

Testumgebung für Prozessregelungen
zum Drei-Rollen-Profilbiegen mit
virtuellem und realem Biegeprozess

Von der Fakultät Maschinenbau der
Technischen Universität Dortmund
zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

von
Dipl.-Inform. Uwe Dirksen
aus
Oldenburg
2008

Berichter: Prof. Dr.-Ing. M. Kleiner
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. W. Homberg
Prof. Dr.-Ing. A. E. Tekkaya

Tag der mündlichen Prüfung: 8. Juli 2008

Dortmunder Umformtechnik

Uwe Dirksen

**Testumgebung für Prozessregelungen
zum Drei-Rollen-Profilbiegen mit virtuellem
und realem Biegeprozess**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2008

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2008

Copyright Shaker Verlag 2008

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7673-7

ISSN 1619-6317

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik und Leichtbau der Technischen Universität Dortmund. Herrn Professor Dr.-Ing. Matthias Kleiner und Herrn Professor Dr.-Ing. A. Erman Tekkaya, den Institutsleitern, möchte ich an dieser Stelle sehr herzlich für ihre hilfsbereite Förderung und ihre wertvollen Anregungen danken. Sie waren eine wichtige Voraussetzung für den Abschluss dieser Arbeit. Des Weiteren möchte ich Herrn Professor Dr.-Ing. Werner Homberg für die Übernahme des Korreferates herzlichst danken.

Mein Dank gebührt darüber hinaus auch allen Mitarbeitern des Instituts, den studentischen Hilfskräften, meinen Studienarbeitern und Freunden, die durch ihre rege Anteilnahme und Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Insbesondere möchte ich mich bei Frau Dr. Charlotte Beerwald, Herrn Matthias Hermes, Herrn Dr. Alexander Brosius, Herrn Moritz Beerwald, Herrn Andres Weinrich, Herrn Hossein Karbasian, Herrn Robert Wagner, Herrn Dr. Sami Chatti, Herrn Andreas Herdt, Herrn Ulrich Wornalkiewicz, Herrn Dirk Hoffmann, Herrn Werner Feurer, Herrn Peter Runte und Herrn Frank Volk für die freundschaftliche Zusammenarbeit, ihre Hilfsbereitschaft, die konstruktive Kritik und vor allem die fachlichen Diskussionen bedanken. Mein Dank gilt auch Frau Beate Ulm-Brandt für ihre wertvolle Hilfe bei der Korrektur dieser Arbeit hinsichtlich der deutschen Sprache.

Dortmund, im September 2008

Uwe Dirksen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Kenntnisse	3
2.1	Profilbiegeverfahren und Drei-Rollen-Biegen	3
2.2	Profilhalbzeuge	9
2.3	Prozesssimulationen	15
2.4	Prozessregelungen	20
2.5	Testumgebungen	28
3	Zielsetzung der Arbeit	31
4	Schwankungen von Halbzeugeigenschaften	35
5	Trobec-Testumgebung	43
5.1	Anforderungen an die Testumgebung	43
5.2	Module der Testumgebung	48
5.3	Closed-Loop Control Framework (CLCF)	50
5.4	Prozesssimulationssystem PROFI-V2	53
5.5	Virtueller Biegeprozess	64
5.6	Testumgebung mit Three-Roll-Bending Control	70

6	Prozessregelungen	75
6.1	Anforderungen und Randbedingungen	75
6.2	Prozessregelung TRB	77
7	Versuchsaufbau und Experimente	89
7.1	Versuchsaufbau	90
7.2	Drei-Rollen-Biegemaschine Roundo R2S spezial	92
7.3	Profileinzugssensor	94
7.4	Krümmungssensor	96
7.5	Messung des Biegemoments	111
7.6	Experimentelle Untersuchung	113
8	Zusammenfassung und Ausblick	119
	Literaturverzeichnis	123
A	Daten der untersuchten Profilhalbzeuge	139
A.1	Kurze Proben der Profilhalbzeuge	139
A.2	Positionen der entnommenen Flachzugproben	140
A.3	Messorte der Eigenspannungsmessungen	141
A.4	Messorte zur Bestimmung der Profildicke/Wandstärke	142
A.5	Messorte zur Bestimmung der Verwindung	142
B	Trobec-Testumgebung	145
B.1	Benutzungsoberfläche	145
B.2	Datendatei	145
B.3	Ausgabedaten	153

Zeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
a	m/s^2	Beschleunigung
a_0	mm	Abstand zwischen Eingangs- und Mittelrolle
A	$\begin{pmatrix} \text{mm} \\ \text{mm} \end{pmatrix}$	2D-Punkt, ab dem ein Biegemoment an der Eingangsrolle auf das Profil einwirkt
A_P	mm^2	Profilquerschnitt
A_1	$\begin{pmatrix} \text{mm} \\ \text{mm} \end{pmatrix}$	Kontaktpunkt (2D) des Profils mit der Eingangsrolle
b_s	mm	Breite eines ebenen Segments bei der virtuellen Biegelinie
b_0	mm	Abstand zwischen Mittel- und Ausgangsrolle
B	$\begin{pmatrix} \text{mm} \\ \text{mm} \end{pmatrix}$	Punkt (2D) mit Biegemomentmaximum
B_L	-	sichtbare Biegelinie des Profils in der Umformzone
B_1	$\begin{pmatrix} \text{mm} \\ \text{mm} \end{pmatrix}$	Kontaktpunkt (2D) des Profils mit der Mittelrolle
C	$\begin{pmatrix} \text{mm} \\ \text{mm} \end{pmatrix}$	Punkt (2D), ab dem das Biegemoment an der Ausgangsrolle auf das Profil 0 wird
C_1	$\begin{pmatrix} \text{mm} \\ \text{mm} \end{pmatrix}$	Kontaktpunkt (2D) des Profils mit der Ausgangsrolle
C_N	MPa	Fließkurvenkonstante (Nadai-Approx.)
C_S	MPa	Fließkurvenkonstante (Swift-Approx.)
d	-	Dämpfungsfaktor
d_C	mm	Profileinzug
d_M	mm	Verfahrweg der Mittelrolle
d_s	mm	Sicherheitsabstand bei Regler TRB
d_Z	mm	Rollenzustellung
d_{Z_i}	mm	Ist-Rollenzustellung
d_{Z_s}	mm	Soll-Rollenzustellung
F_E	N	Biegekraft an der Eingangsrolle
F_B	N	Biegekraft an der Mittelrolle
F_{B_s}	N	Sollbiegekraft an der Mittelrolle

Zeichen	Einheit	Beschreibung
\bar{F}_{Bm}	N	Gemessene Biegekraft an der Mittelrolle
F_A	N	Biegekraft an der Ausgangsrolle
H_1	mm	Position der neutralen Faser in der Profilhöhe
I_x	mm ⁴	Flächenträgheitsmoment um die x-Achse
I_{xy}	mm ⁴	Flächendeviationsmoment im xy-System
I_y	mm ⁴	Flächenträgheitsmoment um die y-Achse
k	1/m	Krümmung
k_f	MPa	Fliekspannung
k'_1	1/mm	Krümmungserhöhung von Segmenten der Eingangsbiegeline mit Bezug zu k_1
k_1	1/mm	Ausgangsprofilkrümmung
$k_1(x_{En})$	1/mm	Krümmung des n-ten Segments der Eingangsbiegeline
k_2	1/mm	Profilkrümmung unter Last
$k_{2,n}$	1/mm	Belastete Profilkrümmung in Iteration n
k_{2k}	1/mm	Korrigierte Soll-Profilkrümmung unter Last
k_{2m}	1/mm	Gemessene Profilkrümmung unter Last
k'_2	1/mm	Notwendige Krümmungserhöhung an der Mittelrolle
k_{2p}	1/mm	Prognostizierte Profilkrümmung unter Last
k_3	1/mm	Entlastete Profilkrümmung, Soll-Profilkrümmung
Δk_{3a}	1/mm	Aufbereitete Radienabweichung
$k_{3,n}$	1/mm	Entlastete Profilkrümmung in Iteration n
k_{3m}	1/mm	Gemessene entlastete Profilkrümmung
Δk_{3m}	1/mm	Abweichung vom entlasteten Ist- und Soll-Profilradius
k_{3p}	1/mm	Prognostizierte entlastete Profilkrümmung
$k_3(x_{An})$	1/mm	Krümmung des n-ten Segments der Ausgangsbiegeline
Δk	1/mm	Elastische Rückfederung
Δk_p	1/mm	Prognostizierte elastische Rückfederung
l	mm	Länge des Fahrwegs des Krümmungssensors mit Lasertriangulationssensor
l_p	mm	Länge zur Mittelwertberechnung des entlasteten Profilradius
m	mm	Abstand eines Stützpunkts zum Kreismittelpunkt

