Vorgehensweise soll später dazu dienen, den Biegevorgang auch ohne Hardwareversuche bewerten und optimieren zu können. Dabei gilt es, die Soll-Bauteilgeometrie so gut wie möglich virtuell darzustellen und das Auftreten möglicher Versagensbilder der Rohre (z.B. Knicken oder Faltenbildung (Vollertsen et al., 1999)) zu verhindern. In Anlehnung an die in Abbildung 8.3 aufgezeigten Arbeitspakete werden in diesem Abschnitt alle Erkenntnisse der vorigen Kapitel zusammengeführt und angewendet.

8.1 Bestimmung des Prozessfensters

Die Grundausslegung des Prozesses für ein gewähltes Bauteil erfolgt zunächst auf Basis von Arbeitsdiagrammen, welche die Grenzen eines Verfahrens in Abhängigkeit verschiedener Prozessparameter beschreiben. Engel, Gerlach und Cordes (2008) haben solch ein Diagramm für das Rotationszugbiegen ermittelt und dabei die Notwendigkeit und Dimensionierung eines Biegedorns in Abhängigkeit von den Halbzeugabmessungen und der zu biegenden Geometrie bewertet. Diese einfache Darstellungsform ermöglicht es anschließend Prozessplanern und Produktionsmitarbeitern neue Biegegeometrien in den Serienprozess zu integrieren und deren Herstellbarkeit abzuschätzen. Auf dieser Methodik aufbauend wurden ebenfalls Arbeits- und Prozessdiagramme für das 3-Rollen-Biegen ermittelt, welche den Biegeprozess unter anderem bzgl. des Rohrknickens und der möglichen Rollenkinematik einschränken. (Engel und Kersten, 2010; Engel und Kersten, 2011; Hinkel, 2013; Plettke, Vatter, Vipavc und Hagenah, 2010)

Darauf aufbauend wurde im Folgenden auch ein Arbeitsdiagramm für das Freiformbiegeverfahren mit bewegter Matrize ermittelt. Dabei war das Ziel, die möglichen Versagenkriterien des Biegeprozesses in Abhängigkeit jener Prozessparameter darzustellen, welche den größten Einfluss auf das Biegeverfahren haben. In Abbildung 8.1 ist das Arbeitsdiagramm dargestellt, welches die Herstellbarkeit eines Biegeteils in Abhängigkeit des Werkzeugabstands (Bm_{kval}) und der Matrizenauslenkung (u_{abs}) beschreibt. Diese Parameter wurden auf Basis der Prozesssensitivitätsanalysen aus Abschnitt 7 ausgewählt, da beide den größten Einfluss auf das Biegeverfahren aufweisen. Der Rohraußendurchmesser des Halbzeugs wird dabei über den Biegefaktor dargestellt (*Formel 2.1*), welcher als Isolinie im Diagramm eingezeichnet ist. Für die Geometriedaten des Diagramms wurde das Metamodell der Prozesswirkmechanismen verwendet. Die Biegegrenzen wurden aus fehlerhaften Simulationsexperimenten mit dargestelltem Bauteilversagen und Erfahrungen aus Realversuchen ermittelt. Des Weiteren wurden konstruktivi-

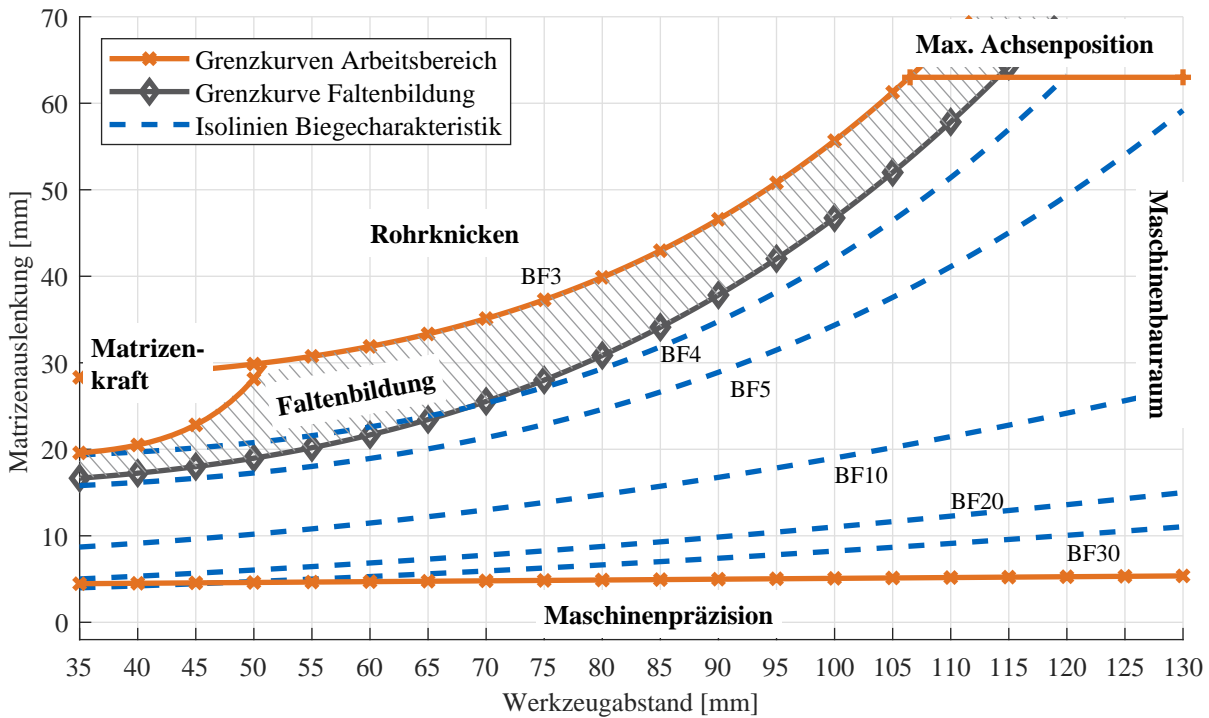


Abbildung 8.1: Arbeitsdiagramm des Freiformbiegeprozesses mit bewegter Matrize

onsbedingte Grenzen der Biegemaschine übernommen. Die prozessualen Grenzen im Arbeitsdiagramm und die hinterlegten Biegecharakteristiken sind im Rahmen dieser Arbeit für den Demonstratorwerkstoff ermittelt worden. Eine einfache Biegung ist folgendermaßen auszulesen: Der Biegefaktor eines Rohres mit 50 mm und einem gewünschten Biegeradius von 250 mm ist entsprechend der Definition 5. Somit muss bei einem Werkzeugabstand von 120 mm die Matrize um 50 mm ausgelenkt werden. Bei einer Verkleinerung des gewünschten Biegefaktors von 5 auf 3 würde die maximale Achsenposition der Biegematrize überschritten werden, was bedeutet, dass für den Biegefaktor von 3 ein kleinerer Werkzeugabstand gewählt werden muss. Außerdem ist zu erkennen, dass der kleinste mögliche Biegefaktor für den Werkstoff des Demonstrators mit 3 angegeben ist und dieser auch bei einer Veränderung des Werkzeugabstandes konstant bleibt. Dieser Effekt wurde zuvor bereits von Murata und Mochizuki (1997) beobachtet, welcher ebenfalls die Unabhängigkeit des kleinsten möglichen Biegeradius eines Halbzeugs von der Werkzeuggeometrie festgestellt hat. Unmittelbar vor dem Unterschreiten des kleinsten Biegeradius besteht das Risiko zur Faltenbildung am Innenbogen. Dieses fängt bei kurzem Werkzeugabstand von 35 mm bei einem Biegefaktor von ca. 5 an und nimmt bei zunehmendem Werkzeugabstand ab. Somit ist die Faltenbildung, anders als das Rohrknicken, nicht einem konstanten Biegefaktor zuzuordnen. Eine Überschreitung der benötigten Kraft der Biegematrize zur Darstellung der gewünschten Biegegeometrie ist bei kurzen Werkzeugabständen möglich, wobei auch dieser Bereich eingezeichnet wurde. Zuletzt ist die Machbarkeit von

sehr großen Biegefaktoren als grenzwertig zu bewerten, da bei kleiner Matrizenauslenkung der Positionierungsfehler der Biegematrize überproportional zu- und somit die Genauigkeit des Biegeverfahrens abnimmt. Zusammenfassend lässt sich durch das in Abbildung 8.1 dargestellte Arbeitsdiagramm der Werkzeugabstand für eine gewählte Biegegeometrie anhand des kleinsten Biegeradius und des gewünschten Halbzeugs auswählen, sodass ein Bauteilversagen gezielt vermieden und das Bauteil entsprechend der Maschinengrenzen dargestellt werden kann.

8.2 Definition und Diskretisierung der Biegelinie

Die Beschreibung der zu erzielenden Biegegeometrie erfolgt üblicherweise über eine Biegelinie. Anders als beim Rotationszugbiegen, wo die Beschreibung der Biegelinie aus der Aneinanderreihung von Radien und Biegewinkeln erfolgt, soll die Prozessführung und Auslegung des Freiformbiegens die Herstellbarkeit einer dreidimensionalen Biegegeometrie mit kontinuierlichem Biegeverlauf ermöglichen. Dazu wird eine Bauteilmittellinie aus der Geometrie des Zielbauteils abgeleitet und in gängiger CAD-Software Krümmungs- und Torsionsstetig optimiert, mit dem Ziel, die Abweichung zur Originalkurve so gering wie möglich zu halten. Zusätzlich müssen die beiden Enden der Biegelinie durch zwei Geraden mit einer Mindestlänge entsprechend des Werkzeugabstandes beschrieben werden, sodass das Einführen und Entnehmen des Bauteils aus der Biegemaschine ermöglicht wird. Bei Biegebauteilen, an denen kein gerades Stück am Ende verbleiben darf, muss das Bauteil nach der Biegeoperation bei Bedarf zugeschnitten werden.

Die stetig differenzierbare Biegelinie kann nun zur Auslegung des Freiformbiegeverfahrens verwendet werden. Für eine genaue Beschreibung der differentialgeometrischen Zusammenhänge und Herleitungen wird im Rahmen dieser Arbeit auf (Kühnel, 2008) und (Hoschek und Lasser, 1992) verwiesen. Zur weiteren Verarbeitung der Raumkurve in Bezug auf das Freiformbiegen werden im Folgenden notwendige Bezugspunkte und Laufvariablen aufgeführt. Zur besseren Veranschaulichung ist in Abbildung 8.2 ein Biegebauteil mit eingezeichneter Biegelinie ψ dargestellt. Dabei kann die Biegelinie inkrementell durch Biegeliniensegmente $C_{n|n+1}$ beschrieben werden, welche von einem Punkt P_n zu einem zweiten Punkt P_{n+1} reichen und durch die Bogenlänge l_n entlang der Kurve bestimmt sind. An jedem Punkt auf der Biegelinie kann ausgehend von Krümmung, Torsion und Bogenlänge unter Anwendung der Frenet-Formeln das begleitende Dreibein der Raumkurve bestimmt werden (Hoschek und Lasser, 1992). Dies beschreibt dabei ein lokales Koordinatensystem, bestehend aus Tangentialvektor (t_n), Normalenvektor (n_n) und Binormalenvektor (b_n). Die Initialausrichtung des lokalen Koordinatensystems erfolgt ausgehend vom Endpunkt der Biegung ($P_{0,0,0}$). Dabei ist die positive x-Achse der Biegemaschine

identisch zur Richtung der Tangente (t_0) der Raumkurve am Endpunkt. Der Binormalenvektor wird folglich der Bauteilorientierung parallel zur z-Achse gedreht. Das Biegeteil ist somit entsprechend seiner Endposition nach dem Biegevorgang ausgerichtet. Zusammenfassend ermöglicht diese Vorgehensweise eine beliebige, inkrementell kleine Diskretisierung der Biegelinie, sowie die genaue Definition eines lokalen Koordinatensystems an jedem Punkt der Biegelinie.

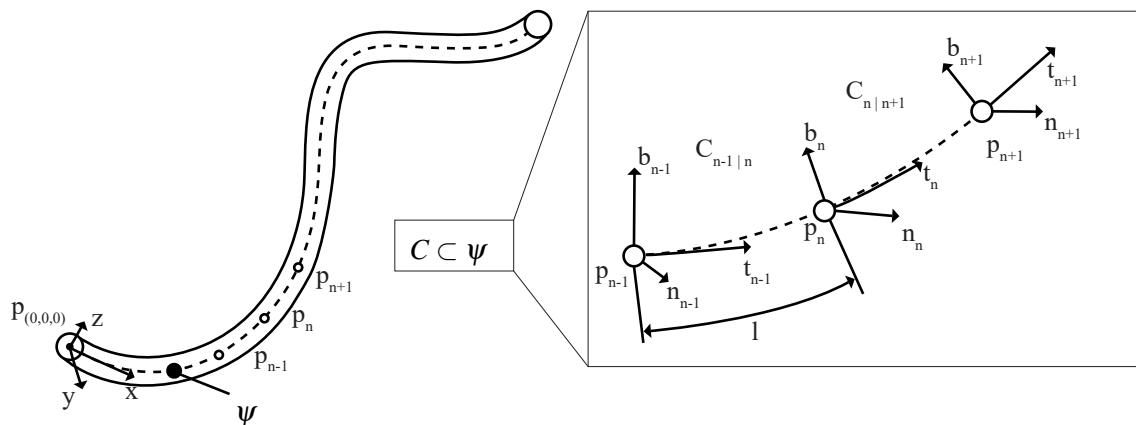


Abbildung 8.2: Diskretisierung und räumliche Beschreibung der Biegelinie (mod. von (Vipavc, 2018))

8.3 Virtuelle Auslegung der Biegeprozesses

In den vorhergehenden Abschnitten wurden die Prozessgrenzen des Freiformbiegens aufgezeigt sowie die Biegelinie des Zielbauteils definiert. Ausgehend von diesen Eingangsgrößen soll nun eine Methodik erarbeitet werden, mit der der Biegeprozess ohne zusätzlichen Hardwareversuch virtuell abgebildet und abgesichert werden kann. Dazu wird in den folgenden Kapiteln zunächst ein Überblick über die benötigten Schritte zur Prozessauslegung gegeben. Anschließend wird insbesondere die Bestimmung der Biegekinematik und deren Kompensation detailliert beschrieben. Abschließend erfolgt die Validierung der erarbeiteten Methodik.

8.3.1 Methodik zur Definition des Biegekonzeptes

Im Abbildung 8.3 ist ein Ablaufdiagramm der einzelnen Prozessschritte zur Auslegung des Freiformbiegeprozesses skizziert. Als Eingangsdaten müssen insbesondere die Biegelinie sowie die Prämissen für das anzuwendende Halbzeug vorliegen. Im Hauptpfad startet man mit einer rein geometrischen Betrachtung der Biegelinie. Dabei wird anhand des zugehörigen Arbeitsdiagramms überprüft, ob die Biegelinie einen Radius bzw. eine Krümmung enthält, welche die maximal mögliche Krümmung des Halbzeugs überschreitet (b). Bei erfolgreicher Überprüfung der Machbarkeit der Biegegeometrie werden die Werkzeugparameter bestimmt. Dazu

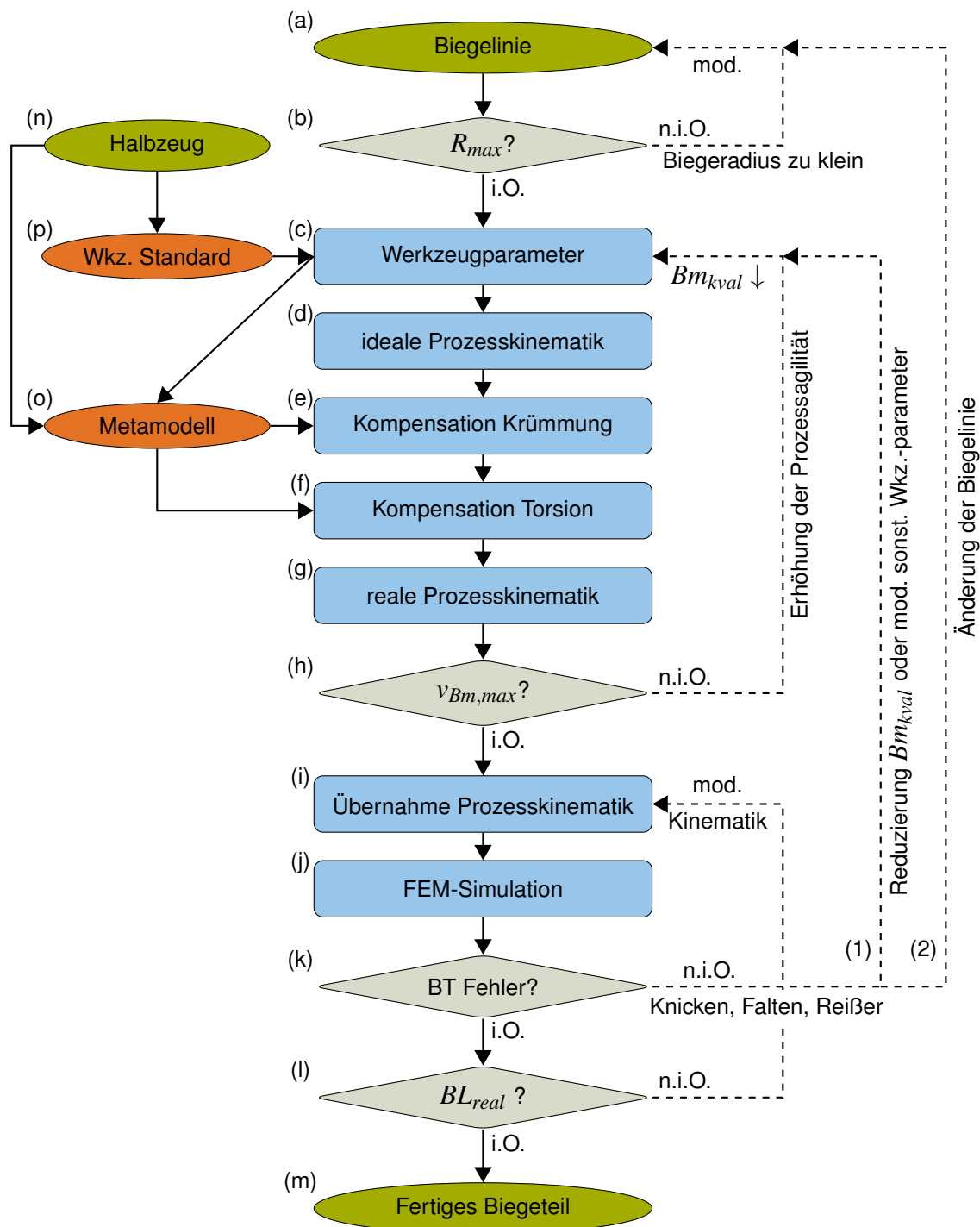


Abbildung 8.3: Ablaufdiagramm der Auslegungsmethodik für freiformgebogene Rohre

leiten sich auf Basis der Halbzeuggeometrie Standardparameter für z.B. den Biegedorn und die Biegematrize ab. Im Rahmen dieser Arbeit werden dazu die Werkzeugparameter des Demonstrators übernommen, um die Vergleichbarkeit der aufgezeigten Methodik sicher zu stellen. Neben den Standardparametern wird auf Basis des Arbeitsdiagramms ein initialer Werkzeugabstand festgelegt. Dieser sollte dabei so groß wie möglich sein, um Biegefalten zu vermeiden und die Prozesskräfte zu reduzieren (Abschnitt 7.4). In Abschnitt 4.4 wurde die Kopplung der

roatorischen mit den translatorischen Freiheitsgraden beschreiben. Diese Zwangskopplung soll zur Vereinfachung der Kinematikberechnung im Rahmen dieser Arbeit beibehalten werden, so dass zur Bestimmung der Biegekinematik lediglich die translatorische Bewegung in y - und z -Richtung ermittelt werden muss. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich durch den konstanten Werkzeugabstand und eine spezifische, translatorische Matrizenauslenkung auch eine spezifische Krümmungsverteilung zwischen den Werkzeugen in der Umformzone einstellt. In Bezug auf die zu verarbeitende Biegelinie bedeutet das, dass die Auswahl der Länge des Biegelinien-segmentes (l_n) aus Abbildung 8.2 zu einer Abweichung der Soll-Geometrie von der durch die Zwangskopplung modifizierten Geometrie führen kann. Dies kann auch als Diskretisierung der Biegelinie beschrieben werden. Ein Vergleich des Einflusses verschiedener Matrizenabstände (BM_{kval}) auf die abzubildende Krümmung zwischen den Werkzeugen ist in Abbildung 8.4 (a) dargestellt und der dabei entstehende, relative Fehler bzgl. des Matrizenabstands in (b) aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass der relative Fehler der Krümmungsabweichung von Soll- zur berechneten Kurve von 0,9 % bei 40 mm auf 7,2 % bei 108 mm Matrizenabstand zunimmt. Das bedeutet für den Biegeprozess, dass die Biegewerkzeuge in Kombination mit der gewählten Prozessführung die zu erreichende Krümmung der Soll-Biegelinie im betrachteten Bereich nicht vollständig abbilden können. Diese Abweichungen können entweder durch eine Modifikation oder Glättung der Soll-Biegelinie korrigiert oder durch die Reduktion des Werkzeugabstandes minimiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden mit Fehlerwerten von bis zu 5 % jedoch gute Ergebnisse erzielt, da sowohl in der Simulation als auch im Realprozess durch die Überlagerung verschiedenster Einflussfaktoren keine 100 % Abbildung der Zielgeometrie realisierbar ist.