Zeichen	Einheit	Beschreibung
M_B	Nmm	Biegemoment
$M_{B_{el}}$	Nmm	Elastischer Anteil des Biegemoments
$M_{B_{max}}$	Nmm	Maximales Biegemoment
M_{Sni}	Nmm	Biegemoment am i-ten Segment der Biegelinie in der n-ten Iteration
M_2	Nmm	Biegemoment am Kontaktpunkt des Profils mit der Mittelrolle
M'_2	Nmm	Biegemoment zur Erzeugung der Krümmung k'_2 an der Mittelrolle
n_N	-	Verfestigungsexponent (Nadai-Approx.)
n_S	-	Verfestigungsexponent (Swift-Approx.)
$P_{An,1}$	$\begin{pmatrix} \text{mm} \\ \text{mm} \end{pmatrix}$	Anschlusspunkt (2D) des n-ten Segments der Ausgangsbiegelinie
$P_{An,2}$	$\begin{pmatrix} \text{mm} \\ \text{mm} \end{pmatrix}$	innerer Anschlusspunkt (2D) des n-ten Segments der Ausgangsbiegelinie
$P'_{An,1}$	$\begin{pmatrix} \text{mm} \\ \text{mm} \end{pmatrix}$	Anschlusspunkt (2D) der Ausgangsbiegelinie des n-ten Segments
$P'_{En,2}$	$\begin{pmatrix} \text{mm} \\ \text{mm} \end{pmatrix}$	Anschlusspunkt (2D) der Eingangsbiegelinie des n-ten Segments
$P_{En,1}$	$\begin{pmatrix} \text{mm} \\ \text{mm} \end{pmatrix}$	innerer Anschlusspunkt (2D) des n-ten Segments der Eingangsbiegelinie
$P_{En,2}$	$\begin{pmatrix} \text{mm} \\ \text{mm} \end{pmatrix}$	Anschlusspunkt (2D) des n-ten Segments der Eingangsbiegelinie
$P_{En,2}(x)$	mm	x-Koordinate des Anschlusspunkts des n-ten Segments der Eingangsbiegelinie
$P'_{0,1}$	$\begin{pmatrix} \text{mm} \\ \text{mm} \end{pmatrix}$	Anschlusspunkt (2D) der Ausgangsbiegelinie beim Startsegment
$P'_{0,2}$	$\begin{pmatrix} \text{mm} \\ \text{mm} \end{pmatrix}$	Anschlusspunkt (2D) der Eingangsbiegelinie beim Startsegment
$P_1, P_2,$	-	Polygone zur Beschreibung eines Profilquerschnitts
P_3		
$P_1, P_2,$	$\begin{pmatrix} \text{mm} \\ \text{mm} \end{pmatrix}$	Punkte (2D) auf dem Segment der virtuellen Biegelinie
P_3		
r	mm	Radius
$R_E, R_B,$	mm	Radien der Eingangs-, Biege- und Ausgangsrolle
R_A		
$Seg_{A1},$	-	erstes bzw. n-tes Segment der Ausgangsbiegelinie
Seg_{An}		

Zeichen	Einheit	Beschreibung
Seg_{E1} ,	-	erstes bzw. n-tes Segment der Eingangsbiegeline
Seg_{En}		
v_C	mm/s	Profileinzugsgeschwindigkeit
v	m/s	Endgeschwindigkeit des Krümmungssensors mit Lasertriangulationssensor
v_{ER}	Grad/s	Winkelgeschwindigkeit der Eingangsrolle
v_{BR}	Grad/s	Winkelgeschwindigkeit der Biegerolle
v_{AR}	Grad/s	Winkelgeschwindigkeit der Ausgangsrolle
W_y	N/mm ³	Biege widerstand bei y-Achse als Biegeachse
Δx	mm	Abstand zwischen zwei Stützpunkten
x_{An}	mm	x-Abstand des n-ten Segments der Ausgangsbiegeline zum Ursprung
x_{En}	mm	x-Abstand des n-ten Segments der Eingangsbiegeline zum Ursprung
Δy_G	mm	maximal erlaubte Distanzdifferenz zwischen zwei Stützpunkten beim Krümmungssensor
Δy	mm	Differenz zur optimalen Stellgröße bzw. maximale Höhendifferenz zwischen zwei Stützpunkten der Profilkontur
α_{A1} ,	Grad	Segmentwinkel des ersten bzw. n-ten Segments der Ausgangsbiegeline
α_{An}		
α_{E1} ,	Grad	Segmentwinkel des ersten bzw. n-ten Segments der Eingangsbiegeline
α_{En}		
α_0	Grad	Segmentwinkel des Startsegments
β_1	Grad	Kontaktwinkel des Profils mit der Eingangsrolle
β_2	Grad	Kontaktwinkel des Profils mit der Mittelrolle
β_3	Grad	Kontaktwinkel des Profils mit der Ausgangsrolle
ϵ	-	Dehnung
ϵ_l	-	Dehnung in Längsrichtung
γ_A, γ_{A0}	Grad	Anschlusswinkel am Startsegment für Ausgangsbiegeline
γ_{An}	Grad	Anschlusswinkel am n-ten Segment der Ausgangsbiegeline
γ_E, γ_{E0}	Grad	Anschlusswinkel am Startsegment für Eingangsbiegeline

Zeichen	Einheit	Beschreibung
γ_{En}	Grad	Anschlusswinkel am n-ten Segment der Eingangsbiegeline
φ	-	Umformgrad
φ_{Cs}	-	Umformgradkoeffizient (Swift-Approx.)
σ_r	MPa	Radialspannung
σ_{Θ}	MPa	Tangentialspannung
ρ	1/mm	Krümmung

Abkürzungen

Akronym	Bedeutung
AD	Analog-Digital
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CAN	Controller Area Network
CCD	Charged Coupled Device
CLCF	Closed-Loop Control Framework
CNC	Computer-Numerical-Control
DA	Digital-Analog
FEA	Finite-Element-Analyse
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FEM	Finite-Element-Methode
HMI	Human-Machine-Interface
IUL	Institut für Umformtechnik und Leichtbau
KNN	Künstliches neuronales Netzwerk
MLP	Multilayer-Perzeptron
MVC	Model-View-Controller
PDG	Process-Data-Generator
PROFI	Profile-Bending-Simulation
PROFI-V2	Profile-Bending-Simulation Version 2
PSD	Position Sensitive Detector
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TRB	Tailor-Rolled Blank
Trobec	Three-Roll-Bending Control
TRT	Tailor-Rolled Tube

Kapitel 1

Einleitung

In der DIN 8580 wird Umformen definiert als „Fertigen durch bildsames (plastisches) Ändern der Form eines festen Körpers; dabei werden sowohl die Masse als auch der Zusammenhalt beibehalten“ [1]. Soll durch Umformung eine genaue Zielgeometrie hergestellt werden, verlangt die gezielte plastische Formgebung des Halbzeugs eine genaue Kenntnis der Werkstoffkennwerte, wie z.B. das E-Modul oder die Streckgrenze und das Verfestigungsverhalten. Diese sind jedoch vor dem Fertigungsprozess nicht genau bekannt, und sie sind zwischen Chargen und innerhalb eines Halbzeugs auch nicht homogen. Bei Walzchargen der Warmbandgüte STW-24 besitzt beispielsweise die Dehngrenze $R_{p0.2}$ zwischen einzelnen Chargen bei einem zulässigen Wert von $R_{p0.2} = 320$ MPa eine Streubreite von ± 75 MPa [2]. Teilweise kann durch eine geeignete Wahl des Umformverfahrens eine Minimierung der Auswirkung der Schwankungen beim Werkstoffverhalten, wie z.B. der Rückfederung, erzielt werden. So wird beim Streckbiegen von Profilen durch die Streckkraft die mittlere Faser in den ehemaligen Druckbereich verschoben, wodurch die Außenfasern mehr gestreckt werden und früher den plastischen Bereich erreichen. Diese Veränderung der Spannungsverteilung im Profil führt zu einer verminderten Rückfederung des entlasteten Profils [3], siehe Bild 1.1. Da dieses Profilbiegeverfahren jedoch zu den formgebundenen Verfahren gehört, ergeben sich hohe Werkzeugkosten, die einem Einsatz bei kleinen Losgrößen im Wege stehen. Deshalb eignen sich aufgrund der günstigeren Verfahrenskosten bei kleinen Losgrößen Profilbiegeverfahren, die die Realisierung der kinematische Gestalterzeugung erlauben. Bei ihnen wird die erzielte Profilkrümmung allein durch die relative Zustellung der Werkzeuge zueinander bestimmt. Die zunehmende Relevanz von derartig flexiblen Profilbiegeverfahren folgt beispielsweise aus der Reaktion der Industrie auf die sich ändernden Kunden-

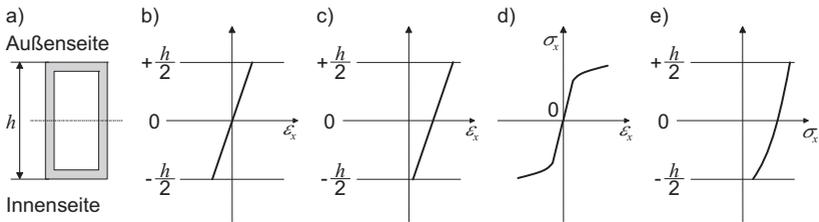


Abbildung 1.1: Einfluss der Streckkraft auf die Spannungsverteilung beim Streckbiegen a) Profilquerschnitt b) Dehnungsverlauf ohne Streckkraft c) Dehnungsverlauf mit Streckkraft; der Spannungs-Dehnungs-Verlauf in d) führt zum Spannungsverlauf mit Streckkraft in e)

wünsche in den letzten Jahren. Die Kundenorientierung und somit die Vielfalt der Produkte ist deutlich gestiegen, während die Produktlebenszeiten und die erzielbaren Preise gesunken sind [4]. Zieht man zusätzlich die zunehmende Produktkomplexität und die daraus gestiegenen Anforderungen an die Qualität der zugehörigen Produktbestandteile hinzu, so wird deutlich, dass die Anforderungen an heutige Umformverfahren neben Flexibilität auch Prozessstabilität beinhalten.

Hinsichtlich der Flexibilität wird das Drei-Rollen-Biegen, das den Verfahren mit kinematischer Gestaltzerzeugung angehört, den Anforderungen gerecht. Es ein in der Industrie oft eingesetztes Profilbiegeverfahren, dessen Flexibilität zusätzlich dadurch erhöht wird, dass ein Rollensatz oftmals für verschiedene Profilquerschnitte eingesetzt werden kann. Problematisch gestaltet sich bei diesem Verfahren jedoch die Prozessstabilität. Die Schwankungen bei den geometrischen Abmessungen und bei den Werkstoffeigenschaften bedingen oft einen erhöhten personellen Einsatz bei der Fertigung, um durch manuelle Eingriffe in die Fertigung eine hinreichende Qualität zu erzielen.

In Anbetracht der vorgestellten Problematik wird in der vorliegenden Arbeit eine Testumgebung zur Untersuchung von Prozessregelungen vorgestellt, entwickelt und mit ihr verschiedene Prozessregelungen für das flexible Profilbiegeverfahren Drei-Rollen-Biegen untersucht. Die Testumgebung ermöglicht dabei die Untersuchung der Prozessregelungen sowohl am realen als auch an einem virtuellen Biegeprozess.

Kapitel 2

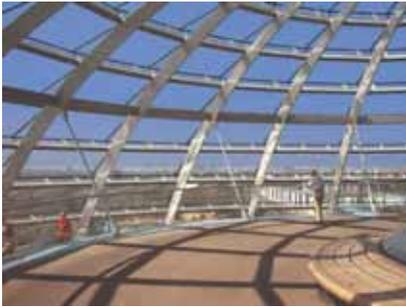
Stand der Kenntnisse

In diesem Kapitel wird ein Überblick über Profilbiegeverfahren mit Schwerpunkt auf dem Drei-Rollen-Biegen gegeben, wobei auch die Anforderungen an gebogene Profile vorgestellt werden. Im Anschluss werden die unterschiedlichen Arten von Profilhalbzeugen, die beim Drei-Rollen-Biegen zum Einsatz kommen, beschrieben, wobei auch auf zulässige Schwankungen von qualitativen Halbzeugeigenschaften wie z.B. Maßgenauigkeit eingegangen wird. Des Weiteren wird die Notwendigkeit der vorliegenden Arbeit durch Vorstellung von realisierten Prozessregelungen für das Drei-Rollen-Biegen, Systeme zum Aufbau von Testumgebungen und dafür notwendige Komponenten wie z.B. Prozesssimulationen dargelegt.

2.1 Profilbiegeverfahren und Drei-Rollen-Biegen

Das Anwendungsgebiet gekrümmter Profile ist sehr breit gefächert. Sie werden beispielsweise im Gebäudebau und dessen Innenausstattung, bei Rohrsystemen, bei Schienen- und Förderanlagen und in Verkehrssystemen eingesetzt. Im Gebäudebau werden gekrümmte Profile oftmals zur Herstellung von runden oder auch geschwungenen Dachstrukturen verwendet, Bild 2.1. Eine innovative Anwendung zeigt die Gateshead Millennium Bridge über den Fluss Tyne bei Newcastle, Großbritannien. Sie ist eine Kippbrücke, deren Profilbogen zum einen die Fahrbahn durch Tragseile trägt, zum anderen aber auch beim Kippen der Brücke um deren Längsachse als Gegengewicht zur Fahrbahn fungiert. Auf diese Weise muss für die Kippbewegung der Brücke relativ wenig Energie eingesetzt werden.

Insbesondere bei Verkehrssystemen werden Profile und darunter auch gekrümmte Profile



Reichstag (Citysam AG, Berlin)



Gateshead Millennium Bridge, UK

Abbildung 2.1: Brücken- und Dachkonstruktionen mit gebogenen Profilen

vermehrt eingesetzt. Nach Chatti [5] gibt es aktuell kein Verkehrssystem, das keine Profile einsetzt. Begründet wird dies vornehmlich mit dem Zwang, bei Verkehrssystemen den Leichtbauelementen konsequent umzusetzen und auf diese Weise die Energieressourcen sparsam einzusetzen.



Audi R8 (Audi)

ICE 3
(Adtranz)

Airbus A380 (Airbus S.A.S.)



Abbildung 2.2: Realisierung von Leichtbau in Transportsystemen durch Anwendung von gebogenen Profilen

Bild 2.2 zeigt Anwendungsbeispiele der wichtigsten Verkehrssysteme. Die Karosserie des Audi R8 verwendet die Space-Frame-Technologie und besteht zu 70 % aus Strangpressprofilen, zu 22 % aus Blechteilen und zu 8 % aus Vakuum-Gussknoten [6]. Die Space-Frame-Technologie

und darin der Einsatz von Profilen hat viele Vorteile [7, 8], wovon die wichtigsten sind:

- Stranggepresste Aluminiumprofile bieten eine große Entwurfsfreiheit des Profilquerschnitts.
- In den Profilquerschnitt können Funktionseinheiten integriert werden.
- Die Wandstärken der Profile können an den jeweiligen Lastfall angepasst werden.
- Profile können Energie aufnehmen, sodass das Crashverhalten verbessert wird.

Die genannten Vorteile begründen auch den Einsatz von Profilen im Schienenfahrzeugbau, z.B. der ICE 3, und insbesondere im Flugzeugbau, wie beispielsweise das neue Großraumflugzeug Airbus A380.

Betrachtet man das breite Anwendungsgebiet von gekrümmten Profilen, so werden sie ohne weitere Bearbeitung eingesetzt, oder sie dienen als Halbzeuge und durchlaufen wie beispielsweise beim Innenhochdruckumformen noch eine Kalibrierungsstufe. Insgesamt ergibt sich für die einzusetzenden Profilbiegeverfahren eine Reihe von Merkmalen und Anforderungen [5, 9, 10]:

- Merkmale
 - hohe Profile und kleine Radien bedingen große Randdehnungen, die u.a. zu Rissbildung und unerwünschten Querschnittsdeformationen führen können;
 - die Halbzeuge unterliegen einer relativ großen Streuung der geometrischen Abmessungen und der Festigkeitseigenschaften (siehe Abschnitt 2.2.1 und Kapitel 4), wodurch bspw. das zeiteffiziente genaue Biegen einer Zielkontur bei Verfahren mit kinematischer Gestalterzeugung ohne Prozessregelung erschwert wird;
 - vielfältige und teilweise sehr komplexe Profilquerschnittsformen (durch Funktionsintegration, siehe auch Bild 2.5) bedingen oftmals Sonderwerkzeuge für jedes einzelne Profil;
- Anforderungen
 - wiederholbare und hohe Konturgenauigkeiten, insbesondere hinsichtlich der Montage von biegesteifen und zum Teil langen Profilen;
 - minimale Oberflächenbeschädigungen insbesondere bei Sichtbauteilen;

- möglichst wenig Eigenspannungen, da ansonsten bspw. eine spanende Bearbeitung in einem nachgeschalteten Fertigungsschritt zu elastischen Verformungen führen kann;
- bei der Halbzeugherstellung für weitere umformende Fertigungsverfahren muss ausreichendes weiteres Umformvermögen vorhanden sein, beim Innenhochdruckumformen sind unter anderem konstante Wandstärken wichtig

Aus den genannten Merkmalen resultiert, dass die Umsetzung eines entworfenen gekrümmten Profils viel Know-how verlangt. Ausgehend von dem Profilentwurf muss ein passendes Profilbiegeverfahren ausgewählt und die notwendigen Werkzeuge entworfen werden. Des Weiteren müssen die erforderlichen Maschinenparameter bestimmt werden, wobei dies in der Praxis oft mittels der Durchführung von Versuchsreihen erfolgt. Um den Anforderungen gerecht zu werden, wurde eine Reihe von Profilbiegeverfahren entwickelt, die jeweils für ein eingeschränktes Profilspektrum besonders geeignet sind. Während nach DIN 8582 [11] die Umformverfahren nach den wirksamen Spannungsverhältnissen untergliedert werden, hat sich für die Profilbiegeverfahren eine Unterteilung in zwei Verfahrensgruppen etabliert [5, 10, 13]. Wichtige Ver-

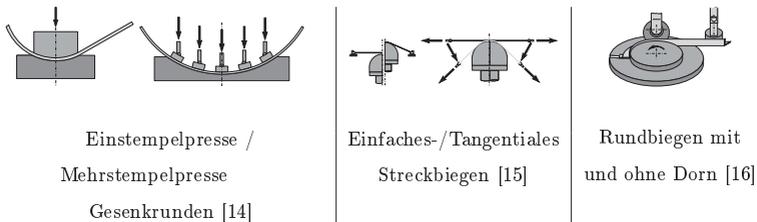


Tabelle 2.1: Verfahrensgruppe: Gestalterzeugung mittels formgebender Werkzeuge [5]

treter der Verfahrensgruppe „Gestalterzeugung mittels formgebender Werkzeuge“, Tabelle 2.1, sind das Gesenkrunden, das Streckbiegen und das Rundbiegen. Diese Verfahren zeichnen sich durch eine gute Führung des Profils während des Umformprozesses aus, sodass beispielsweise Querschnittsdeformationen minimiert werden können. Da die Biegekontur durch das Werkzeug vorgegeben wird, muss bei der Werkzeuggestaltung die Rückfederung berücksichtigt werden. Dies ist problematisch, da die Rückfederung zwischen den Chargen, aber auch innerhalb einer Charge schwankt und somit eine genaue Fertigung oftmals eine Nachbearbeitung verlangt. Des Weiteren wird für jede Kontur ein eigener Werkzeugsatz benötigt, sodass die Investitionskosten bei diesen Verfahren relativ hoch sind.

Zur Verfahrensgruppe „Kinematische Gestalterzeugung“, Tabelle 2.2, werden alle Verfahren

gerechnet, bei denen die Umformung durch die relative Zustellung der Werkzeuge zueinander und zum Profil beeinflusst werden. Eine Ausnahme stellt hier das Biegen mittels Laserstrahlung dar, bei dem die Umformung durch thermisch induzierte Spannungen erfolgt. Gemeinsam ist diesen Verfahren eine größere Flexibilität als bei denen der ersten Verfahrensgruppe. Die zu erzielende Profilform und -länge kann prinzipbedingt in einem weiten Bereich variiert werden.