In Prozessschritt (d) wird nun auf Basis der gesammelten Eingangsdaten die idealisierte Modellkinematik des Biegevorgangs bestimmt und unter Berücksichtigung der Metamodelle der Prozessmechanismen (7.4) auf die reale Prozesskinematik der Biegemaschine umgerechnet (g). Die detaillierte Berechnung und Kompensation der Biegekinematik ist anschließend in Abschnitt 8.3.2 beschrieben. Dabei werden zunächst die benötigten Matrizentranslationen für jeden Punkt der Biegelinie bestimmt, welche zur Darstellung der Soll-Geometrie nötig sind. Für einen stabilen Prozessablauf spielt allerdings nicht nur die Positionierung der Biegematrize im Raum eine Rolle, sondern auch die Zeit in der die Matrize die Zielauslenkung erreichen muss. Somit muss als weiteres Bewertungskriterium die Matrizingeschwindigkeit betrachtet werden. Dabei kann eine zu schnelle Auslenkung der Matrize zunächst zum Knicken des Rohres und im weiteren Verlauf zum Bauteilversagen führen. Eine allgemeine Empfehlung zur maximalen Verfahrensgeschwindigkeit kann im Rahmen dieser Arbeit nicht abgeleitet werden, da diese wiederum bauteil-, halbzeug- und werkzeugspezifisch ausfallen muss. Für die Demonstratorgeometrie

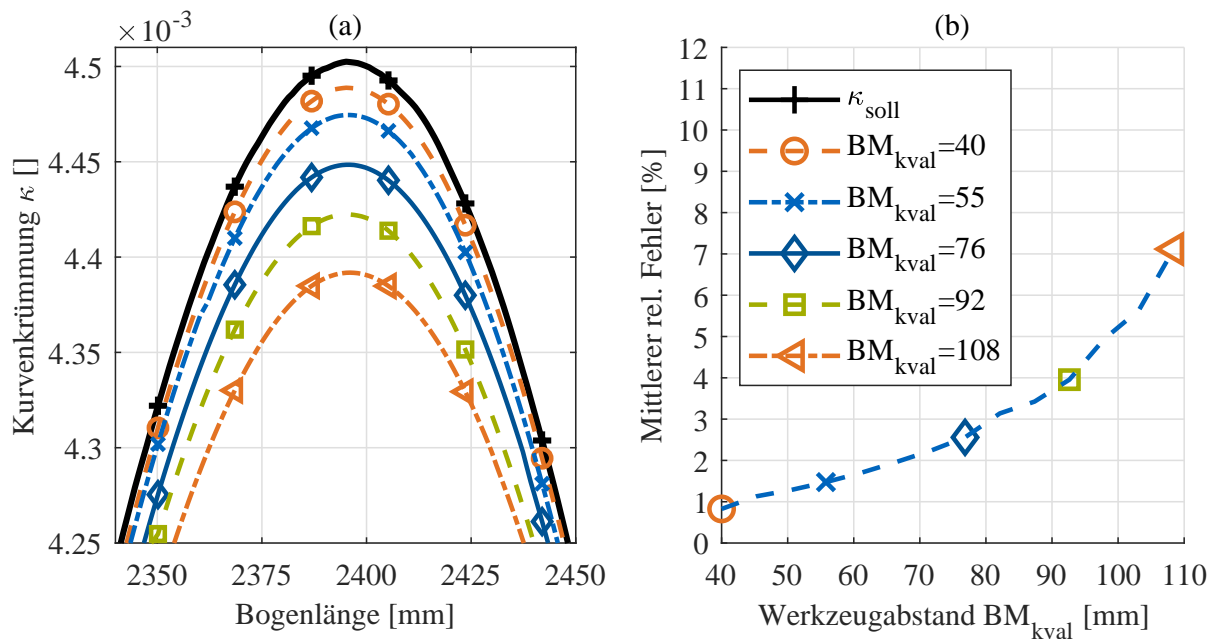


Abbildung 8.4: Abbildung des Soll-Krümmungsverlaufes der Biegelinie durch den Biegeprozess in Abhängigkeit des Werkzeugabstandes BM_{kval}

kann eine durch Expertenwissen und Simulation ermittelte max. Bewegungsgeschwindigkeit von 30 mm/s angegeben werden. In Prozessschritt (h) wird somit durch den Vergleich der errechneten Matrizengeschwindigkeit mit der max. möglichen Geschwindigkeit entschieden, ob der Werkzeugabstand klein genug ist, um der vorgegebenen Krümmung des Zielbauteils zu folgen. Diese Eigenschaft kann als Prozessagilität bezeichnet werden. Bei unzureichender Prozessagilität muss der Werkzeugabstand iterativ verkleinert werden, sodass das Limit der Matrizengeschwindigkeit eingehalten werden kann. Auch hierbei ist wiederum eine Anpassung, bzw. Glättung der Biegelinie möglich.

Nach dem Durchlaufen der vorgelagerten Prozesse liegt nun ein funktionsfähiges Biegekonzept vor, welches alle Parameter der Werkzeuge, der Halbzeuge und der Prozessführung umfasst. Im nächsten Prozessschritt (j) werden die Parameter in das FEM-Simulationsmodell des Freiformbiegens inkl. Rohrherstellungsprozess (Abschnitt 6) übertragen und die Simulation durchgeführt. Dadurch werden die in den Auslegungsmodellen vereinfachten Parameter detailliert abgebildet und es kann eine präzise Aussage über die Bauteilherstellbarkeit abgeleitet werden. Nach der Simulation soll zunächst das Bauteilversagen bewertet werden (k). Bei Auftreten eines Fehlerbildes ist eine Optimierung des Biegekonzeptes vorzunehmen, wie z.B. einer Optimierung der Werkzeugparameter (z.B. die Verkürzung des Matrizenabstandes) oder einer Biegelinienanpassung. Da die auftretenden Fehlerbilder eher bauteilspezifisch ausfallen, basiert

diese iterative Überarbeitung auf viel Erfahrung sowie Expertenwissen und wird deshalb in der Regel von den Prozessmethodikern der Biegetechnik durchgeführt.

Im letzten Arbeitsschritt (l) wird bei erfolgreicher Biegesimulation die Geometrie des Biegeteils bewertet und mit der Eingangsbiegeline verglichen. Falls es dabei zu kleinen Abweichungen kommt, kann über eine Optimierungsschleife in Prozessschritt (i) die berechnete Prozesskinematik der Maschinenachsen nachgebessert und optimiert werden. Eine Feinjustierung der Biegekinematik ist beispielsweise über die lineare Skalierung der Biegecharakteristik möglich, da dadurch der Verlauf von Krümmung und Torsion über den Biegeverlauf partiell nicht verändert wird, sondern lediglich dessen Niveau über die gesamte Bogenlänge angepasst wird. Diese Kompensationsschleife und die resultierenden Ergebnisse werden in Abschnitt 8.3.3 beschrieben. Anschließend kann nach erfolgreicher Geometrieprüfung das Bauteil unter den gewählten Parametern als herstellbar bezeichnet werden und für die Simulation von Folgeprozessen weiterverwendet werden.

8.3.2 Berechnung der Prozesskinematik

Im folgenden Abschnitt wird eine Methodik zur Berechnung der Matrizenkinematik des Freiformbiegeverfahrens für eine gewählte Zielgeometrie beschrieben. Dies ist besonders herausfordernd, da beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize, als Prozess mit einer kinematisch bedingten Formgebung, die Biegekinematik bei einer Veränderung von Prozess, Halbzeug oder Werkzeugparametern nachjustiert oder neu bestimmt werden muss. Als Basis für die Kinematikberechnung dient die Zielgeometrie, welche stetig differenzierbar als Freiformkurve vorliegt (8.2). In vorangegangenen Arbeiten werden dazu vorwiegend auf Basis des Bauteil-Krümmungsverlaufes und einer gewählten Diskretisierung der Biegelinie verschiedene Biegesegmente bestimmt, deren resultierende Radien in Prozessparameter der Biegemaschine umgerechnet werden können. Zur Kompensation von Prozesseinflussfaktoren und Halbzeugparametern wurden Kompensationsstrategien entwickelt, welche auf analytischen (Engel und Kersten, 2011) oder auch numerisch abgeleiteten Modellen (Hagenah, Vipavc, Plettke et al., 2010; Hagenah, Vipavc, Vatter et al., 2010) basieren. Neben der reinen Krümmungskompensation hat Vipavc und Plettke (2011) die Berechnung auf die Kurventorsion ausgeweitet, um die Präzision der Kinematikberechnung für dreidimensionale Raumkurven zu erhöhen. Für die Beschreibung der Torsionskompensation verwenden Plettke, Vatter und Vipavc (2012) experimentell ermittelte Biegeparameter. Für den folgenden Abschnitt wurden entsprechend dem Stand der Technik bestehende Methodiken teilweise übernommen oder auf das Freiformbiegen mit bewegter Matrize adaptiert. Dabei wird zwischen der idealen Modellkinematik und der realen Prozesskinematik des Biegevorgangs unterschieden. Die als idealisiert bezeichnete Modellkinematik beschreibt

die Werkzeugbewegung auf Basis einer theoretischen, geometriebasierten Ableitung - ausgehend von der gegebenen Biegelinie. Bei der realen Prozesskinematik handelt es sich dagegen um die Kompensation der idealen Modellkinematik, welche die Einflüsse von Prozess und Halbwerkzeug berücksichtigt.

Berechnung der Modellkinematik der Biegematrix

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein geometrisch basierter Ansatz zur Bestimmung der Matrizenbewegung entwickelt. Dazu muss zunächst die idealisierte Modellkinematik ermittelt werden, welche die Krümmung und Verdrehung der Biegelinie berücksichtigt und auch die Werkzeugparameter mit einbezieht. Eine Prinzipskizze der geometrischen Herleitung ist in Abbildung 8.5 dargestellt. Im Punkt P_i der Biegelinie werden die Maschinenachsen (x, y, z) durch das lokale Koordinatensystem (x', y', z') beschrieben. Dieses Achsensystem ergibt sich wie bereits beschrieben aus den Frenet-Formeln der Raumkurve im Punkt P_i . Entsprechend der Maschinenkonstruktion ist entlang der x' -Achse der Werkzeugabstand Bm_{kval} aufgetragen, was auch dem Mittelpunkt der Biegematrix im Ausgangszustand entspricht. In diesem Punkt wird zudem die Normalenebene zur x' Achse eingezeichnet, welche sich mit der Biegelinie im Mittelpunkt der Biegematrix P_{sp} schneidet. Daraus kann zunächst die absolute Matrizenauslenkung u_{abs} ermittelt werden und durch Projektion auf die Ebenen des lokalen Koordinatensystems in P_i auch die Auslenkungen entlang der Matrizenachsen $u_{y'}$ und $u_{z'}$. Die bestimmten Auslenkungen für jeden Biegelinienpunkt P_i ergeben die ideal-geometrische Biegekinematik der Maschinenachsen zur Darstellung des Zielbauteils. Dabei ist anzumerken, dass auf Grund des gewählten Matrizenabstandes Bm_{kval} und der Zwangskopplung zwischen Matrizenrotation und -translation eine Diskretisierung der Biegelinie entsteht, da zwischen den Punkten P_i und P_{sp} kein spezifischer Krümmungs- und Torsionsverlauf eingestellt werden kann. Die daraus resultierenden Krümmungs- und Torsionswerte werden somit für jeden Biegelinienabschnitt zwischen den Werkzeugen als konstant angenommen und sind mit κ_{mw} und τ_{mw} bezeichnet.

Der Ablauf der Berechnung der geometrischen Beziehungen einer gesamten Biegelinie startet am Biegelinienanfang. Der erste Berechnungspunkt $P_{i=1}$ liegt soweit vom Anfangspunkt weg, sodass der Werkzeugabstand als gerades Stück abgebildet werden kann. Anschließend werden die Auslenkungen $u_{abs}, u_{y'}, u_{z'}$ für jeden Punkt P_i bestimmt, bis der Endpunkt der Biegelinie $P_{i=end}$ erreicht wird. Die Anzahl der Berechnungsabstände wurde im Rahmen dieser Arbeit mit 1 mm gewählt. Die errechneten Auslenkungen in Abhängigkeit der Bogenlänge sind für die gewählte Zielgeometrie in Abbildung 8.6 (a) dargestellt, sowie der Krümmungs- und Torsionsverlauf in (b).

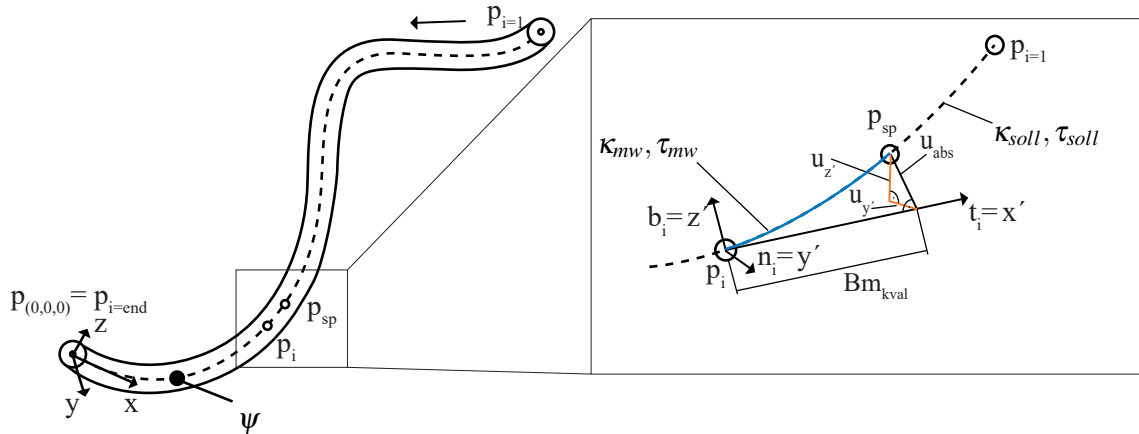


Abbildung 8.5: Skizze der Berechnungslogik zur iterativen Bestimmung der idealisierten Modellkinematik (mod. von (Vipavc, 2018))

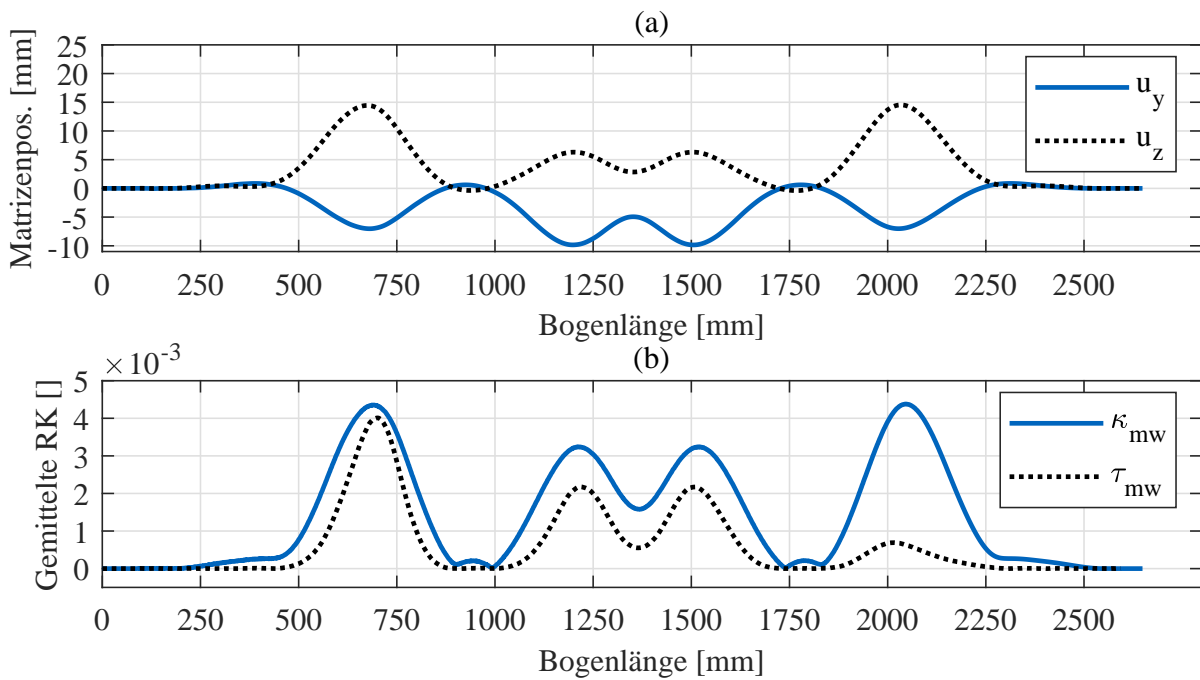


Abbildung 8.6: Berechnungsergebnisse der idealisierten Modellkinematik

Korrektur der Kurvenkrümmung

Nach der Bestimmung der Modellkinematik für die Kombinatorik aus gewähltem Werkzeugabstand und einer Biegelinie wird im Folgenden die modellbasierte Kompensation der Bewegungskurven auf die reale Prozesskinematik der Biegemaschine beschrieben. Dazu werden die Kompensationen von Krümmung und Torsion getrennt betrachtet, da die Krümmung maßgeblich durch die absolute Auslenkung der Biegematrix beschrieben wird und die Torsion lediglich durch deren Rotation im Raum entsteht. In Gleichung 7.2 wurde das Metamodell der Parameterstudie aus Abschnitt 7.4 abstrakt beschrieben. Die dabei dargelegte Biegecharakteristik bildet

den Zusammenhang zwischen Kurvenkrümmung und benötigter absoluter Matrizenauslenkung in Abhängigkeit der gewählten Parameter. Zur Kompensation der Bewegungskurven soll darauf basierend ein Skalierungsfaktor errechnet werden, welcher das Verhältnis zwischen realer Prozesskinematik und idealisierter Modellkinematik für verschiedene Krümmungen der Raumkurve darstellt. Dieser Skalierungsfaktor ist im Folgenden als $u_{scale}(\kappa)$ bezeichnet und wird aus der realen $u_{abs,real}$ und idealisierten $u_{abs,ideal}$ Matrizenauslenkung berechnet (*Gleichung 8.1*).