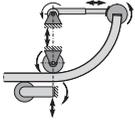
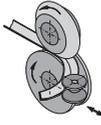
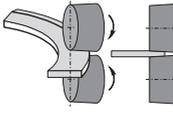
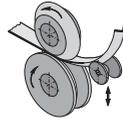
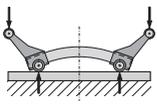
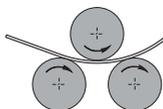
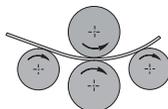
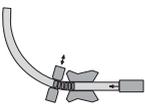
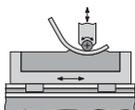
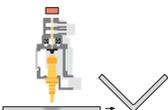
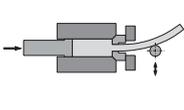
 <p>Biegen mit geregeltem Biegemoment [17]</p>	 <p>Walzbiegen mit überlagerter Druckspannung [18, 19]</p>	 <p>Krümmen durch partielles Auswalzen [20]</p>	 <p>Walzprofilieren mit gleichzeitiger Biegung [21]</p>
 <p>Querkraftfreies Biegen</p>	 <p>Zwei-Rollen- Biegen [22, 23]</p>	 <p>Drei-Rollen- Biegen [24–26]</p>	 <p>Vier-Rollen- Biegen [15]</p>
 <p>Druckbiegen mit beweglicher Matrize [27, 28]</p>	 <p>Biegen mit elastischer Matrize [10, 29]</p>	 <p>Biegen mittels Laserstrahlung [30–32]</p>	 <p>Runden beim Strangpressen [9, 33, 34]</p>

Tabelle 2.2: Verfahrensgruppe: Kinematische Gestalterzeugung [5, 35]

In Konkurrenz zu den o.g. Profilbiegeverfahren steht das „Runden beim Strangpressen“, bei dem das Werkstück direkt beim Strangpressen gerundet wird. Dies wird erreicht, indem ein geregelt verfahrbares Führungswerkzeug kurz hinter dem Matrizenaustritt eine Kraft quer zur Längsachse auf das Werkstück aufbringt [9, 33, 36, 37]. Dadurch wird die Austrittsgeschwin-

digkeit des Werkstoffs in der Stranginnen- und -außenseite variiert und das Profil verlässt die Presse gerundet. Da das Runden kein Biegevorgang ist, ergeben sich ihm gegenüber einige Vorteile, wie ein unvermindertes Umformvermögen der Profile, geringere Querschnittsdeformationen und geringere Eigenspannungen. Darüber hinaus können beim Runden sowohl konkave als auch konvexe Profilkonturen erzeugt werden, die beim Biegen ein Drehen des Profils oder einen Werkzeugwechsel erfordern. Als Einschränkung steht dem gegenüber, dass die Profile mit den verfügbaren Maschinenkonzepten nur bis zu einem Mindestradius von ca. 500 mm gerundet werden können, bei dem noch keine Kollision mit dem Strangpressenmaul auftritt. Dieses Verfahren ist daher nicht zur Fertigung von kleinen bis sehr kleinen Profiltradien geeignet und kann in diesen Fällen trotz seiner vielen Vorteile das Profilbiegen nicht ersetzen. Des Weiteren können auch nur Werkstoffe verwendet werden, die gut strangpressbar sind.

Bei den aufgeführten Profilbiegeverfahren treten nahezu die gleichen Fehlerfälle und Genauigkeitsprobleme auf. In einem Überblicksartikel haben Vollertsen et al. [29] diese für Profilbiegeverfahren für strangpresste Halbzeuge zusammengestellt, Tabelle 2.3, wobei sie aber auch für Profilhalbzeuge Gültigkeit haben, die mit anderen Fertigungsverfahren hergestellt werden.

Fehlerfälle	Genauigkeit
Faltenbildung bei den Profilwänden	lokale Schwankungen bei der Krümmung
Einknicken im Druckbereich	Abweichung bei der Kontur
Rissbildung im Zugbereich	Querschnittsdeformation
große Querschnittsdeformationen	Torsion (bei asymmetrischen Profilverquerschnitten oder Biegungen von symmetrischen Profilverquerschnitten außerhalb einer Hauptachse)

Tabelle 2.3: Fehlerfälle und Genauigkeitsprobleme beim Biegen von stranggepressten Halbzeugen [29]

Aufgrund der Flexibilität der Profilbiegeverfahren mit kinematischer Gestalterzeugung hinsichtlich des Konturverlaufs werden diese in der Industrie häufig gerade für kleine Losgrößen eingesetzt. Insbesondere Drei- und Vier-Rollen-Biegen sind sehr universelle Verfahren, da mit einem Rollensatz oftmals Profile mit unterschiedlichen Querschnitten gebogen werden können. In der industriellen Praxis wird dabei das Drei-Rollen-Biegen wegen der geringeren Maschinenkosten bevorzugt eingesetzt [38, 39], wobei hier auch eine Auswahl zwischen unterschiedlichen

Maschinentypen je nach Biegeaufgabe erfolgen kann [25].

2.2 Profilhalbzeuge

Die Qualität gekrümmter Profile hängt neben dem Fertigungsverfahren auch entscheidend von dem eingesetzten Halbzeug ab. Die Bandbreite an zur Verfügung stehenden Halbzeugen ist sehr groß, wobei sich die Halbzeuge z.B. durch

- das Herstellungsverfahren,
- den eingesetzten Werkstoff und
- die Querschnittsgeometrie

kategorisieren lassen. Die Eignung der verschiedenen Halbzeuge für das Drei-Rollen-Biegen ist unterschiedlich. Magnesium und Magnesiumlegierungen sind z.B. aus verfahrenstechnischer Sicht ungeeignete Werkstoffe für das Drei-Rollen-Biegen, da sie bei Raumtemperatur nur ein geringes Umformvermögen besitzen. Untersuchungen von Roberts und Raynor haben gezeigt, dass für Reinformmagnesium bei Temperaturen $T < 225^\circ\text{C}$ der Verformungsmechanismus im Wesentlichen durch ein Gleiten in der Basisebene des hexagonalen Kristallgitters und teilweise auch durch Zwillingsbildung erfolgt [40, 41]. Erst bei Temperaturen $T > 225^\circ\text{C}$ werden weitere pyramidale Gleitebenen aktiviert, die zu einem sprunghaften Anstieg der plastischen Verformbarkeit führen. Ebenfalls ungeeignet sind beispielsweise Vierkanthohlprofile mit langen Kanten und geringen Wandstärken. Beim Drei-Rollen-Biegen würde eine unerwünschte Querschnittsdeformation auftreten, siehe Bild 2.3, die beispielsweise durch einen Mittelsteg wesentlich vermindert werden kann. Als Grund für die Querschnittsdeformation ist die Profilquerschnittsform zu nennen, der beispielsweise bei Biegung um die y-Achse ein Biege widerstand $W_y = M_B/I_y$ zugeordnet ist, der sich aus dem Biegemoment M_B und dem Flächenträgheitsmoment I_y berechnet. Profile mit kleinerem Biege widerstand lassen sich mit einem geringeren Energieeinsatz umformen. Dies führt dazu, dass Profile während eines Biegevorgangs einen Querschnitt einnehmen, der ein möglichst geringes Flächenträgheitsmoment aufweist [24]. Bei dünnwandigen Hohlprofilen kann die unerwünschte Querschnittsdeformation nur durch aufwendige Gegenmaßnahmen vermindert werden. Zur Abstützung des Profils werden u.a. Füllungen mit Sand bzw. einem Wirkmedium wie Öl verwendet.

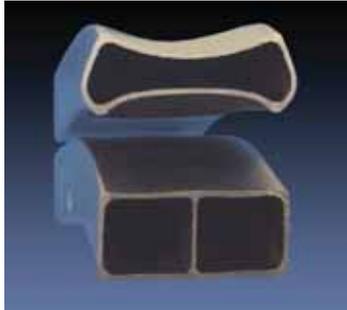


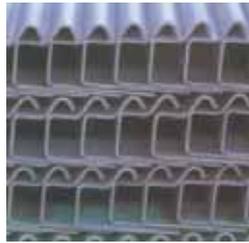
Abbildung 2.3: Querschnittsdeformation bei einem Hohlprofil ohne und mit Mittelsteg

Anders sieht es bei der Eignung eines Halbzeugs für das Drei-Rollen-Biegen unter Betrachtung der Schwankungen der Halbzeugeigenschaften aus, wobei damit sowohl die Veränderung der Werkstoffeigenschaften, z.B. Streckgrenze, als auch der Form- und Maßhaltigkeit entlang der Profillängsachse gemeint sind. Diese Schwankungen bestimmen nicht die grundsätzliche Eignung des Halbzeugs für das Drei-Rollen-Biegen, sondern beeinflussen vielmehr die Qualität des Fertigungsergebnisses. Bei hohen geforderten Konturgenauigkeiten müssen Prozessregelungen eingesetzt werden, um die Schwankungen auszugleichen. Dabei verlangen Halbzeuge, deren Eigenschaften hohen, zufälligen Schwankungen unterliegen, eine andere Prozessregelungsstruktur als Halbzeuge, deren Eigenschaften nur geringen Schwankungen unterliegen, siehe Abschnitt 2.4. Die Kenntnis der Profileigenschaften und auch deren Schwankungen entlang der Profillängsachse sollte demnach für eine prozessstabile und genaue Fertigung herangezogen werden.

2.2.1 Querschnittsformen und Herstellverfahren

Die Herstellungsverfahren für Halbzeuge lassen sich in Blechprofile und massive Profile untergliedern, Bild 2.4. Bei den Blechprofilen wird entsprechend der Namensgebung eine Blechplatte durch Einsatz von weiteren Umformverfahren in die geforderte Querschnittsgeometrie umgeformt. Während die Querschnittsgeometrie der Blechprofile vergleichsweise einfach gestaltet ist, erlauben die Herstellungsverfahren von massiven Profilen, und hier insbesondere das Verfahren Strangpressen, auch sehr komplizierte Querschnittsformen, wobei jedoch starke Einschränkungen hinsichtlich des einzusetzenden Werkstoffs existieren. In der Tabelle 2.4 werden zu den verschiedenen Herstellungsverfahren der Profilhalbzeuge die jeweils am häufigsten verwendete

Blechprofile

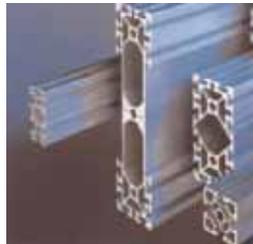


Walzprofilieren



Gesenk- oder Schwenkbiegen

Massive Profile



Strangpressen



Walzen oder Ziehen

Abbildung 2.4: Beispiele für Profilhalbzeuge und deren wichtigste Herstellungsverfahren

ten Werkstoffe dargestellt. Eine detailliertere Beschreibung der Werkstoffe bei Profilhalbzeugen kann aus Chatti [5] entnommen werden.