$$u_{scale}(\kappa) = \frac{u_{abs,real}}{u_{abs,ideal}} \quad (\text{Gleichung 8.1})$$

Die Komponente der idealisierten Matrizenauslenkung lässt sich durch *Gleichung 8.2* errechnen. Die dazu benötigten Auslenkungen in der y- und z- Achse wurden im Abschnitt zuvor bereits ermittelt.

$$u_{abs,ideal} = \sqrt{u_{y,ideal}^2 + u_{z,ideal}^2} \quad (\text{Gleichung 8.2})$$

Die Matrizenauslenkung im Realprozess wird durch iteratives Lösen der Funktion (*Gleichung 8.3*) unter Berücksichtigung des Metamodells nach $u_{abs,real}$ bestimmt. Als Eingangsparameter dient dazu die zuvor bestimmte Kurvenkrümmung zwischen den beiden Biegematrizen (κ_{mw}), sowie die Halbzeug- und Werkzeugparameter. Der Verlauf von $u_{abs,real}$ in Abhängigkeit von (κ_{mw}) für die gewählten Eingangsparameter ist in *Abbildung 8.7 (a)* dargestellt.

$$f(u_{abs;real}) = \frac{1}{network(p_{Werkzeug}, p_{Halbzeug}, u_{abs;real})} - \kappa_{mw} \quad (\text{Gleichung 8.3})$$

Nach Bestimmung des Skalierungsfaktors für einen spez. Parametersatz (u_{scale}) lässt sich die prozessuale Matrizenauslenkung berechnen, welche für die Biegung des Demonstrators in *Abbildung 8.7 (b)* berechnet ist. Weiterhin können mit *Gleichung 8.4* auch die Prozesskinematiken der einzelnen Matrizenachsen in y- und z- Richtung bestimmt werden.

$$u_{y/z,real} = u_{y/z,ideal} \cdot u_{scale}(\kappa) \quad (\text{Gleichung 8.4})$$

Diese sind zum Vergleich wiederum in *Abbildung 8.7 (c)* dargestellt und enthalten im Gegensatz zu u_{abs} auch Richtungsinformationen, sodass die Bewegung der Biegematrize im Raum vollständig beschrieben ist und für die weiteren Berechnungen und die Simulation verwendet

werden kann. Generell ist in beiden Grafiken eine große Abweichung zwischen der errechneten idealisierten Modellkinematik und der zur Produktion an der Biegemaschine kompensierten Prozesskinematik zu erkennen.

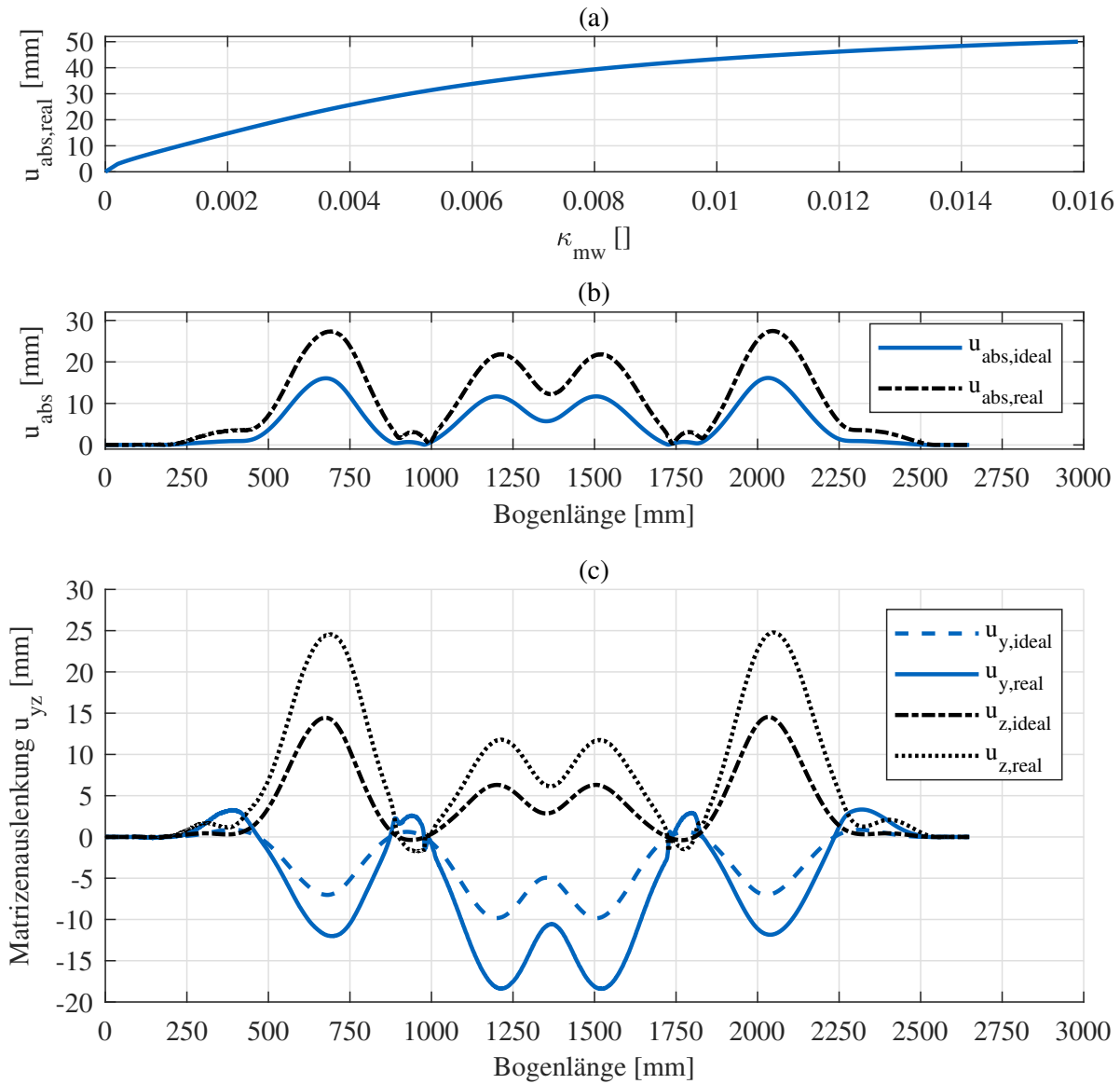


Abbildung 8.7: Berechnung der Kompensation von Modell- auf Prozesskinematik

Korrektur der Kurventorsion

Neben der Krümmungskomponente, deren Einfluss im vorhergehenden Abschnitt aufgezeigt wurde, wurde zusätzlich ein Modell zur Beschreibung der Torsionskompensation abgeleitet. Für die Berechnungen des Modells wurde für jeden der 120 Versuche jeweils ein konstanter Werkzeugabstand, eine konstante Kurvenkrümmung mit einer konstanten Kurventorsion zu Grunde gelegt. Von den gebogenen Helices wurde anschließend die Biegelinie abgeleitet und die resultierende Torsion bestimmt. Der Unterschied zwischen Soll- und ermittelter Torsion wurde im Modell durch den Skalierungsfaktor τ_{scale} beschrieben. Das Modell selbst ist für einen ausgewählten Parameterraum in Abbildung 8.8 (a) dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Kompensation der Torsion für alle Versuchspunkte über 1 liegt, was bedeutet, dass die im Versuch aufgetretene Torsion immer geringer ausfiel als die geplante Torsion. Des Weiteren erhöht sowohl die Zunahme von Werkzeugabstand, als auch die Zunahme der Kurvenkrümmung den benötigten Kompensationsfaktor. Die Güte der Approximation des errechneten Kompensationsmodells ist in Grafik (b) dargestellt. Dabei liegt der errechnete R-Wert bei 0,999 und die mittlere quadratische Abweichung bei 1,86 E-9.

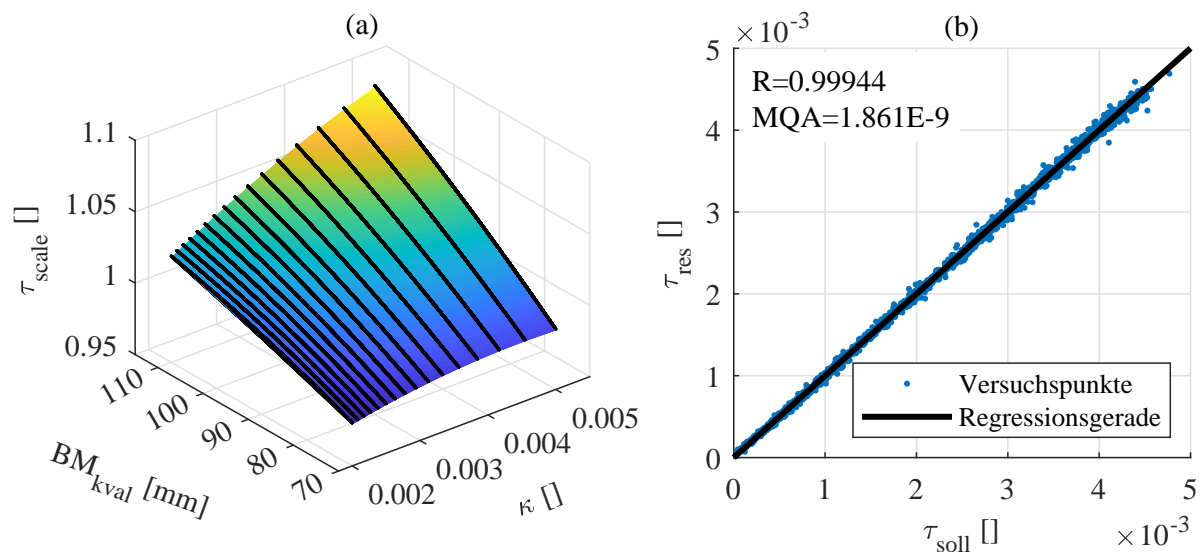


Abbildung 8.8: Kompensationsmodell der Kurventorsion

Mit Hilfe des beschriebenen Modells kann nun die Kompensation der Kurventorsion entsprechend der gewählten Parameter und dem Torsionsskalierungsfaktor τ_{scale} auf die Prozesskinematik angewendet werden. Die ermittelten Werte sind dazu in Abbildung 8.9 dargestellt. Zur Kompensation der Kurventorsion muss nun die Position der Biegematrix in der y-z-Ebene angepasst werden, sodass das diskretisierte Kurvensegment der Raumkurve zwischen den Biegewerkzeugen den neuen Torsionswert beschreibt. Dazu wird an jedem Biegelinienpunkt P_i die Raumkurve bis zum Biegematrixpunkt P_{SP} mit den Parametern $\kappa_{mw,i}$ und $\tau_{mw,i}$, sowie

$\tau_{mw, scale, i}$ rekonstruiert. Im Endpunkt des Segmentes P_{SP} entsteht dadurch eine neue, kompen-
sierte Matrizenposition für jeden Berechnungspunkt der Kinematik. Diese Veränderung der
räumlichen Positionierung des Biegematrizenpunktes wird anschließend an die Bewegungskur-
ven $u_{y/z, real}$ adaptiert, wobei der Winkel zwischen absoluter und y- Auslenkung in der y-z-
Ebene angepasst wird. Anzumerken ist, dass die Veränderung des Werkzeugabstands der Bie-
gematrize bei der Veränderung der Kurventorsion nicht berücksichtigt wurde und somit die
Winkeländerung nur in der konstant angenommenen y-z-Ebene dargestellt ist.

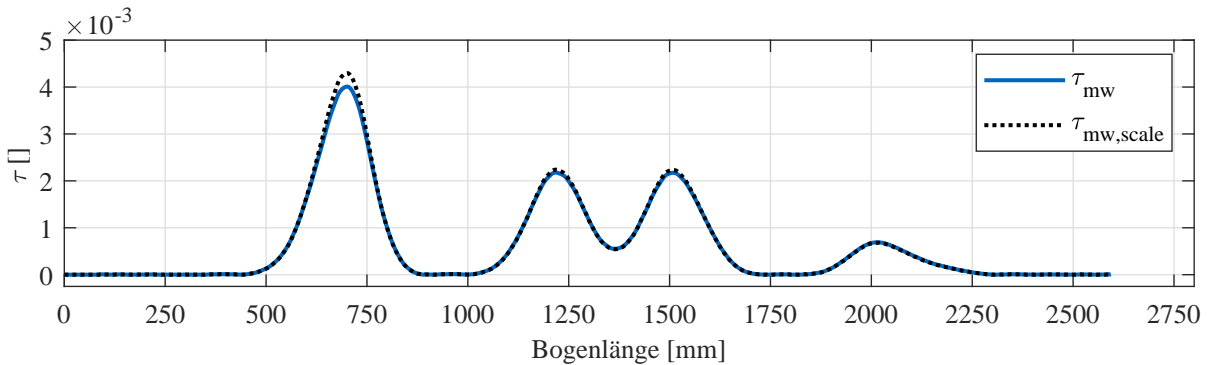


Abbildung 8.9: Kompensation der Kurventorsion

Die Anwendung der Kompensationsmethodik liefert in Bezug auf die Bewegungskurven für
die Herstellung der Demonstratorgeometrie im Maximalwert der Krümmung eine Abnahme
von $u_{z, real}$ (24,56 auf 24,45 mm) und eine entsprechende Vergrößerung von $u_{y, real}$ (-12,02 auf
-12,24 mm). Dies beschreibt, bezogen auf die Position der Biegematrize in der y-z-Ebene, eine
Winkelveränderung gegenüber der z-Achse von $0,533^\circ$.

Korrektur der Biegestartposition

Als weiteren Einflussfaktor auf die Biegekinematik wurde von Gerlach (2010) die Startposition
der Freiformbiegung in Bezug auf das gewünschte Krümmungsprofil der Raumkurve identi-
fiziert. Diese hat zwar keine Auswirkung auf den erzeugten Krümmungs- oder Torsionsver-
lauf der Raumkurve, bestimmt allerdings die resultierenden Längen der Anfangs- und Endge-
rade des Biegekörpers. Die berechnete Modellkinematik inkludiert in ihren Annahmen, dass
das Rohr beim ersten Kontakt der Biegematrize sofort eine plastische Formänderung aufweist
und dementsprechend den vorgegebenen Krümmungsverlauf abbilden kann. Unter Berücksich-
tigung des elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens führt der Erstkontakt zwischen Matrize
und Halbzeug allerdings zu einer elastischen Formänderung, sodass die geforderte Krümmung
des Bauteils mit einem Versatz in Biegerichtung entsteht und somit die geplanten Anfangs- und
Endlängen des Bauteils nicht mehr mit dem Biegeergebnis übereinstimmen. Um den Anteil des
Krümmungsversatzes, bedingt durch das elastisch-plastische Werkstoffverhalten, in der Kine-

matikberechnung berücksichtigen zu können, muss umgekehrterweise die gewünschte Biegestartposition in Richtung des Rohranfangs verschoben werden. Dadurch erfolgt der Anteil der elastischen Formänderung in dem Biegelinienbereich, der am Ende der Biegung als gerades Rohrstück verbleiben soll. Der analytisch hergeleitete Offsetwert ($x_{0el,k}$) für die Verschiebung der Biegelinienstartposition ist durch die *Gleichung 8.5* beschrieben und basiert auf der Annahme, dass zwischen dem Ausgang der Führungsmatrize und der Biegematrize im elastischen Formänderungsbereich ein Biegebalken vorliegt. Die Berechnung der Biegebalkenlänge erfolgt unter Verwendung des analytischen Biegemoments (*Formel 2.7*) für die gewählte Rohrgeometrie und dem Matrizenabstand der Werkzeuge Bm_{kval} , sowie der Dehngrenze ($R_{p0,2}$) und dem Widerstandsmoment (W_z). (Gerlach, 2010)

$$x_{0el,k} = \frac{R_{p0,2} \cdot W_z}{M_{b,ges}(R)} \cdot Bm_{kval} \quad (\text{Gleichung 8.5})$$

8.3.3 Simulation des Zielbauteils

Unter Verwendung aller gesammelter Eingangsparameter wird ein Simulationsmodell für die Prozesskette Freiformbiegen aufgebaut. Die zugrunde liegenden Simulationsparameter und numerischen Einstellungen werden dazu von der validierten Simulationsmethodik aus Abschnitt 6 übernommen. Spezifisch für die gewählte Ziel-Biegelinie wird die zuvor bestimmte, kompensierte Prozesskinematik für die einzelnen Freiheitsgrade übernommen und die Werkzeugbewegung damit gesteuert. Des Weiteren werden sowohl die Halbzeugparameter übernommen, als auch die Biegewerkzeuge entsprechend der Auslegungsempfehlungen konstruiert. Im Anschluss an die Simulation des Bauteils wird die Biegelinie exportiert um einen Vergleich zwischen Ziel- Geometrie und der errechneten Geometrie zu ermöglichen. Falls durch den Geometrievergleich eine Abweichung der Bauteile zueinander festgestellt wird, können die Prozessparameter korrigiert werden und die Simulation erneut durchgeführt werden. Die Notwendigkeit einer Korrektur in der virtuellen Umgebung wird durch die Prozess- oder Methodenexperten abgeschätzt. Dabei kommt es neben der Bauteilabweichung auch auf eventuelle Fehlerbilder des gebogenen Halbzeugs oder auch auf die Toleranzfelder eines Folgeprozesses an. Im Falle einer virtuellen Kompensation besteht einerseits die Möglichkeit das Niveau der errechneten Prozesskinematik durch eine Skalierung der Biegecharakteristik anzupassen. Dies führt dazu, dass sowohl Krümmung und Torsion des Bauteils gesamthaft erhöht oder verringert werden ohne deren Relation bzgl. der Bogenlänge zu verändern. Des Weiteren besteht die Möglichkeit die Prozesskinematik nur in ausgewählten Bereichen zu Optimieren, wobei hier wiederum die Erfahrung des Anwenders mit der Biegetechnik von großer Bedeutung ist. Im folgenden

Abschnitt sind Beispiele zur Validierung der hier beschriebenen Auslegungsmethodik aufgeführt, welche sowohl die Funktionsweise als auch die Qualität der Methoden bestätigen sollen.