Herstellungsverfahren	Werkstoff
Walzprofilieren, Gesenk- und Schwenkbiegen	Stahl (unlegiert, nicht rostende u. a. Legierungen, Edelstähle) Aluminium und seine Legierungen Kupfer und seine Legierungen
Strangpressen	Aluminium und seine Legierungen Magnesium und seine Legierungen NE-Schwermetalle und Leichtmetalle
Warmwalzen	Stahl (nicht rostende Legierungen, Edelstähle) Kupfer und Legierungen
Kaltziehen	Stahl NE-Schwermetalle (selten)

Tabelle 2.4: Häufig eingesetzte Werkstoffe bei den Herstellungsverfahren für Profilhalbzeuge [5]

Da die Querschnittsform den Biegeprozess entscheidend mitbestimmt, haben sich zu deren Beschreibung verschiedene Klassifizierungen etabliert. Querschnitte von Blechprofilen werden teilweise entsprechend ihrer Anwendungsgebiete unterschieden, also z.B. Tragschienen oder Rollladen- und Markisen-Profile. Diese Klassifizierung beinhaltet jedoch keine Beschreibung des Profilquerschnitts. Sie werden entsprechend in

- Regelprofile (z.B. unterscheidet DIN EN 10162 walzprofilierte Kaltprofile in rechteckige L-, U-, C-, Z- oder Ω -förmige Querschnitte und Schlitzrohre [44, 45]),
- Sonderprofile und
- kombinierte Profile, also beispielsweise Kombinationen von Regelprofilen,

unterschieden. Bei den massiven Profilen wird ein ähnlicher Weg gegangen, Basisgeometrien werden definiert und anschließend variiert. Entsprechend werden Strangpressprofile in Haupt- und Nebenelemente untergliedert [46], Bild 2.5.

Nebenklassen Haupt- klassen 1-7	0 Grund- form	1 abgewandelte Grundform (Hohl- profile mit zen- trischer Bohrung)	2 abgewandelte Nebenform (Hohlprofile mit zentrischer Bohrung)	3 unsymmetrische Nebenform- elemente (Hohlprofile mit nichtzentrischer Bohrung)	4 Kombinations- beispiele zwischen den einzelnen Haupt- und Nebenklassen
1. volle, kreis- nahe Profile	10	11	12	13	10/30
2. volle, eckige Profile	20	21	22	23	20/42
3. breite Profile	30	31	32	33	33/53
4. Winkelprofile	40	41	42	43	42/10
5. gekrümmte Profile	50	51	52	53	52/10
6. geschlossene, runde Hohl- profile	60	61	62	63	60/33
7. geschlossene, eckige Hohl- profile	70	71	72	73	70/43

Abbildung 2.5: Formenkat alog für Strangpressprofile [46]

Diese Klassifizierungen geben nur ein grobes Bild des Querschnitts wieder. Trotzdem kann z.B. aufgrund der Klassifizierung als L- bzw. Winkelprofil wegen des asymmetrischen Quer-

schnitts bereits auf eine Torsion des gebogenen Profils geschlossen werden. Des Weiteren treten bei Hohlprofilen im Gegensatz zu Vollprofilen verstärkt Querschnittsdeformationen auf. Soll eine genaue Bewertung hinsichtlich der Eignung für einen Biegeprozess erfolgen, wird eine Zeichnung mit einem bemaßten Querschnitt und eingezeichneter Biegeebene benötigt.

2.2.2 Qualität der Halbzeuge

Hinsichtlich des Fertigungsverfahrens Drei-Rollen-Biegen beeinflussen verschiedene Profileigenschaften direkt den Biegeprozess. Dazu gehören insbesondere:

- Geometrie
 - Toleranzen der Querschnittsgeometrie
 - * Wanddicke bzw. Schenkellänge
 - * Konkavität bzw. Konvexität
 - * Winkelhaltigkeit (z.B. zwischen den beiden Schenkeln eines L-Profiles)
 - Geradheit des Profils
 - Verwindung des Profils
- Werkstoff
 - E-Modul
 - Streckgrenze
 - Fließkurve
 - Verfestigungsverhalten
 - Anisotropie
- Eigenspannungen

Die Schwankungen bei den geometrischen Eigenschaften führen dazu, dass sich die Spannungsverhältnisse im Profilquerschnitt in der Umformzone, bezogen auf die aktuelle Zustellung der Rollen, verändern. Die Schwankungen der Werkstoffkennwerte führen wiederum dazu, dass sich beispielsweise die Rückfederung ändert und sich somit auch die zur Erreichung einer Zielkrümmung notwendigen Spannungsverhältnisse verändern.

Die Qualitätseigenschaften der Profilhalbzeuge werden für viele Einsatzgebiete von Profilen in Normen, u.a. technische Lieferbedingungen, definiert, die einzuhalten sind, oder es werden direkte Vereinbarungen zwischen dem Halbzeughersteller und dem Kunden getroffen. Entsprechend der Vielfalt von Profilhalbzeugen existieren auch viele DIN-, EN- oder ISO-Normen, die jeweils für verschiedene Halbzeugklassen technische Lieferbedingungen definieren. Die Normen beziehen sich dabei in der Regel auf einen Werkstoff und seine Legierungen. Des Weiteren unterscheiden sich die Normen in dem Halbzeugherstellungsverfahren und der Querschnittsgeometrie, z.B. [47–49]. In den Normen finden sich in der Regel nur für geometrische Profileigenschaften zulässige Toleranzen, während für den Werkstoff normalerweise nur Werkstoffkennwerte wie die Dehngrenze $R_{p0,2}$ und die Zugfestigkeit R_m als Mindestwerte definiert werden. Zulässige Toleranzen für die Zugfestigkeit R_m können für Stähle jedoch dem Stahlschlüssel [50] entnommen werden, so kann beispielsweise beim Baustahl S235JR die Zugfestigkeit bei Wandstärken ≤ 3 mm Werte von 360-510 MPa annehmen. In der Tabelle 2.5 werden exemplarisch technische Lieferbedingungen für stranggepresste Halbzeuge aus Aluminium und Aluminiumlegierungen und für warmgewalzten scharfkantigen T-Stahl dargestellt. Die Werte zeigen, dass die Grenzma-

Eigenschaft	Toleranzangabe
Aluminium: DIN EN 755-9:2001-07 Stranggepresste Profile	
Wanddicke	$\pm 6,7$ % - ± 10 % (Umschlingungskreisdurchmesser < 100 mm)
Geradheit	$\leq 1,5$ mm/m Abweichung (Sekantenhöhe); jedoch auf 300 mm maximal 0,6 mm
Verwindung	1,5 mm/m, bei Profillängen bis 6000 mm jedoch max. 3,0 mm (z.B. bei Breiten von 30-50 mm)
Stahl: DIN 59051:2004-04 Warmgewalzter scharfkantiger T-Stahl	
Stegdick	+20 % / -8.3 % (+0,6 mm / -0,25 mm bei Stegdicken von 3-5 mm)
Geradheit	≤ 4 mm/m Abweichung (Sekantenhöhe)
Winkelhaltigkeit	≤ 1 mm Auslenkung
Stegausmittlung	≤ 1 mm Versatz

Tabelle 2.5: Grenzmaße und Formtoleranzen von Profilhalbzeugen aus verschiedenen Normen [44, 51–53]

ße und die Formtoleranzen hohen Schwankungen unterliegen können, wie z.B. Wandstärkentangen von bis zu 10 % bei stranggepressten bzw. 20 % bei warmgewalzten Profilen. Dadurch ändert sich die relative Position der Rollen zu dem Profil während der Biegung, sodass die sich

ausbildende Kontur auch entsprechenden Schwankungen unterliegen wird. Die Auswirkungen der Schwankungen der einzelnen Eigenschaften können sich dabei hinsichtlich der Abweichung von der Sollkontur kompensieren oder zu großen Abweichungen führen. Da keine Angaben über den Verlauf der Schwankungen entlang der Profillängsachse gegeben werden, lassen sich daraus notwendige Anforderungen für eine Prozessregelung nicht direkt ableiten.

2.3 Prozesssimulationen

In der Produktentwicklung kann auf Prozesssimulationen kaum noch verzichtet werden. Im Profilbiegebereich werden sie insbesondere bei der Produktauslegung eingesetzt, um Aussagen über das Verhalten des Profils während und nach dem Biegeprozess vor realen Biegungen treffen zu können. Untersuchungen wurden hier insbesondere für die industriell wichtigen Verfahren Rohrbiegen mit und ohne Dorn, Rund- und Streckbiegen durchgeführt. Hierbei wurden vornehmlich FE-Analysen durchgeführt, mit denen schwerpunktmäßig die Rückfederung und Versagensfälle wie die Querschnittsdeformation und Faltenbildung untersucht wurden [54–61]. Bei diesen formgebundenen Profilbiegeverfahren ist die Kenntnis der Rückfederung insbesondere für die Auslegung der Werkzeugkontur notwendig. Die Querschnittsdeformation beeinflusst das Profilquerschnittsdesign bzw. wird zur Planung von Gegenmaßnahmen wie Füllungen mit Lamellen herangezogen. Daneben wurde aber auch der Einfluss der Reibung beim Rohrbiegen [62] bzw. der Zugkraft beim Streckbiegen [57] betrachtet. Da die FE-Analysen lange Berechnungszeiten benötigten, haben Paulsen und Welo [63–65] und Corona [66] für das Streckbiegen auch analytische Methoden entwickelt, mit denen Aussagen über die Querschnittsdeformation getroffen werden können.