8.4 Validierung und Bewertung der Ergebnisse

Zur Validierung der virtuell ermittelten Biegebauteile werden im folgenden Abschnitt zunächst verschiedene zweidimensionale Biegegeometrien und anschließend das Demonstratorbauteil bewertet. Verglichen wird dabei jeweils die geplante Zielgeometrie mit dem durch die Simulation ermittelten virtuellen Bauteil. Als Basis wurde wiederum das Halbzeug des Demonstrators verwendet. Die Ergebnisse für verschiedene zweidimensionale Bögen sind in Tabelle 8.1 dargestellt. Ihr Biegeradius wurde zwischen 200 mm und 1000 mm bei einem Biegewinkel von 90° variiert und dabei auf eine zusätzliche Kompensation der errechneten Prozesskinematik verzichtet. Die Abweichungen der zweidimensionalen Bögen resultieren somit direkt aus der idealisierten Berechnung der Modellkinematik. Die gemessenen relativen Fehler in Bezug auf den Biegeradius liegen dabei zwischen 0,83 % und 7,5 %, die Abweichungen im Biegewinkel zwischen 2,85 % und 6,2 %. Der kleinste Radius mit 200 mm und dem Biegewinkel von 90° wurde davon am präzisesten dargestellt. Mit ansteigendem Radius oder Biegewinkel nimmt der Berechnungsfehler zu, es ist allerdings kein steigender Trend zu erkennen. Auffällig ist der durchweg verkleinerte Biegewinkel der Bögen > 200 mm, welcher bei gleicher Bogenlänge der berechneten Bauteile zu einer Vergrößerung des Biegeradius führen muss und somit auch dessen Abweichungen erklärt. Da auf eine Kompensation im Simulationsmodell verzichtet wurde, lassen sich die Abweichungen auf Ungenauigkeiten des Metamodells zur Krümmungskompensation zurückführen. Dieses prognostiziert für den gewählten Parametersatz eine zu geringe Matrizenauslenkung. Da der kleinste Biegeradius mit 200 mm, welcher in Bezug auf die Prozessgrenzen auch der kritischste ist, allerdings ohne weiteres virtuell herstellbar war kann davon ausgegangen werden, dass auch die weiteren Biegungen durch eine einfache Kinematikanpassung im Simulationsmodell fertigungstechnisch abbildbar sind. Abschließend kann zusammengefasst werden, dass die Methodik zur Prozessauslegung für zweidimensionale Biegungen eine präzise Abschätzung des realen Biegeprozesses ermöglicht. Kleine, auftretende Abweichungen können entweder virtuell oder während der Hardwareerprobung durch eine Optimierung der Prozesskinematik korrigiert werden.

Nach den zweidimensionalen Biegungen ist im folgenden Abschnitt nun das Berechnungsergebnis des Demonstrators ausgehend von den Prozessparametern und der Biegelinie dargestellt. Die Vorgehensweise zur Simulation des Demonstrators waren dabei identisch zu den einfachen Biegungen. Bei der Bewertung des Biegeergebnisses wurden ebenfalls geometrische Abwei-

Tabelle 8.1: Validierung der Berechnungsmethodik anhand einfacher, zweidimensionaler Bögen

Radius CAD	Radius FEM	rel. Fehler	Biegewinkel CAD	Biegewinkel FEM	rel. Fehler
200 mm	201,67 mm	0,83 %	90°	90,57°	2,85 %
300 mm	321 mm	7,0 %	90°	84,9°	5,7 %
600 mm	639 mm	6,5 %	90°	84,43°	6,2 %
1000 mm	1075 mm	7,5 %	90°	86,38°	4,0 %

chungen festgestellt, welche sich bei der Länge des Biegedemonstrators allerdings aufsummieren und zu einer größeren absoluten Abweichung am freien Ende der Biegung von ca. 90 mm führen. Um diese Fehler zu korrigieren, wurde wie in Abschnitt 8.3.3 beschrieben die Biegecharakteristik zur Prozesskinematikberechnung mit einem Aufschlag von 2,5 % konstant erhöht, was zu einer Zunahme des gesamten Krümmungs- und Torsionsverlaufes führt. Für den Abgleich zwischen Soll- und errechneter Geometrie wird das kompensierte Bauteil zunächst bzgl. der Raumkurvenparameter bewertet. Diese sind in Abbildung 8.10 dargestellt und zeigen einen nahezu identischen Verlauf zwischen den Krümmungs- und Torsionsverläufen von Sollbiegeline und ermittelter Biegeline. Dabei ist festzuhalten, dass sowohl die Höhe der Krümmungs- und Torsionsspitzen, sowie deren Lage in Bezug auf die Bauteilbogenlänge mit den Sollwerten übereinstimmen.

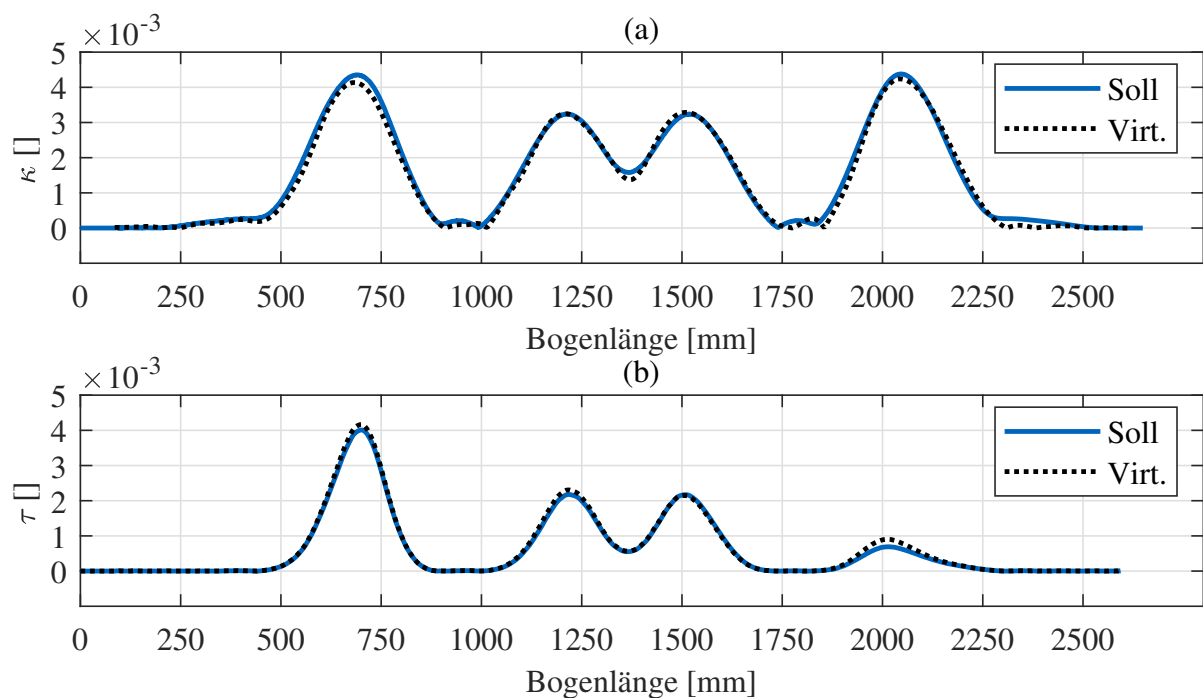


Abbildung 8.10: Vergleich Soll-Geometrie und Virtuelle Geometrie

Zur einfacheren Bewertung der Bauteilgeometrie ist in Abbildung 8.11 der Vergleich der Bauteilflächen zwischen Soll- und der simulierten Rohrgeometrie wiedergegeben. Die Auswertung der Abweichungen zwischen den Mantelflächen wurde dabei in Polyworks durchgeführt. Die Rohre wurden dazu mittels Best-Fit Ausrichtung zueinander positioniert, da für die Bewertung der Endgeometrie nicht die Abweichung in einem Biegelinienpunkt, sondern die Geometrieabweichung über das gesamte Bauteil relevant ist. Dabei kennzeichnen positive Werte eine Verschiebung in Richtung der Flächennormalen des Sollbauteils in Relation zur Betrachtungssicht. Für den Demonstrator bedeutet das eine maximale Abweichung von +14,4 mm und -15,2 mm. Trotz der im Vergleich zu anderen Umformverfahren sehr hoch zu bewertenden Abweichungen, liegen diese für das Freiformbiegen des Demonstrators innerhalb der von BMW zulässigen Toleranzen. Die Methodik zur Bauteilauslegung mit anschließender Simulation liefert den Prozessplanern darüber hinaus auch wichtige Erkenntnisse über die Herstellbarkeit des Bauteils und die Erreichung von geforderten Oberflächenspezifikationen, insbesondere in der frühen Phase des Bauteil- und Prozessdesigns. Auch wenn die Zielgeometrie virtuell nicht exakt dargestellt werden kann, bietet die beschriebene Methodik zur Auslegung von Bauteilen einen wesentlichen Vorteil in der Bauteilentstehungsphase und soll somit für die Berechnung und Herstellbarkeitsbewertung von neuen Biegebauteilen angewendet werden.

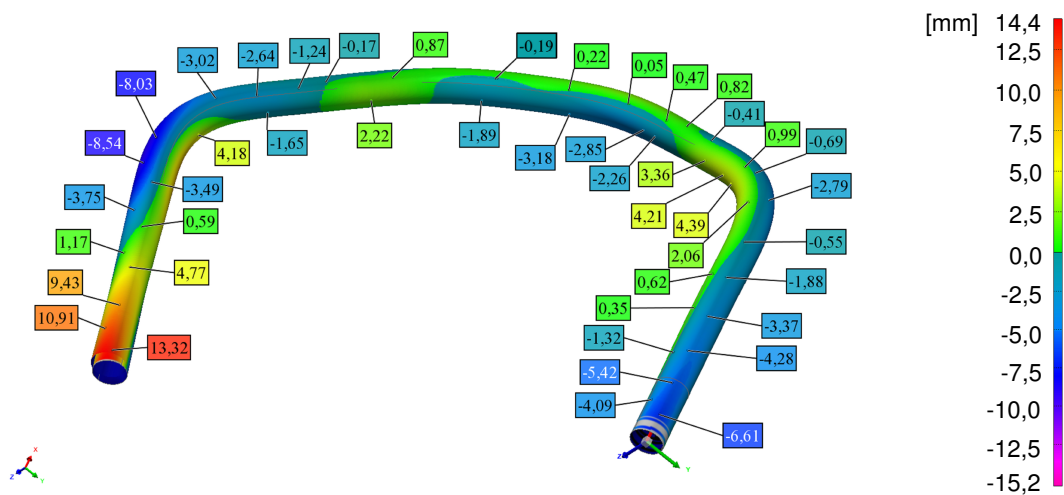


Abbildung 8.11: Simulationsergebnis des fertigen Biegeteils

9 Modell zur Bestimmung der Prozessrobustheit

Neben der im Abschnitt zuvor beschriebenen Methodik zur Herstellbarkeitsbewertung von Biegebauteilen ist es in der industriellen Praxis ebenso relevant, welche Genauigkeiten und Abweichungen bei der Industrialisierung verschiedener Bauteile zu erwarten ist. Diese Information führt weitergehend zur Spezifikation der Toleranzbereiche, bestimmt das Erfordernis von Nachkalibrierungsprozessen und entscheidet in Bezug auf die gesamte Prozesskette, ob die geforderte Toleranz am Zielbauteil mit der vorgeschlagenen Methode erreicht werden kann. Mit den Erkenntnissen der Sensitivitätsstudien aus Abschnitt 7 wurde in der Biegeanlage Inline-Messtechnik installiert, welche reale Messdaten in Bezug auf Chargeninterne und -übergreifende Prozessstreuungen liefern soll. Darauf aufbauend wurde des Weiteren ein Modell abgeleitet, welches eine Prognose der Prozessstreuung ermöglicht und somit auch eine Bewertung der Prozessfähigkeit in der Bauteilentstehungsphase zulässt.

9.1 Erfassung und Auswertung ausgewählter Prozessparameter

Die messtechnische Erfassung von Prozess- und Halbzeugparametern für jedes Bauteil umfasst eine der aktuellen Stoßrichtungen zur Digitalisierung in der Produktionstechnik. Die erwünschten Ergebnisse sollen insbesondere ein besseres Verständnis der Prozessführung liefern, Nacharbeitsumfänge durch konkrete Bauteilnachverfolgung verhindern, die Beschreibung von Ursache-Wirkungsketten komplexer Sachverhalte ermöglichen und in der Endausbaustufe auch eine parametersatzspezifische Prozesssteuerung gestatten (Maier, 2018). Im Rahmen dieser Arbeit wurden die relevanten Parameter für die Inline-Datenerfassung auf Basis der Sensitivitätsstudien aus Abschnitt 7 definiert. Dabei konnten insbesondere die Halbzeugabmessungen, als auch die Reibwerte während des Biegeprozesses als Prozessparameter mit hohem Einfluss auf das Biegeergebnis identifiziert werden. Davon ausgehend wurden Messeinrichtungen abgeleitet, welche in der vollautomatisierten Biegezone im BMW Werk Dingolfing implementiert wurden. Die einzelnen Messmethoden zur Bestimmung von Rohrdurchmesser, Rohrblechdicke sind dazu detailliert in Abschnitt 4.2.4 beschrieben. Als Ersatzwert für die Reibwerte des Biegeprozesses wurde der Durchsatz der Schmiermittelmenge aufgezeichnet, was zwar keinen direkten Aufschluss auf die resultierenden Reibwerte zulässt, aber zumindest eine Information über die Stabilität dieses Prozessparameters ermöglicht. Neben der Erfassung der Prozesseingangsparameter ist auch eine Bewertung des zugehörigen Prozessergebnisses für jedes Bauteil notwendig, da ansonsten der Rückschluss auf Ursache-Wirkungsketten nicht möglich ist. Dazu wurde die im folgenden bewertete Demonstratorgeometrie nach erfolgtem Biegevorgang kamerabasiert vermessen und als Bewertungsgröße die Profilöffnung zwischen Rohranfang und

Rohrende ausgewertet. In Abbildung 9.1 sind die Messergebnisse für einen Produktionslauf von 2200 Bauteilen des Demonstrators dargestellt, welche über drei Arbeitstage (T1-3) im Zweischichtbetrieb hergestellt wurden. In Grafik (a) ist zunächst die Blechdicke (Mittlere, Minimale und Maximale) dargestellt. Dabei sind Sprünge der Blechdicke zu beobachten, welche auf den Behälterwechsel der Halbzeuge zurückzuführen sind. Dies bedeutet, dass hintereinander Halbzeuge verschiedener Produktionschargen verarbeitet wurden, die sich in den Parametern unterscheiden. Dabei treten Blechdickensprünge von bis zu 0,05 mm bezogen auf den Mittelwert auf. Des Weiteren ist ein kleines Streuband aller aufgezeichneter Werte für jeden Halbzeugbehälter zu erkennen. In Abbildung (b) ist der Rohrdurchmesser dargestellt, wobei ebenfalls Sprünge beim Behälterwechsel auffällig sind. Dabei ist im Vergleich zur Blechdicke auffällig, dass der mittlere Durchmesser über alle Bauteile relativ konstant ist, die Ovalität des Rohres allerdings stärkeren Veränderungen unterliegt. Bei der Blechdicke überschreiten alle Halbzeugchargen die von der BMW AG dem Hersteller vorgegebene maximale Blechdicke von 2,1 mm. Das gleiche ist auch beim Rohrdurchmesser zu beobachten, wo die obere Spezifikationsgrenze bei 64,1 mm liegt. Trotzdem konnten die Halbzeuge durch die Biegemaschine aufgenommen und verarbeitet werden. In Grafik (c) ist der Schmiermitteldurchfluss als Durchschnittswert über den Biegevorgang an der Außenschmierung des Rohres dargestellt. Dabei ist eine untertägige Zunahme der Schmiermittelmenge zu beobachten, welche nach einer Pause oder zwischen Spät- und Frühschicht jeweils abnimmt oder auf Ausgangsniveau zurückgeht. Der genaue Grund des gemessenen Effektes lässt sich dabei nur schwer interpretieren. Es kann allerdings angemerkt werden, dass diese Messwerte im Hochsommer aufgenommen wurden, wobei im Laufe eines Produktionstages die Hallentemperatur deutlich ansteigen kann. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Beölung der Rohre beim Freiformbiegen kein stabiler Prozessinhalt ist und somit bei einer Weiterentwicklung in Anlehnung an z.B. das Tiefziehen deutlich optimiert werden kann. In Grafik (d) ist abschließend das korrelierende Biegeergebnis abgebildet. Dabei sind auch in der Profilöffnung dieselben Sprünge beim Chargenwechsel zu erkennen, die auch bei den Halbzeugparametern auftreten. Dabei ist zu sehen, dass kleine Sprünge von bis zu 22 mm z.B. bei Bauteil 1360 durch die Messmethode erfasst werden können. Größere Abweichungen, die ebenfalls während der Untersuchungen aufgetreten sind, z.B. an Position 1710, können zu einer Überschreitung der Abweichung in Bezug auf das Kameramesssystem führen, sodass keine Inline-Aufzeichnung der Daten mehr möglich ist. Dabei sind Abweichungen beim Chargenwechsel von bis zu 80 mm aufgetreten, welche anschließend durch eine Korrektur des Biegeprogramms wieder in den Toleranzbereich gebracht wurden. Solche Eingriffe in den Biegeprozess verfälschen somit auch eine Korrelationsstudie zwischen den einzelnen Kenngrößen über einen längeren Zeitraum. Zur Bewertung der resultierenden Standardabweichung des Bie-

geprozesses in Anlehnung an Abschnitt 5.2, wurde die Profilöffnung mit einer gleitenden Standardabweichung (Intervall: 20 Bauteile) hinterlegt, welche ebenfalls in Grafik (d) dargestellt ist. Dabei liegen die Messwerte in einem Intervall zwischen 1,5 und 5 mm, je nachdem ob im betrachteten Intervall auch ein Chargenwechsel aufgetreten ist. Dabei ist zudem festzustellen, dass die Standardabweichung nach einer Korrektur des Prozesses oder auch einem Chargenwechsel immer auf einem ähnlichen Niveau liegt und somit eine Kontinuität des Biegeverfahrens auch bei unterschiedlichen Eingangsparametern gegeben ist.

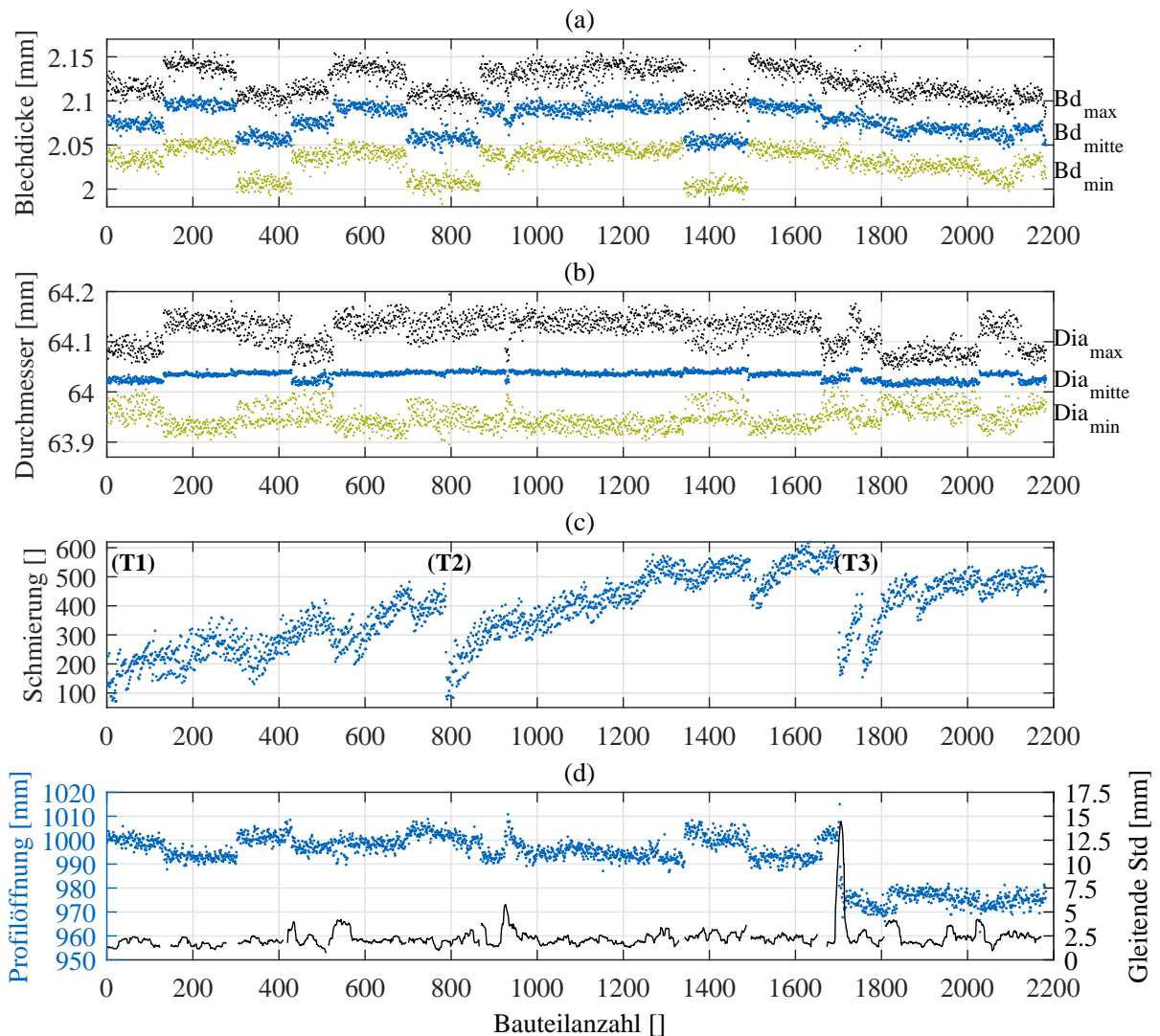


Abbildung 9.1: Messdaten der Inline-Erfassten Prozessparameter für 2200 Bauteile der Demonstratorgeometrie

9.1.1 Prozessstreuung innerhalb einer Charge

Im folgenden Absatz soll nun der Fokus auf der gemessenen Prozessstreuung innerhalb einer Halbzeugbehältercharge liegen. Dazu wurde in Abbildung 9.1 der Bereich zwischen Bauteil 138 und 295 ausgewählt. Für diese 157 Biegeteile wurden die dargestellten Werte bzgl. ihrer Mittelwerte und Standardabweichungen ausgewertet. Darüber hinaus wurde zusätzlich die Blechdicke in der Schweißnaht mit angegeben, die durch die beschriebenen Messmittel ebenfalls aufgenommen wird. Die Auswertung ist in 9.1 aufgeführt. Die mittlere Blechdicke liegt im ausgewerteten Intervall bei 2,096 mm mit einer sehr geringen Standardabweichung von 0,0045 mm. Die Standardabweichung der minimalen und maximalen Blechdicke liegen leicht darüber, bei 0,0055 mm und 0,0063 mm. Die Blechdicke der Schweißnaht, deren obere Spezifikationsgrenze bei 2,3 mm festgesetzt wurde, lag dabei mit einem Mittelwert von 2,175 mm und einer Standardabweichung von 0,0152 mm reproduzierbar innerhalb des Toleranzfeldes. Die Messwerte des mittleren Rohrdurchmessers lagen bei 64,034 mm und wiesen eine Standardabweichung von 0,0027 mm auf. Zusammenfassend ist dabei festzustellen, dass die Halbzeuge einer Charge eine sehr hohe Reproduzierbarkeit aufweisen und mit einer minimalen Streuung der Geometrieparameter angeliefert werden. Als weiterer messtechnisch erfasste Parameter wurde die Schmiermenge aufgezeichnet, welche im vorhergehenden Absatz bereits als instabile Prozessgröße identifiziert werden konnte. Auch bei Betrachtung der Veränderung der Beölung innerhalb der 157 Bauteile konnte eine in Relation zum Mittelwert (247,18) sehr hohe Standardabweichung von 49,34 festgestellt werden. Zuletzt wurde die resultierende Standardabweichung des Biegeprofils, bezogen auf den Abstand der Endpunkte mit 1,749 mm bestimmt. Im Vergleich zu den offline-vermessenen Demonstratorbauteilen konnte für diesen ausgewählten Produktionsabschnitt eine geringere Prozessschwankung festgestellt werden, was auf die hohe Reproduzierbarkeit der Halbzeuggeometrie zurückzuführen ist. Diese Ergebnisse korrelieren mit den Resultaten der Sensitivitätsstudien aus Abschnitt 7.1, wobei ein hoher Einfluss der Halbzeugparameter auf die Biegegeometrie nachgewiesen wurde. Des Weiteren lässt sich aus den gewonnenen Erkenntnissen ableiten, dass die Stabilität des tribologischen Systems eine maßgebliche Stellgröße für die Maßhaltigkeit der Biegebauteile ist und somit als Forschungsfeld für weitergehende Untersuchungen zu Biegetechnik empfohlen wird.

Tabelle 9.1: Erfasste Inline Prozess & Halbzeugparameter beim Freiformbiegen mit Angabe der Standardabweichung

Parameter	Mittelwerte	Standardabweichung
Mittlere Blechdicke	2,096 mm	± 0,0045 mm
Min. Blechdicke	2,049 mm	± 0,0055 mm
Max. Blechdicke	2,140 mm	± 0,0063 mm
Blechdicke Schweißnaht	2,175 mm	± 0,0152 mm
Mittlerer Durchmesser	64,034 mm	± 0,0027 mm
Min. Durchmesser	63,930 mm	± 0,0108 mm
Max. Durchmesser	64,140 mm	± 0,0129 mm
Beölung	247,18	± 49,34
Profilöffnung	993,18 mm	± 1,749 mm

9.1.2 Prozessreaktion beim Chargenwechsel

Neben der chargeninternen Prozessstreuung können auch Erkenntnisse über die Geometrieabweichungen des Biegeprofils beim Wechsel zwischen verschiedenen Halbzeugchargen abgeleitet werden. Dabei muss für die Ableitung von Korrelationen darauf geachtet werden, dass nach dem Chargenwechsel des Halbzeugbehälters keine Anpassung des Biegeprogramms vorgenommen wurde und somit das veränderte Biegeergebnis auf die Eingangsparameter zurückgeführt werden kann. Dies kann beispielsweise über eine vollständige Dokumentation von Prozessparameteränderungen während des Produktionsprozesses sichergestellt werden. Betrachtet man nun die Korrelationen am Chargenübergang, so kann beispielsweise in Bezug auf den Rohrdurchmesser folgender Zusammenhang abgeleitet werden: An Bauteilposition 1660 konnte eine Abnahme des Durchmessers in Kombination mit einer Zunahme der Profilöffnung beobachtet werden. Eine genaue Auswertung der Korrelationen dieser Messwerte in einem Bereich um den Chargenwechsel führt zu einem negativen Korrelationskoeffizienten von $R=-0,448$. Die gleiche Beobachtung in ähnlicher Größenordnung kann z.B. bei Bauteil 2020 getroffen werden, wobei hier der Durchmesser zunehmend und die Profilöffnung abnehmend korrelieren. Dabei lässt sich der Korrelationskoeffizient wiederum negativ mit $R=-0,432$ bestimmen. Dies liefert den Experimentellen Nachweis, dass direkte Korrelationen zwischen der Halbzeuggeometrie der Bauteile und dem resultierenden Biegeergebnis bestehen. Diese Zusammenhänge können auch in ein Regelwerk für die Produktionsmitarbeiter*innen abgeleitet werden, worin die notwendigen Prozessanpassungen bei einem Chargenwechsel der Halbzeuge entsprechend deren Parameter hervorgehen. Neben den Behälterwechseln, die ohne eine Prozesskorrektur auskom-

men, wurde z.B. bei Bauteil 1710 auch eine Anpassung der Biegegeometrie beobachtet. Dabei verringerte sich die Profilöffnung nach der Justierung des Biegeprozesses von ca. 1005 mm auf ca. 980 mm. Für diesen spezifischen Chargenübergang war der Grund für die Notwendigkeit der Prozesskorrektur das Auftreten von Biegefalten im Innenbogen. Die dabei auftretenden Prozessreaktionen wurden bereits in Abschnitt 7 aufgezeigt und Lösungsoptionen dargestellt. Als generelle Empfehlung sollten Halbzeuge gleicher Charge möglichst in einem durchgehenden Produktionsablauf verarbeitet werden, um die Chargenwechsel und die dadurch bedingten Auswirkungen auf den Biegeprozess so gering wie möglich zu halten.

9.2 Numerisches Modell zur Abschätzung der Prozessfähigkeit

Abschließend sollen die bereits gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit nun in ein Modell zur Prognose der Prozessfähigkeit einfließen, welches bei der Entwicklung von zukünftigen Biegebauteilen eine Einschätzung über notwendige Toleranzfelder oder Kalibrierwerkzeuge ermöglichen soll. Die Berechnung soll dabei wieder durch das in Abschnitt 7 aufgebaute Simulationsmodell erfolgen, wobei die Eingangsparameter einer Verteilungsfunktion unterliegen. Dazu wird zunächst die komplexe Biegegeometrie des Demonstrators auf eine einfach zweidimensionale Biegung heruntergebrochen, da die Berechnungszeit im FE-Modell für die einzelnen Versuchspunkte wiederum minimiert werden soll. In Kapitel 5.2 wurde zudem bei Betrachtung der Standardabweichung festgestellt, dass deren Zunahme über die Bogenlänge sich ähnlich eines linearen Anstiegs entwickelt. Darauf aufbauend wird das Modell zur Prozessfähigkeit auf eine Biegung mit einer Bogenlänge von 530 mm reduziert und nach erfolgter Simulation auf die Bogenlänge des Demonstrators hochgerechnet. Die Matrizenauslenkung für den einen Bogen soll dabei der mittleren Kurvenkrümmung des Demonstrators zwischen Anfangs- und Endgerade entsprechen. In Bezug auf den Demonstrator liegt diese mittlere Kurvenkrümmung bei 0,0020 1/mm, was einem Radius von 494,34 mm entspricht und bei gewählten Prozessparametern eine Matrizenauslenkung im konstanten Krümmungsbereich von 15,3 mm erfordert. Die Abbildung der Prozessparameterschwankung wird über LS-Opt realisiert, wobei für die statistische Versuchsplanung diesmal normalverteilte Parameterdefinitionen verwendet wurden (Witowski, 2019). Alle variablen Eingangsparameter sind in Tabelle 9.2 aufgeführt. Dazu wurden die im Versuch ermittelten Daten der Blechdicken und der Durchmesser übernommen. Außerdem wurden die Reibwerte an Rohrrinnen und -außenseite entsprechend dem FE-Modell übernommen und eine Standardabweichung von 0,002 festgesetzt. Als weiteren Parameter wurde die Matrizenauslenkung entsprechend des gewünschten Biegeradius mit 15,3 mm festgelegt und dazu ebenfalls eine Standardabweichung von 0,005 mm angenommen. Dies soll vernachlässigte Effekte in der Maschinenpräzision und der Maschinennachgiebigkeit darstellen. Der Experim-

entlauf wurde mittels Latin Hybercube Sampling aufgebaut und der Parameterraum mit 1000 Experimenten definiert. Zur Auswertung der einzelnen Simulationen wurde der Biegelinienendpunkt der einfachen Biegung ausgewertet und dessen Standardabweichung bzgl. der räumlichen Position berechnet. Bei gewählter Bogenlänge von 530 mm mit einer Kurvenkrümmung von 0,0020 1/mm wurde eine Standardabweichung von 0,51 mm errechnet. Übertragen auf die Geometrie des Biegedemonstrators mit einer Bogenlänge von 2650 mm liegt die prognostizierte Streuung der Biegelinienendpunkte bei 2,55 mm. Damit ordnet sich die prognostizierte Prozessstreuung zwischen der im Versuch bestimmten Offline-Messung (3,42 mm) und der durch Inline-Messung (1,75 mm) erfassten Daten ein. Die Größe der ermittelten Standardabweichung liegt dabei zunächst in einem plausiblen Prozessfenster, sollte im Bauteilentstehungsprozess auf Grund der unterschiedlichsten Einflussfaktoren auf den Biegeprozess nicht als Entscheidungskriterium zur Machbarkeit herangezogen werden. Viel mehr kann diese Methodik zur Untersuchung der Einflüsse verschiedener Parameter auf die Stabilität des Biegeprozesses angewendet werden. Ebenso lässt sich damit die Auswirkung von Prozessoptimierungen oder die Anpassung der Halbzeugtoleranzfelder auf den Fertigungsprozess plausibilisieren. Es bleibt bei dieser Methodik allerdings offen, ob alle relevanten Parameter im Modell berücksichtigt wurden und ob die angenommenen Standardabweichungen der einzelnen Prozessparameter auch für andere Halbzeuge, Halbzeughersteller, Rohrherstellungsverfahren oder Rohrmaterialien gelten. Des Weiteren kann auch keine Aussage darüber getroffen werden, ob die Prozessstabilität bei anderen Biegemaschinen des gleichen Herstellers ebenso hoch ausfällt, oder die Biegemaschinen an sich durch ihre Bauweise unterschiedlich auf die Biegebauteile reagieren. Abschließend wird für die Anwendung der Methodik im Bauteilentstehungsprozess die Detaillierung der Eingangsparameter, sowie die Datenerhebung für verschiedene Halbzeuge und Biegemaschinen empfohlen.

Tabelle 9.2: Variable Prozessparameter als Eingangsgröße zur Bewertung der Prozessrobustheit

Parameter	Mittelwerte	Standardabweichung
Mittlere Blechdicke	2,096 mm	± 0,0045 mm
Blechdicke Schweißnaht	2,175 mm	± 0,0152 mm
Mittlerer Durchmesser	64.034 mm	± 0,0027 mm
Reibwert Innen	0,08	± 0,002
Reibwert Außen	0,14	± 0,002
Matrizenauslenkung	15,3	± 0,005

10 Potentiale der entwickelten Systeme im Produktiveinsatz

Nach der Entwicklung und Validierung, der im Rahmen dieser Dissertation erarbeiteten Methoden, wird im folgenden Abschnitt deren Potential in der industriellen Anwendung diskutiert. Dazu wurden die Methoden unter anderem für die Endbenutzer aufbereitet, sodass diverse Techniken auch ohne tiefgreifende Erkenntnisse der Finiten-Elemente-Methode zeit- und kosteneffizient in der Serienentwicklung eingesetzt werden können.

10.1 Absicherung der Bauteil-Herstellbarkeit in der Fahrzeug-Konzeptphase

Dazu wird zunächst auf eine der Kernfragestellungen dieser Arbeit eingegangen, die Möglichkeit der virtuellen Bewertung der Herstellbarkeit von Biegebauteilen beim Freiformbiegen mit bewegter Matrize in der Konzeptphase der Fahrzeugentwicklung. Dabei übersteigt die Vielzahl der Methoden, die für die vollständige Bauteilbewertung notwendig sind, deren einfache Handhabung im Serieneinsatz der Fahrzeugentwicklung. Hierbei gilt es vorwiegend innerhalb von 2-3 Arbeitstagen eine Aussage über die Herstellbarkeit eines neuen Biegeteils liefern zu können und bei Bauteilversagen durch entsprechende Änderungsvorschläge nachzubessern. Um diese Bewertungszeit einhalten zu können, wurde in Zusammenarbeit mit verschiedenen BMW-internen Fachbereichen eine automatisierte, grafische Oberfläche entwickelt, welche ein einfaches und intuitives Abhandeln des in Abschnitt 8 beschriebenen Auslegungsprozesses ermöglicht. Ein Ausschnitt des Auslegungstools ist in Abbildung 10.1 dargestellt, wobei darin die Berechnungsoberfläche der Biegekinematiken und deren Bewertung bzgl. möglicher Prozessgrenzen dargestellt ist.