Speziell mit dem Drei-Rollen-Biegen haben sich Chatti, Adams und Yang et al. auseinandergesetzt und Prozesssimulationen entwickelt, die im Folgenden kurz vorgestellt werden. Von Chatti [24] wurde das halbanalytische Prozesssimulationssystem PROFI entwickelt und FE-Analysen vorgestellt. Das Simulationssystem PROFI unterstützt neben dem Drei-Rollen-Biegen auch die Profilbiegeverfahren Rundbiegen, Querkraftfreies Biegen und das Biegen mit geregelter Biegemoment, siehe Tabellen 2.1 und 2.2. Die Beschreibung des Profilhalbzeugs erfolgt in PROFI mittels des Profilquerschnitts, der Profileingangskrümmung und des Profilwerkstoffs. Letzteres erfolgt durch Angabe des E-Moduls E , der Streckgrenze R_p und der Fließkurve, wobei diese direkt als Stützpunkte aus einem einachsigen Zugversuch genommen werden kann

oder als Näherungsansatz nach Nadai ($k_f = C_N \varphi^{n_N}$) bzw. Swift ($k_f = C_S(\varphi + \varphi_{C_S})^{n_S}$). Aus der Profilbeschreibung berechnet PROFI eine Momenten-Krümmungs-Beziehung, siehe Bild 2.6. Dabei kommen je nach Profilquerschnittsform Ansätze von Lippmann [70], Hänert [71], Wiebeck [72] oder Vdovin [73] zum Einsatz, siehe Tabelle 2.6, wobei vereinfachte ein- bzw. zweiachsige Spannungszustände verwendet werden, Bild 2.7.

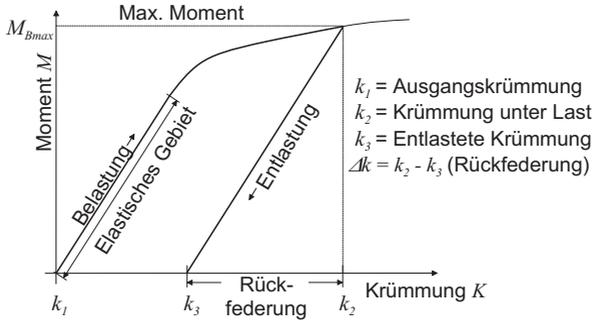


Abbildung 2.6: Momenten-Krümmungs-Beziehung

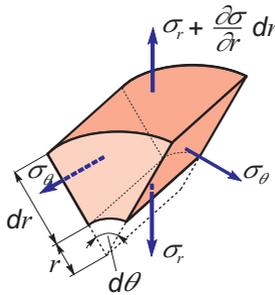


Abbildung 2.7: Vereinfachter Spannungszustand an einem infinitesimal kleinen Volumenelement

Ausgehend von der Momenten-Krümmungs-Beziehung und der Berechnung der Rückfederung, siehe Gleichung 2.1, wird der belastete Profilradius in der Umformzone ermittelt und eine Berechnung der Rollenzustellung d_z iterativ durchgeführt, wobei für die Bestimmung der Biegelinie der belastete Profilabschnitt durch einen geraden, vollständig elastischen Biegebalken ersetzt wird.

$$\Delta k = \frac{M_{B_{el}}}{EI} \tag{2.1}$$

Rechenansatz	Spannungszustand	Querschnitt	Werkstoff	Berechnungsergebnis
Lippmann	zweiachsig, Tangentialspannung $\sigma_\Theta \neq 0$ Radialspannung $\sigma_r \neq 0$	Rechteckquerschnitt (für Hochkantbiegen)	Fließkurve (Verfestigung)	Biegemoment, Rückfederung, Querschnittsdeformation
Hänert	einachsig, Tangentialspannung $\sigma_\Theta \neq 0$	Rechteckquerschnitt	Fließkurve (Verfestigung)	Biegemoment, Rückfederung
Wiebeck	einachsig, Tangentialspannung $\sigma_\Theta \neq 0$	offene und geschlossene Profile	Fließkurve (Verfestigung)	Momenten-Krümmungs-Beziehung
Vdovin	einachsig, Tangentialspannung $\sigma_\Theta \neq 0$	offene und geschlossene Profile (symmetrisch)	Fließkurve (Verfestigung)	Momenten-Krümmungs-Beziehung

Tabelle 2.6: Merkmale der von PROFI unterstützten Verfahren zur Berechnung der Momenten-Krümmungs-Beziehung [17, 24]

$$\begin{aligned} \Delta k &= \text{Rückfederung als Krümmung} & E &= \text{E-Modul} \\ M_{B_{el}} &= \text{elastisches Biegemoment} & I &= \text{Flächenträgheitsmoment} \end{aligned}$$

Im Anschluss wird ausgehend von den Belastungskräften an den Rollen und dem Haftreibungskoeffizienten der Reibpaarung Profil/Rollen die Anzahl der Biegestufen berechnet. Die Biegung des Profils zur geforderten Endkrümmung kann in mehreren Stufen notwendig sein, wenn die Belastungskräfte beim Biegen zu groß werden, sodass ein schlupffreier Transport des Profils nicht sichergestellt werden kann. Die Berechnungszeiten des Prozesssimulationssystems PROFI bewegen sich im Bereich von $\leq 40ms$ (Prozessor: AMD Athlon 64 X2 4200+), sodass es für die Anwendung in Prozessregelungen und zur Integration in Simulationsumgebungen geeignet ist. Für vergleichende Untersuchungen wurden neben den halbanalytischen Berechnungen und Experimenten auch FE-Analysen durchgeführt. Um eine Beurteilung der Profilbeanspruchung als Folge des Biegeprozesses vornehmen zu können, wurden die mechanischen Größen Vergleichsspannung nach v. Mises σ , Normalspannung σ_{11} und plastischer Vergleichsumform-

grad $\varphi_{v,pl}$ betrachtet. Die FE-Analysen wurden unter Verwendung des FE-Programms MARC und des Pre- und Postprozessors MENTAT vorgenommen. Dabei wurde ein Rechteckprofil mit den Abmessungen 20x10 mm aus S235JRG2 und EN-AW 6060 verwendet. Die Ergebnisse der FE-Analysen zeigen, dass das Profil die höchste Belastung beim Kontakt mit der Mittelrolle erfährt, wobei der Kontaktpunkt nicht mittig liegt, sondern in Richtung der Eingangsrolle versetzt ist. Erwartungsgemäß liegen die Tangentialspannungen σ_θ beim Kontaktpunkt im Druck- und auf der äußeren Profilstseite im Zugbereich. Betragsmäßig sind die Druckspannungen größer als die Zugspannungen, wobei Chatti diese auf direkte Belastung durch den Kontakt mit der Mittelrolle zurückführt. Die plastische Umformung des Profils findet im Bereich der Kontaktstelle mit der mittleren Rolle statt, wobei die Umformgrade mit wachsendem Abstand zur Profilmittte ansteigen. Der einlaufende Profilschenkel erfährt während der Biegung nahezu ausschließlich elastische Dehnungen, während beim auslaufenden Profilschenkel die Krümmung um ihren elastischen Anteil entsprechend der Rückfederung reduziert wird.

Ein hybrider Ansatz für die Prozessauslegung beim Drei-Rollen-Biegen wurde von Adams und Mamoutov [74, 75] vorgestellt, der neben der Finite-Elemente- (FE-) auch die Finite-Differenzen (FD-) Methode einsetzt. Die FE-Methode wird zur Berechnung der Querschnittsdeformation, der Rückfederung, des Spannungszustands und der Umformleistung eingesetzt, wobei die Rollengeometrie und der Einsatz von Stützmedien für den Profilquerschnitt berücksichtigt werden. Um die Rechenzeiten zu reduzieren, wird ein 3D-Ansatz verwendet, der auf querkraftfreiem Biegen basiert. Die stützende Wirkung der Rollen wird dabei durch Anwendung reibungsbehafteter Ebenen und das Fixieren von Knoten abgebildet. Die Berechnungen wurden mit MSC/Autoforge durchgeführt, wobei die Berechnungszeiten auch bei einem komplizierten Profilquerschnitt im Minutenbereich lagen. Für die Berechnung der Rollenzustellung wird ein FD-Modell verwendet, das den Biegeprozess als 2-Balkenmodell beschreibt. Der einlaufende Balken (Profil zwischen Eingangs- und Mittelrolle) erfährt mit steigendem Biegemoment eine elastisch-plastische Verformung. Der auslaufende Balken (Profil zwischen Mittel- und Ausgangsrolle) wird entlastet und nur elastisch deformiert. Die Koppelbedingungen der Balken im Kontaktpunkt an der Mittelrolle lauten dabei bei dem FD-Modell:

- Tangentengleichheit,
- Momentengleichheit und
- Verfestigungsgleichheit (gleicher Punkt bei der Momenten-Krümmungs-Beziehung).

Yang et al. [26] haben im Rahmen der Untersuchung einer Prozessregelung, siehe Abschnitt 2.4, für das Biegen von U-Profilen mittels Drei-Rollen-Biegen eine halbanalytische Prozesssimulation entwickelt. Mit dieser kann für eine Zielkrümmung k_3 die notwendige Rollenzustellung d_Z für eine Drei-Rollen-Biegemaschine in Pyramidbauweise [25] berechnet werden. Dabei wird unter Berücksichtigung eines elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens mit linearer Verfestigung und Annahmen für die Krümmungen und das Biegemoment entsprechend den Gleichungen 2.2 und 2.3 eine Momenten-Krümmungs-Beziehung mittels kleiner Krümmungsinckremente iterativ berechnet.

$$\epsilon_\theta(y) = k(y - H_1) \quad (2.2)$$

$$M_B = \int_A \sigma_\theta(y)(y - H_1) dA \quad (2.3)$$

$\epsilon_\theta(y)$ = Dehnung in Längsrichtung k = Krümmung

$\sigma_\theta(y)$ = Tangentialspannung y = Profilhöhe

M_B = Biegemoment H_1 = Position der neutralen Faser

A_P = Profilquerschnitt

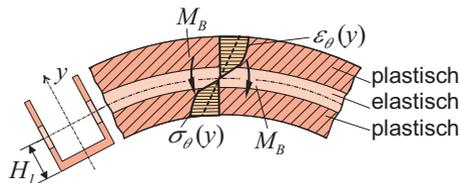


Abbildung 2.8: Spannungs-Dehnungsverteilung im Profilquerschnitt

Mit der aufgestellten Beziehung und der Annahme, dass die Rückfederungsgerade parallel zur Geraden in der elastischen Region ist, Bild 2.6, wird für die Krümmung unter Last k_2 und die entlastete Krümmung k_3 eine $k_2 - k_3$ -Beziehung aufgestellt. Mit den beiden aufgestellten Beziehungen berechnen Yang et al. für eine gegebene Zielkrümmung k_3 und eine segmentierte Biegelinie die notwendige Rollenzustellung d_Z .

Die vorgestellten Verfahren unterstützen eine Überprüfung der Herstellbarkeit von Profilen im Vorfeld der Fertigung und können auch zur Prozessoptimierung eingesetzt werden.

Die FE-Analysen können dabei wichtige Informationen hinsichtlich von Versagensfällen wie Querschnittsdeformation oder Faltenbildung liefern. Aufgrund der langen Berechnungszeiten für die FE-Analysen sind diese zur schnellen Bestimmung von Maschineneinstellparametern allerdings ungeeignet. Da beim Profilbiegen jedoch zufällige Störgrößen wie Schwankungen bei den Werkstoffeigenschaften bzw. der Profilquerschnittsgeometrie existieren, bedarf es für eine genaue und stabile Fertigung des Einsatzes von Prozessregelungen. Für den direkten Einsatz in Prozessregelungen bzw. zur Untersuchung von Prozessregelungen unter Echtzeitbedingungen in Simulationssystemen müssen dabei eingesetzte Prozesssimulationen dementsprechend auf halbanalytischen Verfahren basieren. Ihre Berechnungszeiten liegen im Bereich von 50 ms im Vergleich zu mehreren Minuten für die Durchführung von Berechnungen unter Verwendung der FE-Methode.

2.4 Prozessregelungen

Bevor realisierte Prozessregelungen für das Drei-Rollen-Biegen vorgestellt werden, soll ein kurzer Überblick der verschiedenen Reglertypen gegeben werden.

2.4.1 Methoden zur Prozessregelung allgemein

Generell stehen die drei folgenden Reglertypen [76–80] zur Verfügung:

- Konventionelle Regler (PID-Regler)
- Modellgestützte gehobene Regelung
 - Zustandsregelung
 - Prädiktive Regler
- wissensbasierte und lernende Regler
 - Fuzzy-Regler
 - Regler unter Verwendung von Künstlichen Neuronalen Netzen (KNN)
 - Neuro-Fuzzy-Regler

Am häufigsten werden die konventionellen Regler eingesetzt, da für sie umfassende theoretische Grundlagen existieren, die eine Auslegung und Stabilitätsbewertung erlauben. Sie sind jedoch nur für Anwendungen einsetzbar, die ein lineares Systemverhalten aufweisen. Durch eine Linearisierung des nichtlinearen Systemverhaltens in einem Arbeitspunkt sind sie jedoch auch begrenzt bei nichtlinearen Systemen verwendbar. Im Falle des Drei-Rollen-Biegens kann eine Linearisierung bspw. durch den Einsatz einer Prozesssimulation erfolgen. Diese berechnet für eine entlastete Profilkrümmung k_3 die zugehörige Rollenzustellung d_Z , und der konventionelle Regler korrigiert die berechnete Rollenzustellung entsprechend von auftretenden Regelabweichungen. Die Prozessregelung von Yang et al., Abschnitt 2.4 ab Seite 26, hat einen entsprechenden Aufbau.

Neben den konventionellen Reglern nimmt jedoch auch der Einsatz von modellgestützten gehobenen Regelungen zu. Zu ihnen gehören die Zustandsregelung und die modellbasierte prädiktive Regelung. Sie haben den Hintergrund, dass das Modell eines realen Systems üblicherweise eine höhere Ordnung besitzt. Des Weiteren bestehen zwischen Größen des Systems komplexe Wechselwirkungen, die durch eine Differenzialgleichung bzw. eine Übertragungsfunktion nur eingeschränkt dargestellt werden können. Bei der Zustandsregelung werden relevante Zustandsgrößen des Systems ausgewählt, die untereinander durch Differenzialgleichungen erster Ordnung verknüpft sind [78, 80]. Auf diese Weise erhält man für das dynamische System eine Zustandsraumdarstellung, und ein Zustandsregler kann somit als mehrfacher P-Regler [80] aufgefasst werden. Für eine Zustandsregelung ist es Voraussetzung, dass die Zustandsgrößen als Werte vollständig gemessen werden können oder eine Schätzung mittels eines Beobachters realisiert wird. Die Schätzung mit einem Beobachter erzeugt jedoch üblicherweise einen hohen Rechenaufwand. Des Weiteren sind die Schätzungsergebnisse bei ungenau bekannten Parametern der Regelstrecke oder bei einwirkenden Störgrößen unsicher [80]. Dies und die Ergebnisse aus den Untersuchungen der Halbzeugeigenschaften, Kapitel 4, lassen die Verwendung einer Zustandsregelung für den Drei-Rollen-Biegeprozess als ungeeignet erscheinen.

Die modellbasierte prädiktive Regelung bezeichnet eine Klasse von Regelungsverfahren, die ein Prozessmodell zur Vorhersage von zukünftigen relevanten Prozessgrößen einsetzen [81]. Die grundsätzliche Struktur derartiger Regelkreise kann dem Bild 2.9 entnommen werden. Ein Optimierer erhält den aktuellen Sollwertverlauf (in der Regel 3-7 der folgenden Sollwerte) und notwendige Nebenbedingungen als Eingangswerte. Auf deren Basis berechnet er die zugehörigen optimalen Stellgrößen und reicht die nächste Stellgröße an die Regelstrecke weiter. Damit

der Optimierer die optimalen Stellgrößen berechnen kann, benötigt er noch Informationen über die zukünftigen Prozesszustände. Diese erhält er von dem Prädiktor, dessen Prozessmodell als Eingangsgrößen die zukünftigen Stellgrößen und den aktuellen Prozesszustand erhält. Damit

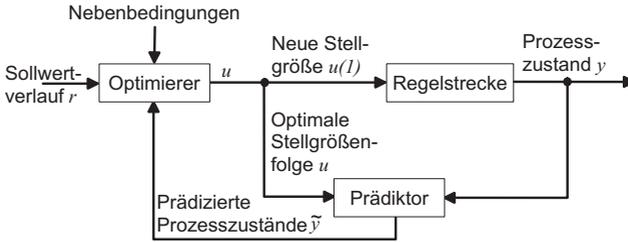


Abbildung 2.9: Grundsätzliche Struktur eines prädiktiven Regelkreises nach Rau [81]

eignen sich modellbasierte prädiktive Regelungen insbesondere für Anwendungen, bei denen sich die Führungsgrößen dynamisch verändern. Des Weiteren sind sie vorteilhaft, wenn Informationen über das zukünftige Prozessverhalten existieren, beispielsweise wenn Störgrößen eine gewisse Regelmäßigkeit in ihrem Auftreten besitzen. Bei den Untersuchungen zu den Schwankungen der Halbzeugeigenschaften, Kapitel 4, wurden entsprechende Regelmäßigkeiten jedoch nicht festgestellt.

Die letzte Klasse von Regelungsverfahren bilden die wissensbasierten und lernenden Regler [77, 79, 80]. Sie kommen in der Regel zum Einsatz, wenn das Systemverhalten nicht genau bekannt ist und somit kein genaues Modell erstellt werden kann. Ein wichtiger Vertreter ist die Fuzzy-Regelung. Sie baut auf der Fuzzy-Logik auf und erlaubt die Beschreibung des vorhandenen Wissens über das Systemverhalten in einer WENN-DANN-Regelbasis. Die Regelbasis ist Bestandteil eines Fuzzy-Modells, das die Eingangsgrößen des Reglers durch Auswertung der Regeln in Ausgangsgrößen überführt, siehe Bild 2.10. Das Übertragungsverhalten des Fuzzy-Reglers zeigt dabei ein rein statisches Verhalten und kann durch eine Kennlinien- bzw. Kennfelddarstellung visualisiert werden. Fuzzy-Regelungen eignen sich insbesondere bei Anwendungsfällen, bei denen Wissen über das Systemverhalten existiert, dieses jedoch nicht in einem mathematischen Modell ausgedrückt werden kann.