Neben den reinen Prozessauslegungsmethodiken wurde auch eine direkte Anbindung der FEM-Simulationsmodelle umgesetzt, sodass neben dem parametrisierten Modellaufbau auch die automatisierte Berechnung auf dem BMW-High-Performance-Cluster machbar ist. Zuletzt zeigen automatisierte Auswertungsalgorithmen den Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Eingangsparametern, was eine einfache Beurteilung der erzeugten Daten ermöglicht. Neben der Zeitersparnis durch die Prozessautomatisierung ist auch ein gleichbleibender Standard und eine Durchgängigkeit für alle bewerteten Bauteile sichergestellt. Somit kann eine dritte Person ohne spezifische Bauteilkenntnisse ein Simulationsprojekt einfach übernehmen und daran weiterarbeiten. Zusätzlich zu den reinen Erkenntnissen für die Simulation ist es ferner möglich, Informationen über die Bauteilauslegung an die Kolleg*innen der Serienproduktion zu übergeben. Dabei ist insbesondere die definierte Werkzeug- und Biegegeometrie interessant, als auch die in der Berechnung ermittelte Biegecharakteristik. Letztere kann vor allem bei der späteren Hardware-Erprobung des Bauteils die benötigte Zeit zur Parameterfindung deutlich verkürzen.



Abbildung 10.1: Benutzeroberfläche zur Auslegung und Simulation des Freiformbiegeprozesses

Als Ausblick für die weiteren Entwicklungsschritte beim Freiformbiegen würde vorzugsweise die Übernahme der virtuell ermittelten Biegekinematik an die Biegeanlage ein großes Kosten- und Zeitpotential mit sich bringen. Diese Übertragbarkeit konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht verwirklicht werden, da speziell auf Seite der Anlagensteuerung Schnittstellen und Methoden zur Übernahme der berechneten Daten fehlen. Erste Versuche wurden dazu parallel zu dieser Arbeit bereits von Petri (2018) durchgeführt, der sich mit der Übersetzungen der errechneten Biegekinematik auf einen von der Anlage lesbaren NC-Code beschäftigt hat.

10.2 Übernahme der Simulationsergebnisse für das Innenhochdruckumformen

Neben der reinen Biegung von Rohren, wird das Freiformbiegen bei der BMW AG im Werk Dingolfing als Vorformprozess für das Innenhochdruckumformen verwendet. Dabei werden Profile durch die Aufbringung von Innendruck in eine Form gepresst, welche entsprechend komplexe Flächenkonturen und -übergänge enthalten kann (Neugebauer, 2007). Für die virtuelle Absicherung dieser IHU-Bauteile wird wiederum die FEM-Simulation verwendet. Dabei wurden gängige Verfahrensgrenzen des IHU bereits von Eichhorn und Ohm (2002) aufgezeigt. Breitenbach und Steinheimer (2005) untersuchten darüber hinaus den Einfluss von verschie-

den gefertigten Halbzeugen auf das Umformvermögen beim IHU. Sorine (2007) konnte des Weiteren aufzeigen, dass insbesondere vorgebogene Rohre beim nachgelagerten Innenhochdruckumformen andere Versagensbilder aufweisen, als gerade oder spannungsarm-geglühte Rohre. Diese Erkenntnisse sollten auch für die Simulation des IHU bei der BMW AG übernommen werden, woraus die Anforderung entstand, die Biegesimulation des Freiformbiegens in die Simulationsprozesskette des Innenhochdruckumformens einzubinden. Der dafür entwickelte Prozessablauf ist in Abbildung 10.2 dargestellt. Ausgehend vom ebenen Blech werden entsprechend den Entwicklungen dieser Arbeit sowohl der Rohrherstellungsprozess sowie der Freiformbiegeprozess abgebildet. Anschließend erfolgt die Transformation des gebogenen, spannungs- und dehnungsbehafteten Bauteils in Werkzeuglage des Kalibrierprozesses (hier Vorformen (5) genannt). Nach erfolgtem Vorformprozess wird das Bauteil dann in das IHU-Werkzeug eingelegt und dieses geschlossen (6). Im letzten Prozessschritt (7) wird das Bauteil final mit Innendruck beaufschlagt und in die Werkzeugkontur gepresst. Währenddessen und im Anschluss daran kann die Bewertung der Bauteilqualität bzgl. Bauteilversagen durch Risse oder die Rückfederung nach Entnahme aus dem IHU-Werkzeug erfolgen. Die Versagensbewertung und die Modellierung des IHU-Prozesses an sich werden bereits seit vielen Jahren erforscht. Dabei spielen insbesondere die Eigenschaften der Reibverhältnisse durch die Kombination des hohen Innendrucks mit den verschiedenen Prozessmedien eine große Rolle (Prier, 2000; Riskin, 2018). Der aktuelle Entwicklungsschwerpunkt liegt dabei vorwiegend auf der Beschreibung der Mehrdimensionalität der Reibungsmodellierung, wie sie z.B. durch Sigvant et al. (2016) im Rahmen der Blechumformung beschrieben wurde.

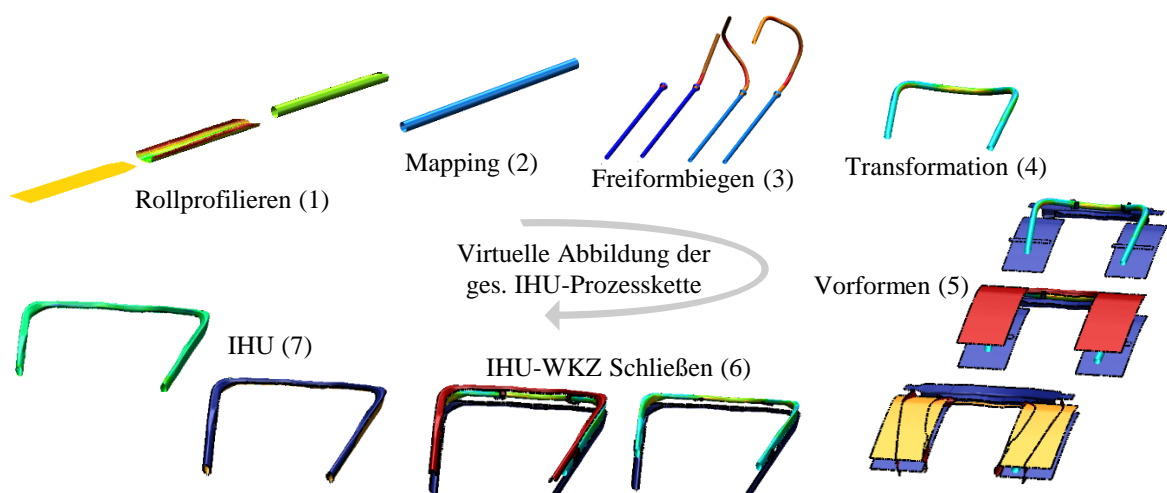


Abbildung 10.2: Berechnungsschritte zur virtuellen Abbildung des IHU-Gesamtprozesses

Durch die Entwicklung der Simulationethodik für die Prozesskette Freiformbiegen konnte im Rahmen dieser Arbeit ebenso die Prozesskette Innenhochdruckumformen vervollständigt

werden. Dadurch ist es nun möglich den gesamten Prozessablauf simulativ abzusichern, welches zunächst die Bewertung des Biegeprozesses an sich ermöglicht, aber auch die Herstellbarkeit nach erfolgtem IHU-Prozess sicherstellt. Die Simulationsmethodik IHU wurde deswegen bei BMW an das Simulationstool des Freiformbiegeprozesses angeknüpft, um auch hier eine Durchgängigkeit der verwendeten Parameter, Materialmodellierungen und numerischen Einstellungen sicherzustellen. Abschließend kann aus ersten industriellen Anwendungsfällen die Aussagefähigkeit der Gesamtsimulation IHU bestätigt werden, da mehrfach die Herstellbarkeit von IHU-Bauteilen korrekt bewertet werden konnte.

10.3 Anwendung der Inline-Messtechnik in der Serienproduktion

Zuletzt soll nun evaluiert werden, wie die angewendeten Inline-Messtechniken und die daraus erzeugten Prozessdaten in der Serienproduktion einfach und effizient angewendet werden können. Im Rahmen dieser Arbeit konnte bereits aufgezeigt werden, dass beim Freiformbiegen Prozessstreuungen sowohl innerhalb, aber auch beim Chargenwechsel in den unterschiedlichsten Ausprägungen auftreten können. Des Weiteren konnten erste Korrelationen einzelner Parameter durch die Auswertung erfasster Messgrößen abgeleitet werden. Für die Anwendung der Daten im Rahmen der Serienproduktion ist es zunächst erforderlich, diese bauteilspezifisch, standardisiert und strukturiert zu dokumentieren. Dies wurde im Rahmen dieser Arbeit über eine SQL-Datenbank realisiert, die einen einfachen Zugriff auf den aktuellsten Datensatz, aber auch die Datenhistorie ermöglicht. Dadurch können die Daten von Produktionsabschnitten nachträglich ausgeleitet werden und mit auftretenden Fehlerbildern in Zusammenhang gebracht werden. Darüber hinaus soll die Inline-Datenerfassung aber auch dazu verwendet werden, das Auftreten von Fehlern präventiv zu verhindern, bzw. zu reduzieren. Dazu wurde ein Dashboard in Python Umgebung entwickelt, welches direkt an der Biegemaschine über einen Monitor visualisiert wird. Darin werden die in Echtzeit aufgenommenen Daten unmittelbar visualisiert und dem Anlagenführer zu Verfügung gestellt. In Abbildung 10.3 ist die Visualisierungsoberfläche dargestellt.

Die Daten werden dafür aus der SQL-Datenbank abgerufen und im linken Teil des Dashboards für die letzten 200 Bauteile visualisiert. Die Messwerte wie Blechdicke, Durchmesser, Biegegeometrie, Maschinenkinematik und Rohrbeölung können hierbei mit Grenzwerten und Toleranzfeldern eingeschränkt werden und entsprechend Signale bei Überschreitung gesendet werden. Dies ermöglicht nicht nur die direkte Qualitätskontrolle aller angelieferter Halbzeuge, sondern dient auch als 100 % Qualitätsprüfung der Biegegeometrie, da alle Bauteile nach Biegeende mittels der Streifenlichtmethode vermessen werden. Dem Anlagenführer ist es somit auch

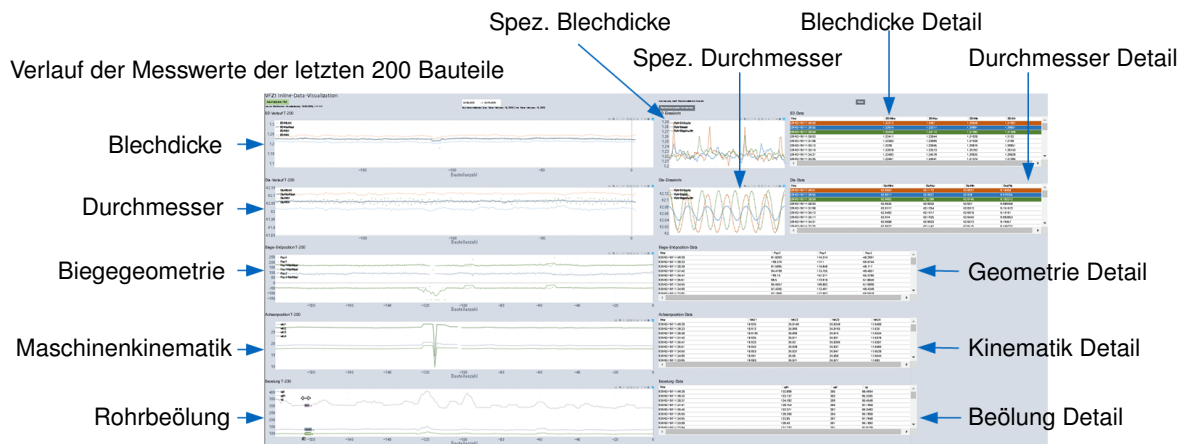


Abbildung 10.3: Dashboard zur Live-Prozessüberwachung Inline erfasster Prozessparameter beim Freiformbiegen

unmittelbar möglich eine Abweichung der Biegegeometrie festzustellen und diese anzupassen, was wiederum Ausschussteile und somit auch die Produktionskosten reduziert. Im rechten Teil des Dashboards werden die letzten drei Bauteile detailliert mit allen Messwerten und eine Historie in Tabellenform dargestellt. Somit sind für mögliche Korrekturen auch direkt detaillierte Parameterinformationen vorhanden. Im Zuge der Industrie 4.0 liefern die beschriebenen Methoden bereits einen guten Start zur Digitalisierung der Prozesskette Freiformbiegen. Dabei sollte in weiterführenden Arbeiten die Datensammlung ausgeweitet werden und weitere relevante Parameter, sowie Prozesseingriffe dokumentiert werden. Als Vision kann des Weiteren die Möglichkeit der Inline-Steuerung des Freiformbiegeprozesses aufgeführt werden. Staupendahl, Chatti und Tekkaya (2016) haben in Ihrer Arbeit bereits ein Konzept zur Inline-Steuerung von Freiformbiegeverfahren dargestellt. Zur Umsetzung einer solchen Steuerung ist vor allem eine robuste Datenerzeugung als Basis zu sehen, von der aus Regelkreise abgeleitet und aufgebaut werden können. Abschließend lässt sich noch ergänzen, dass gerade das Freiformbiegen mit bewegter Matrize als Umformverfahren mit kinematisch geregelter Formgebung prädestiniert für eine Inline-Steuerung ist, da lediglich eine entsprechende Nachregelung der Biegematrizenkinematik realisiert werden muss.

11 Zusammenfassung und Ausblick

Das Freiformbiegeverfahren mit bewegter Matrize gilt als hochflexibel einsetzbar und auf Grund seiner kinematischen Formgebung kosteneffizient im Betrieb. Dabei ist der Biegeprozess bereits seit vielen Jahren in der industriellen Anwendung zu finden, unter anderem im BMW Group Werk Dingolfing. Als herausfordernd hat sich für die Produktionsmitarbeiter*innen unter anderem die Inbetriebnahme neuer Biegegeometrien erwiesen, welche infolge des Einsatzes neuer Werkstoffe und zunehmender Komplexität in der Biegekontur nicht mehr einfach darzustellen sind. Des Weiteren ist auch die Herstellbarkeitsbewertung durch statische Annäherungen nicht mehr gültig und fordert somit neue Methoden, um in der Prozessgestaltungsphase präzise Informationen zur Bauteilherstellbarkeit ableiten zu können.

In diesem Punkt setzt die vorliegende Dissertation an, die zum Ziel hat, neben der Herstellbarkeitsbewertung auch das Biegeverfahren besser zu verstehen, damit der Prozess effektiver gestaltet und dessen Robustheit erhöht werden kann. Um einen direkten Rückschluss auf die Qualität der erarbeiteten Methoden ziehen zu können, wurde ein Serienbauteil der BMW Group als Demonstrator herangezogen, welches insbesondere die Komplexitätsanforderungen erfüllt.

Für die Absicherung der Bauteilherstellbarkeit in der Phase der Fahrzeugentwicklung sollte eingehend ein Simulationsmodell für den Freiformbiegeprozess erarbeitet werden. Als Weiterentwicklung zum Stand der Technik wurde dabei auch das Verfestigungsverhalten der zum Biegen verwendeten Halbzeuge mitberücksichtigt, welches ein detailliertes Abbild der Prozesskette Freiformbiegen ermöglicht. Die erarbeiteten Modelle wurden anhand von Realversuchen umfassend erprobt und validiert. Durch die direkte Verknüpfung zur Serienproduktion des Demonstratorbauteils konnten darüber hinaus auch Informationen über die Prozessfähigkeit des Biegeverfahrens und erste Ursache-Wirkungsketten abgeleitet werden.

Unter Anwendung des Simulationsmodells konnten kosten- und zeiteffizient weitere Sensitivitätsstudien durchgeführt werden, welche neben den Prozessparametern auch den Einfluss der Werkzeuggeometrie umfassten. Dabei konnten starke Korrelationen zwischen den Abmessungen der Biegehalbzeuge und auftretenden Prozessdefekten beim Freiformbiegen nachgewiesen werden. Eine Optimierung der Werkzeuggeometrie auf Basis von abgeleiteten Metamodellen der Ursache-Wirkungsketten-Prinzipien zeigte positive Effekte in Bezug auf die Homogenität der Biegung, die auftretenden Biegekräfte, sowie die Prozessgrenzen beim Freiformbiegen.

Als Kernpunkt der Dissertation stellte sich schnell die Berechnung der Biegekinematik heraus, welche für die exakte Formgebung eines räumlich-gebogenen Bauteils unabdingbar ist. Die anhand des Demonstrators entwickelten Methoden umfassen dabei mehrere Kompensati-

onsschleifen und benötigen verschiedene Eingabegrößen, wie beispielsweise einen Werkzeugstandard und die Zielgeometrie des Bauteils. Nach der Berechnung der kompensierten Biegekinematik wird diese durch das FEM-Simulationsmodell bestätigt und somit die Herstellbarkeit des Bauteils validiert. Dabei liegt der Fortschritt in Abgrenzung zum Stand der Technik darin, dass diese Methodik ohne einen realen Biegeversuch auskommt und somit auch Bauteile mit unbekannter Halbzeug- oder Werkzeuggeometrie getestet werden können.

Für einen stabilen Serienprozess ist neben der reinen Herstellbarkeit auch die Robustheit des Umformverfahrens über die Produktlaufzeit von mehreren Jahren relevant. Um auch dafür eine virtuelle Abschätzung zu generieren, müssen zunächst schwankende Prozessparameter und -stellgrößen ermittelt und quantifiziert werden. Im Rahmen dieser Arbeit konnten nach der Auswertung verschiedener Sensitivitätsstudien zunächst Parameter identifiziert werden, welche eine starke Korrelation zum Biegeergebnis aufweisen. Anschließend konnten selbige Kennwerte durch ausgewählte Messmethoden auch im Serienprozess erfasst und aufgezeichnet werden. Die Anwendung daraus zusammengefasster Ursache-Wirkungsketten, ermöglicht die Prognose der Prozessfähigkeit sowie von Prozessschwankungen für neue Biegebauteile beim Freiformbiegen.

Bei der Erarbeitung von industrienahen Problemstellungen ist es abschließend besonders von Bedeutung, inwieweit der neu erforschte Stand der Technik im normalen Produktentwicklungsprozess anwendbar ist. Dazu wurde im letzten Abschnitt dieser Dissertation die Übernahme der entwickelten Methoden in den alltäglichen Arbeitsablauf diskutiert. Die Simulationethodik zum Freiformbiegen wurde dafür in eine Benutzeroberfläche eingebettet, um die Methodik standardisiert und zeiteffizient abarbeiten zu können. Darüber hinaus wurde zur Überwachung des Serienprozesses ein Dashboard programmiert, welches die erfassten Prozesskennwerte visualisiert und dokumentiert. Damit lassen sich Prozessabweichungen sofort erkennen und somit auch nachkorrigieren, was langfristig zu weniger Ausschuss und einem stabileren Serienprozess führt.

Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit konnten zwei Forschungsfelder für weitere Arbeiten identifiziert werden. Zunächst sollte an einer Methodik geforscht werden, die die Übergabe von berechneten Biegekinematiken direkt an die Biegemaschine ermöglicht. Dazu muss neben der reinen NC-Code-Übersetzung auch an der Möglichkeit gearbeitet werden, diese mehrdimensionale Biegekinematik durch einfache Maschinenparameter anpassen und somit Korrekturen im Serienprozess direkt und ohne zeitlichen Aufwand umsetzen zu können.

Das zweite Forschungsfeld umfasst die Steuerung des Biegeverfahrens. Dabei könnte durch die Überwachung verschiedener Prozesseigenschaften der Umformprozess aktiv kompensiert und geregelt werden. Generell ist die intelligente Prozessregelung in zwei Untergruppen aufzuteilen. Bei ersterer sollen, durch die Überwachung relevanter Prozessparameter, Abweichungen zum Soll aufgezeigt und modellbasierte Empfehlungen zur Prozesskorrektur aufgezeigt werden. In der zweiten Ausbaustufe sollen durch inline-erfasste Prozesskennwerte, wie beispielsweise die Kurvenkrümmung, direkte Steuersignale für die bewegten Matrizen abgeleitet werden, welche durch eine Regelung die Ist-Geometrie kompensieren und immer die Erreichung der Soll-Geometrie sicher stellen.

A **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 2.1:	Verfahren zur Herstellung von Rohren (mod. von (Breitenbach, 2007))..	4
Abbildung 2.2:	Verfahrensablauf - Rohrherstellung mittels Rollprofilieren (mod. von (Breitenbach, 2007))	4
Abbildung 2.3:	Grundlegende Begriffe am Rohrbogen (mod. von (Franz, 1961))	6
Abbildung 2.4:	Spannungsverhältnisse am idealen Rohrbogen (mod. von (Franz, 1961))	7
Abbildung 2.5:	Definition von mehrdimensionalen Biegeoperationen (mod. von (Landgrebe et al., 2015)).....	8
Abbildung 2.6:	Beispiele für konventionell und freiformgebogene Rohre mit unterschiedlicher Komplexität (mod. von (Vatter, 2014)).....	9
Abbildung 2.7:	Prinzipskizze Rotationszugbiegen (mod. von (VDI-Richtlinie 3430, 2014-06)).....	10
Abbildung 2.8:	Arbeitsdiagramm für das Rotationszugbiegen (mod. von (Engel, Gerlach und Cordes, 2008)).....	11
Abbildung 2.9:	Prinzipskizze Drei-Rollen-Schubbiegen (mod. von (Kersten, 2013)).....	12
Abbildung 2.10:	Prinzipskizze Freiformbiegen	13
Abbildung 2.11:	Spannung und Dehnungszustand im gebogenen Rohr (mod. von (Kersten, 2013)).....	19
Abbildung 2.12:	Definition des Fähigkeitsindex (mod. von (Dietrich und Schulze, 2014))	21
Abbildung 3.1:	Arbeitspakete und Aufbau der Dissertation	24
Abbildung 4.1:	Freiformbiegemaschine mit 5 Freiheitsgraden der Firma Neu	26
Abbildung 4.2:	Konstruktionszeichnung der Biegewerkzeuge in Verbausituation	27
Abbildung 4.3:	Rückführung einer Biegelinie mittels Laserscan (mod. von (U. Bauer und Polthier, 2007)).....	29
Abbildung 4.4:	Prinzipskizze für die Quantifizierung von Biegefalten (mod. von (VDI-Richtlinie 3431, 2016-08))	33
Abbildung 4.5:	In-Line Durchmessererfassung: (a) Gemessenes Rohr (b) Aufbau der Sensorik.....	34

Abbildung 4.6:	In-Line Blechdickenmessung: (a) Gemessenes Rohr (b) Aufbau der Sensorik.....	36
Abbildung 4.7:	Messaufbau der Biegeprofilvermessung mittels 3D-Kamerasystem	37
Abbildung 4.8:	Analytische Beschreibung des elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens im Vergleich mit den zugrundeliegenden Versuchen: (a) Fließort (b) Fließkurve (c) Isotrop-kinematisches Verfestigungsverhalten	40
Abbildung 4.9:	Ergebnisse der Rohr-Charakterisierung : (a) Vgl. von Blech- und Rohr-Fließkurve (b) Beispiel des Rohraufsprungs	43
Abbildung 4.10:	Geometrie des Demonstrators: (a) Bild des gebogenen Rohres (b) Krümmungsverlauf der Biegelinie (c) Torsionsverlauf der Biegelinie	44
Abbildung 4.11:	Biegekinematik der Maschinenachsen zur Herstellung des Demonstrators: (a) Translation der Y-Achse gekoppelt mit der Rotation um die Z-Achse (b) Translation der Z-Achse gekoppelt mit der Rotation um die Y-Achse	45
Abbildung 5.1:	Zusammenhang zwischen Matrizenauslenkung und Biegeradius einzelner zweidimensionaler Bögen: (a) Einfluss des Werkzeugabstandes bei gleichbleibenden Halbzeug (b) Einfluss bei Veränderung von Halbzeug und Werkzeug	48
Abbildung 5.2:	Biegung einzelner zweidimensionaler Bögen: (a) Variation der Matrizenauslenkung zur Biegung unterschiedlicher Radien (Zunehmende Auslenkung von oben nach unten) (b) Variation der Beölungsmenge bei gleichbleibender Auslenkung (Zunehmend von Links (1) nach Rechts (9))	50
Abbildung 5.3:	Auswertung der Biegeversuche mit der Demonstratorgeometrie: Abweichung der Bauteile bzgl. der Bogenlänge entlang der (a) X-Richtung (b) Y-Richtung (c) Z-Richtung	52
Abbildung 5.4:	Auswertung der Biegeversuche mit der Demonstratorgeometrie: (a) Mittlere 3D-Biegelinie und Koordinatensystem für die Ausrichtung der Biegeteile (b) Gesamte Standardabweichung der Bauteile bzgl. der Bogenlänge gemessen zum Ursprung	53
Abbildung 6.1:	Simulationsmodell für das Rollprofilieren mit LS-Dyna.....	58
Abbildung 6.2:	Simulationsmodell für das Freiformbiegen mit LS-Dyna.....	60

Abbildung 6.3:	Vergleich zwischen 2d-Biegeversuchen und dem FEM-Simulationsmodell für verschiedene Geometrievarianten	65
Abbildung 6.4:	Faltenbewertung am Rohrrinnenbogen anhand von Beispielen (a) (b) (c) (d)	66
Abbildung 6.5:	Einfluss der Reibwerte aller Kontaktpaarungen auf die Bildung von Falten im Rohrrinnenbogen	66
Abbildung 6.6:	Vergleich des Demonstrators und dem FEM-Simulationsmodell (a) 3D-Biegelinie (b) Krümmungsverlauf (c) Torsionsverlauf (d) Blechdickenverlauf am Innenbogen Außenbogen (e) Blechdickenverlauf am Innenbogen (f) Dornkraftverlauf	68
Abbildung 6.7:	Beispiele für das Rohrversagen im Simualtionsmodell	70
Abbildung 7.1:	Sensitivität bzgl. Halbzeug Prozessparameter: (a) Biegewinkel (b) Biegeradius (c) Faltenbildung im Innenbogen (d) Vorschubkraft (e) Matrizenkraft (f) Dornkraft (Parameterabkürzungen sind in Tabelle 7.1 beschrieben).....	74
Abbildung 7.2:	Sensitivität bzgl. Werkzeugparameter: (a) Biegewinkel (b) Biegeradius (c) Faltenbildung im Innenbogen (d) Vorschubkraft (e) Matrizenkraft (f) Dornkraft (Parameterabkürzungen sind in Tabelle 7.2 beschrieben)...	77
Abbildung 7.3:	Einflussfaktoren des Freiformbiegeprozesses mit Gewichtung der Parameter.....	79
Abbildung 7.4:	Metamodellbasierte Prognose des resultierenden Biegeradius in Abhängigkeit der Matrizenauslenkung u_{abs} (a) bei Variation des Matrizenabstandes Bm_{kval} (b) bei Variation des Rohraußendurchmessers D_a ..	81
Abbildung 7.5:	Erhöhung der Bauteilqualität durch Anpassung der Werkzeuggeometrie.	84
Abbildung 8.1:	Arbeitsdiagramm des Freiformbiegeprozesses mit bewegter Matrize	86
Abbildung 8.2:	Diskretisierung und räumliche Beschreibung der Biegelinie (mod. von (Vipavc, 2018)).....	88
Abbildung 8.3:	Ablaufdiagramm der Auslegungsmethodik für freiformgebogene Rohre.	89
Abbildung 8.4:	Abbildung des Soll-Krümmungsverlaufes der Biegelinie durch den Biegeprozess in Abhängigkeit des Werkzeugabstandes BM_{kval}	91

Abbildung 8.5: Skizze der Berechnungslogik zur iterativen Bestimmung der idealisier- ten Modellkinematik (mod. von (Vipavc, 2018))	94
Abbildung 8.6: Berechnungsergebnisse der idealisierten Modellkinematik	94
Abbildung 8.7: Berechnung der Kompensation von Modell- auf Prozesskinematik.....	96
Abbildung 8.8: Kompensationsmodell der Kurventorsion	97
Abbildung 8.9: Kompensation der Kurventorsion.....	98
Abbildung 8.10: Vergleich Soll-Geometrie und Virtuelle Geometrie	101
Abbildung 8.11: Simulationsergebnis des fertigen Bieeteils.....	102
Abbildung 9.1: Messdaten der Inline-Erfassten Prozessparameter für 2200 Bauteile der Demonstratorgeometrie	105
Abbildung 10.1: Benutzeroberfläche zur Auslegung und Simulation des Freiformbiege- prozesses.....	112
Abbildung 10.2: Berechnungsschritte zur virtuellen Abbildung des IHU-Gesamtprozesses	113
Abbildung 10.3: Dashboard zur Live-Prozessüberwachung Inline erfasster Prozesspara- meter beim Freiformbiegen	115

B Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1:	Berechnungsgenauigkeit der Biegelinienrückführung	31
Tabelle 4.2:	Messsystemanalyse - 3D-Bauteilvermessung und Prüfung der Profilöffnung bei Anwendung des Universalmessarms	31
Tabelle 4.3:	Berechnungsgenauigkeit der Biegekenngößen	32
Tabelle 4.4:	Messsystemanalyse der Inline-Durchmessererfassung	34
Tabelle 4.5:	Messsystemanalyse der Inline-Blechdickenmessung	35
Tabelle 4.6:	Messsystemanalyse der Inline Geometrieerkennung.....	36
Tabelle 4.7:	Mechanische Kennwerte der richtungsabhängigen Zugversuche an einer EN-AW5182 Blechprobe mit 2,0 mm Blechdicke	38
Tabelle 4.8:	Parameter für die Fließkurvenapproximation nach Gosh (<i>Gleichung 4.2</i>)	39
Tabelle 4.9:	Parameter für die Fließortbeschreibung nach Barlat 2000.....	40
Tabelle 4.10:	Aufsprung des Rohres nach dem Aufsägen an verschiedenen Umfangspositionen.....	41
Tabelle 4.11:	Mechanische Kennwerte der Zugversuche an einer rollprofiliierten EN-AW5182 Rohrprobe in Abhängigkeit der Probenlage zur Schweißnaht ..	42
Tabelle 4.12:	Biegeprogramm zur Herstellung des Demonstrators.....	45
Tabelle 5.1:	Eigenschaften der eingesetzten Halbzeuge	49
Tabelle 5.2:	Rohrlänge vor und nach dem Biegevorgang	51
Tabelle 5.3:	Prozessfähigkeitsanalyse - 3D-Biegedemonstrator im Serienprozess.....	52
Tabelle 6.1:	Vergleich der real und virtuell bestimmten Kennwerte am Blech und am Rohr in 90° zur SN	59
Tabelle 6.2:	Fehlerbewertung der Simulationsergebnisse	64
Tabelle 7.1:	Versuchsplanung Sensitivitätsstudie Prozessparameter	73
Tabelle 7.2:	Versuchsplanung Sensitivitätsstudie Werkzeugparameter	76
Tabelle 7.3:	Genauigkeit der Versuchsapproximation durch ein neuronales Netz zur Beschreibung der Prozesswirkmechanismen	80
Tabelle 7.4:	Werkzeuggeometrie vor und nach der Optimierung.....	82

Tabelle 7.5:	Umformeigenschaften vor und nach der Optimierung.....	83
Tabelle 8.1:	Validierung der Berechnungsmethodik anhand einfacher, zweidimensionaler Bögen	101
Tabelle 9.1:	Erfasste Inline Prozess & Halbzeugparameter beim Freiformbiegen mit Angabe der Standardabweichung	107
Tabelle 9.2:	Variable Prozessparameter als Eingangsgröße zur Bewertung der Prozessrobustheit.....	109

C Literaturverzeichnis

- ABELE, E., R. ANDERL, H. BIRKHOFFER (2005). *Environmentally-friendly product development: Methods and tools*. London: Springer.
- BANABIC, D. (2010). *Sheet Metal Forming Processes*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- BANABIC, D. (2015). Fließkriterien. In: *Blechumformung*. Hrsg. von K. SIEGERT. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 309–322.
- BARLAT, F., J. C. BREM, J. W. YOON, K. CHUNG, R. E. DICK, D. J. LEGE, F. POURBOGHRAT, S.-H. CHOI, E. CHU (2003). Plane stress yield function for aluminum alloy sheets—part 1: theory. In: *International Journal of Plasticity* **19.9**, 1297–1319.
- BARSOUM, I., K. ALI (2015). Development of a Method to Determine the Transverse Stress-Strain Behaviour of Pipes. In: *Procedia Engineering* **130**, 1319–1326.
- BAUER, H. G., W. SCHADT, Hrsg. (2017). *Walzen von Flachprodukten*. Berlin: Springer.
- BAUER, U., K. POLTHIER (2007). Parametric Reconstruction of Bent Tube Surfaces. In: *International Conference on Cyberworlds (CW'07)*, 465–474.
- BAUER, U., K. POLTHIER (2009). Generating parametric models of tubes from laser scans. In: *Computer-Aided Design* **41.10**, 719–729.
- BAUSCHINGER, J. (1881). Über die Veränderung der Elastizitätsgrenze und des Elastizitätsmodulus verschiedener Metalle. In: *Civilingenieur* **27**, 289–348.
- BEULICH, N. (2016). *Simulation des Freiformbiegens von Profilrohren im Automobilbau*. Montanuniversität Leoben.
- BEULICH, N., P. CRAIGHERO, W. VOLK (2017). FEA Simulation of Free-Bending – a Pre-forming Step in the Hydroforming Process Chain. In: *Journal of Physics: Conference Series* **896**.
- BEULICH, N., R. MERTENS, J. SPOERER, W. VOLK (2019). Influence of Tube Rollforming on Material Properties and Subsequent Bending Processes. In: *Proceedings of the 12th Forming Technology Forum*.
- BREITENBACH, G. (2007). *Methode zur Analyse, Bewertung und Optimierung der Prozesskette Profilieren längsnahtgeschweißter Rohre für das Innenhochdruck-Umformen*. Aachen: Shaker Verlag.
- BREITENBACH, G. v., R. STEINHEIMER (2005). Properties of Tubular Semi-finished Products for Hydroforming. In: *Steel research international* **76.2-3**, 181–186.
- BRENSING, K. H., B. SOMMER (2005). *Herstellverfahren für Stahlrohre*. Mühlheim an der Ruhr: Mannesmann-Röhrenwerke AG.
- CAMBERG, A. A., T. TRÖSTER, F. BOHNER, J. TÖLLE (2019). Predicting plasticity and fracture of severe pre-strained EN AW-5182 by Yld2000 yield locus and Hosford-Coulomb fracture model in sheet forming applications. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **651**, 012057.
- CHABOCHE, J. L., G. ROUSSELIER (1983). On the Plastic and Viscoplastic Constitutive Equations—Part I: Rules Developed With Internal Variable Concept. In: *Journal of Pressure Vessel Technology* **105.2**, 153–158.

- CHERNOV, N. (2011). *Circular and Linear Regression: Fitting Circles and Lines by Least Squares*. Boca Raton: CRC Press.
- DATA M GMBG (2018). *F1 - COPRA® FEA RF Professional*.
- DICK, C. P., Y. P. KORKOLIS (2014). Mechanics and full-field deformation study of the Ring Hoop Tension Test. In: *International Journal of Solids and Structures* **51.18**, 3042–3057.
- DIETRICH, E., A. SCHULZE (2014). *Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation*. 7., aktualisierte Auflage. München: Carl Hanser Verlag.
- E, D., J. CHEN, C. YANG (2013). Plane strain solution and cross-section flattening analysis in tube bending with linear hardening law. In: *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* **48.3**, 198–211.
- E, D., M. CHEN (2010). Numerical Solution of Thin-walled Tube Bending Springback with Exponential Hardening Law. In: *steel research international* **81.4**, 286–291.
- EICHHORN, A., F. HÄFKE, S. MOTSCH, A. FELDE (1990). EFB Forschungsbreicht Nr. 131: Reibung beim Innenhochdruckumformen mit Nachschieben von Werkstoff. In: *Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V.*
- EICHHORN, A., K. OHM (2002). EFB Forschungsbericht Nr. 185: Umformparameter und -grenzen beim Innenhochdruckumformen (IHU) von Aluminiumrohren. In: *Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V.*
- ENGEL, B., M. HINKEL (2011). Analytisch unterstützte Vorauslegung des Rotationszugbiegeprozesses. In: *30. Verformungskundliches Kolloquium*.
- ENGEL, B., S. KERSTEN (2010). Sensitivitätsanalyse beim Freiformbiegen von Rohrprofilen. In: *30. EFB-Kolloquium Blechverarbeitung*.
- ENGEL, B., S. KERSTEN (2011). Analytical Models to Improve the Three-Roll-Pushbending Process of Tube-Profiles. In:
- ENGEL, B., C. GERLACH, S. CORDES (2008). Biegemomentabschätzung des Dornbiegeverfahrens. In: *UTF Science* Nr. 2, 1–8.
- ENGEL, B., B.-U. ZEHNER, C. MATHES, C. KUHNHEN (2014). Development of a benchmark factor to detect wrinkles in bending parts. In: *Proceedings of the Numisheet 2014*, 624–627.
- FEI-CHIN, J., O. OLADIPO (2000). Simulation of Cold Roll Forming of Steel Panels. In: *6th International LS-Dyna Conference*.
- FERREIRA, P. (2016). *Roll Forming- a study on machine deflection by means of experimental analysis and numerical developments*. Portp: University of Porto - Faculty of Engineering.
- FLEHMIG, T., K. BLÜMEL, M. KIBBEN (2001). Thin Walled Steel Tube Pre-Bending for Hydroformed Components: Bending Boundaries and Presentation of a New Mandrel Design. In: *Sae Technical Paper Series*.
- FLEHMIG, T., M. BRÜGGENBROCK, S. SCHWEINECKE (2005). Third Generation of Thyssen Tailored Tubes - A New Category of Tubular Products. In: *Steel - Future for the Automotive Industry*.
- FRANZ, W.-D. (1961). *Das Kalt-Biegen von Rohren*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

- GANTNER, P. (2008). *The Characterisation of the Free-Bending Technique*. Glasgow: Caledonian University.
- GANTNER, P., D. K. HARRISON, A. K. de SILVA, H. BAUER (2007). The Development of a Simulation Model and the Determination of the Die Control Data for the Free-Bending Technique. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* **221.2**, 163–171.
- GANTNER, P., H. BAUER, D. K. HARRISON, A. K. M. DE SILVA (2004). FEA - Simulation of Bending Processes with LS-DYNA. In: *8th International LS-DYNA Users Conference* **2004**.
- GANTNER, P., H. BAUER, D. K. HARRISON, A. K. de SILVA (2005). Free-Bending - A new bending technique in the hydroforming process chain. In: *Journal of Materials Processing Technology* **167.2-3**, 302–308.
- GERLACH, C. (2010). *Ein Beitrag zur Herstellung definierter Freiformbiegegeometrien bei Rohren und Profilen: Zugl.: Siegen, Univ., Diss., 2010. 1*. Forschungsberichte des Lehrstuhls für Umformtechnik, UTS Siegen. Aachen: Shaker.
- GREEN, D. E. (2008). Formability analysis for tubular hydroformed parts. In: *Hydroforming for Advanced Manufacturing*. Elsevier, 93–120.
- GRIMSON, W., T. LOZANO-PEREZ, N. NOBLE, S. J. WHITE (1993). An automatic tube inspection system that finds cylinders in range data. In: *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* **1993**, 446–452.
- GROCHE, P., G. v. BREITENBACH (2008). Roll Forming Strategies for Welded Tubes. In: *Steel Research International* **79.1**, 40–46.
- GROCHE, P., G. v. BREITENBACH, K.-J. MATHES, U. SEMMEL (2016). EFB - Forschungsbericht Nr. 249: Analyse unterschiedlicher Herstellungsverfahren längsnahtgeschweißter Rohre mit Optimierung für das Innenhochdruckumformen. In: *Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V.*
- GROTH, S., B. ENGEL, P. FROHN (2018). Approach to a manufacture-oriented modeling of bent tubes depending on the curvature distribution during three-roll-push-bending. In: *AIP Conference Proceedings* **1960**.
- GROTH, S., B. ENGEL, K. LANGHAMMER (2018). Algorithm for the quantitative description of freeform bend tubes produced by the three-roll-push-bending process. In: *Production Engineering* **12.3-4**, 517–524.
- GUO, X., H. XIONG, Y. XU, A. A. EL-ATY, Y. MA, Y. ZHAO, S. ZHANG (2018). U-R relationship prediction method for aluminum alloy circular tube free-bending process based on sensitivity analysis of material parameters. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **99.5-8**, 1967–1977.
- GUO, X., H. XIONG, Y. XU, Y. MA, A. A. EL-ATY, J. TAO, K. JIN (2018). Free-bending process characteristics and forming process design of copper tubular components. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **96.9-12**, 3585–3601.
- HAGENAH, H., D. VIPAVC, R. PLETTKE, M. MERKLEIN (2010). Numerical Model of Tube Freeform Bending by Three-Roll-Push-Bending. In: *2nd International Conference on Engineering Optimization*.

- HAGENAH, H., D. VIPAVC, P. VATTER, M. COJUTTI, R. PLETTKE (2010). Creation of the Data Base for the Process Design of the Three-Roll-Push Bending Process. In: *7th CIRP int. Conf. Intelligend Computation in Manufacturing Engineering*.
- HARTL, C. (2008). Materials and their characterization for hydroforming. In: *Hydroforming for Advanced Manufacturing*. Elsevier, 77–92.
- HASSAN, H. (2017). *Plasto-Mechanical Model of Tube Bending in Rotary Draw Bending Process*. Aachen: Shaker.
- HEINLE, I. (2012). *Application of evolutionary strategies to industrial forming simulations for the identification and validation of constitutive laws*. [S.l.: s.n.]
- HIELSCHER, C. (2001). *Entwicklung eines Halbzeugprüfverfahrens für das Innenhochdruck-Umformen von Hohlprofilen: Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2000*. 48. Berichte aus Produktion und Umformtechnik. Aachen: Shaker.
- HINKEL, M. (2013). *Prozessfenster für das Spannen von Rohrprofilen beim Rotationszugbiegen unter Berücksichtigung der Tribologie*. Aachen: Shaker.
- HORA, P. (2011). Modellierung des Kaltverfestigungsverhaltens bei metallischen Werkstoffen. In: *Proceedings of the MEFORM 2011, Freiberg*.
- HORA, P., B. HOCHHOLDINGER, A. MUTRUX, L. TONG (2009). Modeling of Anisotropic Hardening Behavior based on Barlat 2000 Yield Locus Description. In: *Proceedings of the 3rd Forming Technology Forum*, 29.
- HOSCHEK, J., D. LASSER (1992). *Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- KANG, W., Y. ZHAO, W. YU, S. WANG, Y. MA, P. YAN (2014). Numerical Simulation and Parameters Analysis for Roll Forming of Martensitic Steel MS980. In: *Procedia Engineering* 81, 251–256.
- KERSTEN, S. (2013). *Prozessmodelle zum Drei-Rollen-Schubbiegen von Rohrprofilen: Zugl.: Siegen, Univ., Diss., 2013*. 2. Forschungsberichte des Lehrstuhls für Umformtechnik, UTS Siegen. Aachen: Shaker.
- KHODAYARI, G. (1993). *Untersuchungen zum elastisch-plastischen Biegen von Stahlprofilen*. Siegen, Univ., Diss.
- KLEPPMANN, W. (2009). *Taschenbuch Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*. [Online-ausg.] Praxisreihe Qualitätswissen. München [u.a.]: Hanser.
- KOC, M. (2008). *Hydroforming for advanced manufacturing*. Woodhead Publishing in materials. Cambridge: Woodhead Pub. and Maney Pub. on behalf of The Institute of Materials Minerals & Mining.
- KUHN, D. (2012). Die hohe Kunst des Freiformbiegens auf Sechs-Achs-Rohrbiegemaschinen. In: *MM Maschinenmarkt - Das Industrie Portal*.
- KÜHNEL, W. (2008). *Kurven - Flächen - Mannigfaltigkeiten*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- LANDGREBE, D., B. DOMES, T. OTTO-ADAMCZAK, M. WERNER, K. SILBERMANN (2015). *Querkraftfreies Freiformbiegen von Rohren: EFB-Forschungsbericht Nr. 408*. Hannover: Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V.

- LEE, J.-s., S.-Y. CHOI, S.-k. LEE, J.-h. SONG, W. NOH, S. CHOI, G.-h. KIM (2018). Roll forming process of automotive seat rail with 980 DP steel using Yoshida-Uemori kinematic hardening model. In: *Procedia Manufacturing* **15**, 796–803.
- LEE, J., D. KIM, L. QUAGLIATO, S. KANG, N. KIM (2017). Change of the yield stress in roll formed ERW pipes considering the Bauschinger effect. In: *Journal of Materials Processing Technology* **244**, 304–313.
- LIU, N., H. YANG, H. LI, S. YAN (2016). Plastic wrinkling prediction in thin-walled part forming process: A review. In: *Chinese Journal of Aeronautics* **29.1**, 1–14.
- LSTC (2014). *LS-Dyna - Theory Manual*.
- LSTC (2016a). *LS-DYNA User's Manual Volume I*.
- LSTC (2016b). *LS-DYNA User's Manual Volume II*.
- MACHERAUCH, E., H.-W. ZOCH (2011). Dynamische Reckalterung. In: *Praktikum in Werkstoffkunde: 91 ausführliche Versuche aus wichtigen Gebieten der Werkstofftechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 186–189.
- MAIER, S. J. (2018). *Inline-Qualitätsprüfung im Presswerk durch intelligente Nachfolgewerkzeuge*. München: TUM University press, Schriftenreihe Umformtechnik und Gießereiwesen.
- MAKER, B. N., X. ZHU (2000). Input Parameters for Metal Forming Simulation using LS-DYNA. In: *6th International LS-Dyna Conference*.
- MAKER, B. N., ZHU XINHAI (2001). Input Parameters for Springback Simulation using LS-DYNA. In: *6th International LS-Dyna Conference*.
- MERKLEIN, M., P. VATTER, R. PLETTKE, M. GRÜNER (2012). Einfluss der Fließkurve auf den Rohrbiegeradius. In: *Werkstattstechnik online* **10**, 689–695.
- MURATA, M., Y. AOKI (1996). Analysis of Circular Tube Bending by MOS Bending Method. In: *5th International Conference on Technology of Plasticity*.
- MURATA, M., T. KATO (2004). CAD and CNC Bending Machine for Circle Tubes. In: *7th International Symposium on Advances in Abrasive Technology*.
- MURATA, M., T. MOCHIZUKI (1997). Effect of approach length on square tube by MOS bending. In: *93rd Conference Japan Institute of Light Metals*.
- MURATA, M., T. MOCHIZUKI (1999). Numerical Calculation of Square Tube Bending by MOS Bending Method. In: *Proceedings of the 6th ICTP*.
- MURATA, M., Y. UEMURA, H. SUZUKI (1990). New Flexible Penetration Bending of Circular Tube. In: *Advanced Technology of Plasticity Vol. 3*.
- NEUGEBAUER, R., DROSSEL, W.-G. BLAU, PETER (2001). 3D-Freiformbiegen von Profilen: HexaBend - ein neuartiges Konzept. In: *ZWF Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* **96**.
- NEUGEBAUER, R. (2007). *Hydro-Umformung*. Berlin: Springer-Verlag.
- OTTO-ADAMCZAK, T., M. HOFFMANN, U. PRIBER (2012). Freiformbiegen mit parallelkinematischer Werkzeugführung. In: *4th International Conference on Accuracy in Forming Technology*.
- PLETTKE, R., P. VATTER, D. VIPAVC (2012). Basics of Process Design for 3D Freeform Bending. In: *Steel Research International*.

- PLETTKE, R., P. VATTER, D. VIPAVC, H. HAGENAH (2010). Investigation on the Process Parameters and Process Window of Three-Roll-Push-Bending. In: *International MATADOR Conference*, 36.
- PRIER, M. (2000). *Die Reibung als Einflußgröße im Innenhochdruck-Umformprozess*. Darmstadt.
- SEBASTIAN GROTH, PETER FROHN, BERND ENGEL (2019). Product planning system for manufacture-oriented modeling of freeform bend tubes produced by three-roll-push-bending. In: *47th SME North American Manufacturing Research Conference*.
- SHEIKH, M. A., R. R. PALAVILAYIL (2006). An assessment of finite element software for application to the roll-forming process. In: *Journal of Materials Processing Technology* **180**.1-3, 221–232.
- SHI, C. F., W. Z. FU, M. Z. LI (2019). Mechanical analysis of flexible bending of tubes. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* **242**, 032055.
- SIEBERTZ, K., D. VAN BEBBER, T. HOCHKIRCHEN (2010). *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*. VDI-Buch. Heidelberg: Springer.
- SIGVANT, M., J. PILTHAMMAR, J. HOL, J. H. WIEBENGA, T. CHEZAN, B. CARLEER, A. H. VAN DEN BOOGAARD (2016). Friction and lubrication modeling in sheet metal forming simulations of a Volvo XC90 inner door. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **159**, 012021.
- ŚLODERBACH, Z. (2014). Generalized model of strains during bending of metal tubes in bending machines. In: *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 1093.
- SORINE, M. (2007). *Formability of advanced high strength steel tubes in tube bending and hydroforming*. University of Waterloo.
- STAHL, D. (2002). *Rundbiegen von Stahlrohrprofilen. Ein Beitrag zur Rückfederungs- und Ovalisierungsprognose unter Anwendung künstlicher neuronaler Netze*. VDI-Verlag.
- STAUPENDAHL, D., S. CHATTI, A. E. TEKKAYA (2016). Closed-loop control concept for kinematic 3D-profile bending. In: *API Conference Proceedings 1769*.
- STOLLE, C., J. REID (2010). Modeling Wire Rope Used in Cable Barrier Systems. In.
- STRANO, M. (2005). Automatic tooling design for rotary draw bending of tubes. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **26**.7-8, 733–740.
- SUTTNER, S., M. ROSENSCHON, M. MERKLEIN (2015). Evaluation of kinematic hardening models for multiple stress reversals under continuous cyclic shearing and multi-step bending. In: *Proceedings of the 10th European LS-Dyna Conference*.
- TUBE FORM SOLUTIONS (2016). *8 Reasons for Tube Wrinkling When Using a Mandrel Tubing Bender*. www.tubeformsolutions.com.
- VALBERG, H. S. (2010). *Applied Metal Forming: Including FEM Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- VATTER, P. (2014). *Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finiten Elemente Methode*. Bamberg: Meisenbach Verlag.
- VATTER, P., R. PLETTKE (2013). Geometrical variations of tubes and their impact on freeform bending processes. In: *Advanced Materials Research* **769**, 181–188.

- VIPA VC, D. (2018). *Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen*. Erlangen: FAU University Press.
- VIPA VC, D., R. PLETTKE (2011). Influence factor of the three-roll-push-bending. In: *1st International Tube and Profile Bending Conference / 4th DORP 2011-Dortmunder Kolloquium zum Rohr- und Profilbiegen*.
- VOLLERTSEN, F., A. SPRENGER, J. KRAUS, H. ARNET (1999). Extrusion, channel, and profile bending: a review. In: *Journal of Materials Processing Technology* **87.1-3**, 1–27.
- WAGNER, M. (2017). *Lineare und nichtlineare FEM*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- WEI, W., H. WANG, H. XIONG, X. CHENG, J. TAO, X. GUO (2019). Research on influencing factors and laws of free-bending forming limit of tube. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **28.2**, 298.
- WENDT, A., M. DELKER, J. SPOERER, H. REUTER, S. GILLMAIER (2005). IHU bei der BMW Group im Spannungsfeld von Wirtschaftlichkeit, Innovation und Prozessexzellenz. In: *Hydroumformung von Rohren, Stangpressprofilen und Blechen - Band 4*.
- WERNER, M., D. MAIER, S. VITZTHUM, C. INTRA, W. VOLK (2019). Validation of numerical simulations for the reduced freeform bending process using a test bench. In: *Proceedings of the 9th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP)*.
- WITOWSKI, K. (2019). Robustness Analysis with LS-OPT®. In.
- WONG, S. V., A. HAMOUDA, M. HASHMI (2002). Development of Revolute-Joint Element with Rotation Limits, Locking, Resistive Moment and Damping. In: *Engineering with Computers* **18.1**, 1–13.
- ZHOU, Y., P. LI, M. LI, L. WANG (2017). Application and correction of L-shaped thin-wall aluminum in flexible-bending processing. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **92.1-4**, 981–988.

D Normenverzeichnis

BMW GROUP STANDARD GS 93032-2 (2017-01). *Stähle für Karosseriebau - Tiefziehstähle*. München: BMW AG Normung.

BMW GROUP STANDARD GS 93032-7 (2019-04). *Stähle für Karosseriebau - Dualphasenstähle*. München: BMW AG Normung.

BMW GROUP STANDARD GS 93033 (2019-06). *Aluminiumblechwerkstoffe für Karosserie und Fahrwerk - Flacherzeugnisse*. München: BMW AG Normung.

BMW GROUP STANDARD GS 93040 (2016-06). *Rohre für das Innenhochdruckumformen*. München: BMW AG Normung.

DIN 10305 (2010). *Präzisionsstahlrohre - Technische Lieferbedingungen: Teil 1: Nahtlos kaltgezogene Rohre*. Berlin: Breuth Verlag.

DIN 50125 (2009-07). *Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben*. Berlin: Breuth Verlag.

DIN 66025 (1983-01). *Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen*. Berlin: Breuth Verlag.

DIN 8586 (2003-09). *Fertigungsverfahren Biegeumformen*. Berlin: Breuth Verlag.

DIN EN 573-3:2019-10 (2019). *Aluminium und Aluminiumlegierungen_ - Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug_ - Teil_3: Chemische Zusammensetzung und Erzeugnisformen; Deutsche Fassung EN_573-3:2019*. In.

DIN EN ISO 10360-12:2018-02 (2018). *Geometrische Produktspezifikation_(GPS)_ - Annahme- und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmesssysteme_(KMS)_ - Teil_12: Gelenkarm-Koordinatenmessgeräte_(KMG) (ISO_10360-12:2016); Deutsche Fassung EN_ISO_10360-12:2016*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN EN ISO 16808:2014-11 (2014). *Metallische Werkstoffe_ - Blech und Band_ - Bestimmung der biaxialen Spannung/Dehnung-Kurve durch einen hydraulischen Tiefungsversuch mit optischen Messsystemen (ISO_16808:2014); Deutsche Fassung EN_ISO_16808:2014*. In.

DIN EN ISO 6892-1 (2009-12). *Metallische Werkstoffe – Zugversuch: Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 6892-1:2009*. Berlin: Breuth Verlag.

DIN EN ISO 8492 (2014-03). *Metallische Werkstoffe - Rohr - Ringfaltversuch*. Berlin: Breuth Verlag.

DIN EN ISO 8493 (2004-10). *Metallische Werkstoffe - Rohr - Aufweitversuch*. Berlin: Breuth Verlag.

DIN ISO 22514-2 (2019). *Statistische Verfahren im Prozessmanagement – Fähigkeit und Leistung – Teil 2: Prozessleistungs- und Prozessfähigkeitskenngrößen von zeitabhängigen Prozessmodellen*. Berlin: Breuth Verlag.

VDI-RICHTLINIE 3430 (2014-06). *Rotationszugbiegen von Profilen*. Berlin: Breuth Verlag.

VDI-RICHTLINIE 3431 (2016-08). *Biegen von Profilen - Prüflinweise für Profilbiegebauteile*. Berlin: Breuth Verlag.

E Studienarbeiten

Folgende Studienarbeiten, deren Bearbeitung, Auswertung, Interpretation und Darstellung von Ergebnissen unter wissenschaftlicher Anleitung und gemeinsam mit Nikolas Beulich entstanden sind, wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit bei der BMW Group am Standort Dingolfing angefertigt. Ergebnisse flossen zum Teil mit in die Arbeit ein.

MERTENS, R. (2018). *Materialcharakterisierung von Präzisionsrohren für die Simulation des Innenhochdruckumformens*. Hochschule Niederrhein, Master's Thesis.

PETRI, D. (2018). *Methodik zur Erzeugung von NC-Codes für Freiformbiegeprozesse mittels nicht-linearer Optimierung*. Hochschule Esslingen, Master's Thesis.

RISKIN, R. (2018). *Investigation of Friction Behaviour in Tube Hydroforming*. Technische Universität München, Master's Thesis.