Sind die Wechselwirkungen von Prozessgrößen eines Systems nicht bekannt, kann eine Regelbasis nicht erstellt werden. In diesem Fall sind künstliche neuronale Netze (KNN, im Folgenden neuronale Netze genannt) eine Alternative, die kein A-priori-Wissen über ein System benötigen

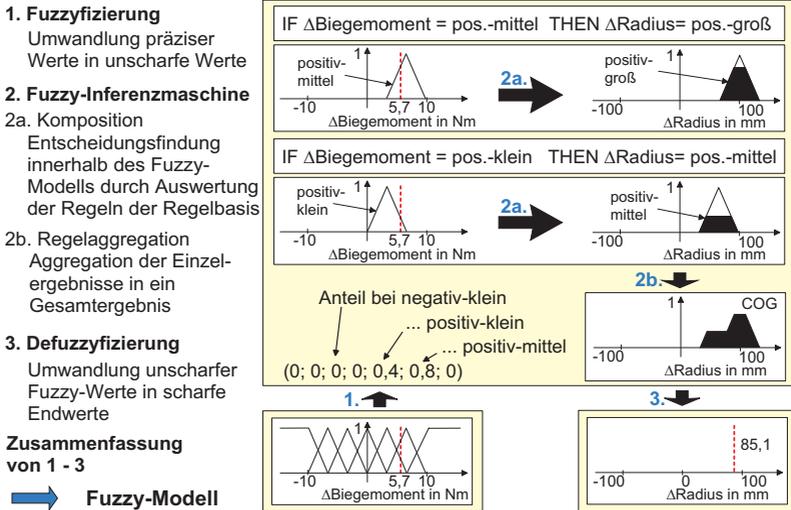


Abbildung 2.10: Komponenten und Aufbau eines Fuzzy-Modells

und dieses stattdessen in einer Lernphase selber aufbauen. Grundsätzlich stellen neuronale Netze den Versuch dar, die Arbeitsweise eines Gehirns nachzubilden. Einzelne Funktionseinheiten, die Neuronen, werden miteinander zu einem Netzwerk verbunden, siehe Bild 2.11. Ein einzelnes Neuron kann dabei mehrere Eingänge besitzen, deren Signale ein Neuron abhängig von seiner Vorgeschichte aktivieren können. Ist dies der Fall, wird entsprechend der Aktivierung des Neurons mittels einer Ausgabefunktion ein Ausgangssignal generiert und über die Ausgänge des Neurons ausgegeben. Die Ausgangssignale der Neuronen der Eingabeschicht werden mittels Koeffizienten v_{ij} gewichtet und bilden die Eingangssignale der Neuronen der versteckten Schicht. Deren Neuronen verarbeiten die Eingangssignale und generieren die Ausgangssignale, die nach einer Gewichtung durch die Koeffizienten w_{jk} an die Neuronen der Ausgabeschicht weitergeleitet werden. Die Neuronen der Ausgabeschicht erzeugen letztendlich das Ausgabesignal des neuronalen Netzwerks. Dies ist ein Beispiel für ein einfaches Multilayer-Perzeptron (MLP) mit einer versteckten Schicht. Insgesamt unterscheiden sich neuronale Netzwerke durch die Art der verwendeten Neuronen und deren Kopplung zu einer Netzwerktopologie voneinander, wobei auch mehr als eine versteckte Schicht verwendet werden kann. Das Wissen wird von neuronalen Netzen in den Gewichtungsfaktoren (im Beispiel v_{ij} und w_{jk}) gespeichert. Diese werden mittels Lernmethoden eingestellt, wobei für den Einsatz in Regelungen hauptsächlich das überwachte

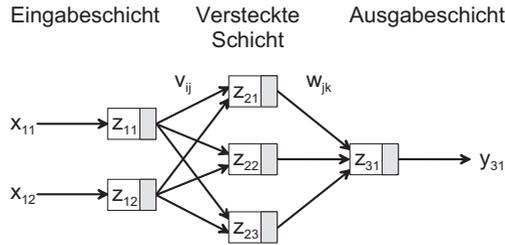


Abbildung 2.11: Beispiel einer einfachen, aus drei Schichten bestehenden vorwärtsgekoppelten Netzwerktopologie [82]

Lernen Verwendung findet. Bei ihm existieren Lerndatensätze, die für Eingangsgrößen die zugehörigen Ausgangsgrößen beschreiben. Mittels Lernalgorithmen, wie z.B. des Backpropagation-Algorithmus, werden die Gewichtungsfaktoren so angepasst, dass für die Eingangsdaten die zugehörigen Ausgangsdaten generiert werden. Als weitere Lernmethode, aber im wesentlich geringeren Maße, kommt das bestärkende Lernen zum Einsatz. Bei ihm sind die Ausgangsgrößen nicht direkt bekannt, vielmehr können nur Aussagen getroffen werden, ob eine Änderung der Gewichtungsfaktoren erfolgreich war oder nicht. Multilayer-Perzeptrons haben den Nachteil, dass das Wissen über die Gewichtungsfaktoren verteilt und somit eine physikalische Interpretierbarkeit nicht gegeben ist. Neuronale Netze auf Basis von Radial-Basis-Funktionen haben demgegenüber den Vorteil, dass die einzelnen Neuronen eine feste Zuordnung zu Bereichen des Eingangsraums besitzen. Dies erlaubt eine physikalische Interpretierbarkeit der durch Lernverfahren adaptierten Gewichte des neuronalen Netzes [81].

Vergleicht man die Eigenschaften von Fuzzy-Modellen und neuronalen Netzen, so haben Fuzzy-Modelle den Vorteil, dass mit ihnen direkt Wissen beschrieben werden kann, wohingegen Neuronale Netze den Vorteil der Lernfähigkeit besitzen. Um beide Vorteile nutzen zu können, wurden zwei Ansätze entwickelt, die beide Technologien miteinander kombinieren [79, 80]. Beim kooperativen Ansatz unterstützt ein Fuzzy-System den Lernprozess des neuronalen Netzes durch Auswertung der auftretenden Prozesszustände, wodurch die Konvergenzgeschwindigkeit erhöht wird. Beim hybriden Ansatz erfolgt dagegen eine bidirektionale Überführung von Fuzzy-Systemen in neuronale Netze, sodass eine eindeutige und feste Zuordnung zwischen Neuronen auf der einen Seite und Fuzzy-Sets, Fuzzy-Regeln und Ausgangs-Fuzzy-Sets auf der anderen Seite existiert. Dies ermöglicht eine Beschreibung von Wissen im Fuzzy-Modell und eine Adap-

tion dieses Wissens durch Anwendung von Lernverfahren beim neuronalen Netz. Entsprechende Systeme werden Neuro-Fuzzy-Systeme genannt.

2.4.2 Prozessregelungen für das Drei-Rollen-Biegen

Der Aufbau von Prozessregelungen für Profilbiegeprozesse gestaltet sich in der Regel aufwendig, da die Einflussgrößen auf den Prozess vielschichtig sind und sich die Auswirkungen überlagern können. Die entscheidende Einflussgröße ist jedoch die Rückfederung, deren Kenntnis für ein genaues Biegen notwendig ist. Beim Rohrbiegen, bei dem ein Profilende fest eingespannt ist, kann nach dem Biegen eine Entlastung stattfinden, die Rückfederung gemessen und der notwendige Überbiegewinkel bestimmt werden, um den im Anschluss das Profil nachgebogen wird [83]. Diese Vorgehensweise ist zeitaufwendig und wird dementsprechend nur bei hohen Genauigkeitsanforderungen eingesetzt.

Beim Drei-Rollen-Biegen ist eine entsprechende Entlastung zur Ermittlung der Rückfederung nicht möglich, da dadurch der kontinuierliche Biegeprozess unterbrochen werden muss und durch die Entlastung des Profils die Führung des Profils verloren ginge. Stattdessen basieren beim Drei-Rollen-Biegen einfache Prozessregelungen auf der Messung der Profilkrümmung hinter der Ausgangsrolle [24, 84]. Dort ist das Profil vollständig entlastet und die entlastete Profilkrümmung k_3 kann direkt ermittelt werden. Durch eine Prozesssimulation, bspw. PROFI von Chatti [24], kann die Rückfederung entsprechend korrigiert, die notwendige Profilkrümmung unter Last k_2 bestimmt und eine korrigierte Rollenzustellung berechnet werden. Da die Profilkrümmung nach der Messung nicht mehr beeinflusst werden kann, ist diese Vorgehensweise jedoch nur einsetzbar, wenn die Werkstoffigenschaften und der Profilquerschnitt entlang der Profillängsachse zwischen Umformzone und Messort der entlasteten Profilkrümmung nur geringen Schwankungen unterliegen.

Um Störungen des Biegeprozesses korrigieren zu können, müssen die Störgrößen jedoch während des Biegeprozesses ermittelt und somit Prozessgrößen aus der Umformzone aufgenommen werden. Eine derartige Prozessregelung wurde von Hardt, Roberts und Stelson zum Biegen von Flachprofilen vorgestellt [85], Bild 2.12. Sie nehmen dabei die Profilkrümmung unter Last k_{2m} und die auf die Ausgangsrolle wirkende Kraft F_A auf. Aus letzterer berechnen sie das maximale Biegemoment M_B und aus ihm schließen sie auf die Rückfederung Δk . Die dabei verwendete M_B - Δk -Beziehung kann experimentell ermittelt oder alternativ auf Basis der Biegesteifigkeit

berechnet werden. Da die Profilkrümmung unter Last k_{2m} aufgenommen wird, kann aus ihr und der Rückfederung auf die entlastete Profilkrümmung k_{3p} geschlossen werden. Aus der Soll-Krümmung k_3 und der prognostizierten entlasteten Krümmung k_{3p} wird die Regeldifferenz berechnet und an einen I-Regler gegeben, der die Rollenzustellung korrigiert. Durchgeführte Versuche mit 1,5 mm und 2,5 mm dicken Flachprofilen aus Aluminium 2024-T6 und Edelstahl X10CrNi18-8 (1.4310) führten bei konstanten Radien von 150 mm und 230 mm zu maximalen Abweichungen beim Zielradius von ± 3 %. Bei den Untersuchungen betrug der Profilverorschub 1,5 m/min.

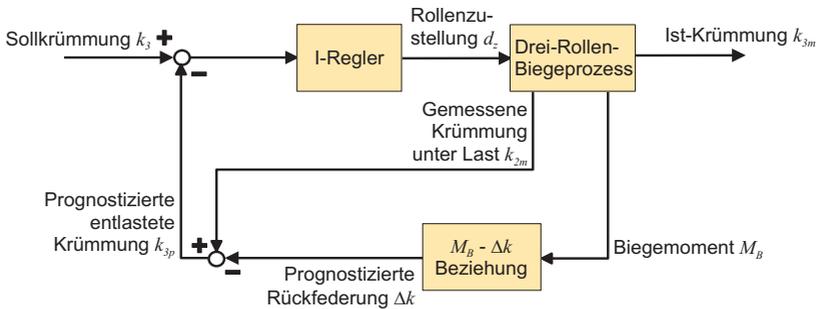


Abbildung 2.12: Prozessregelung für das Drei-Rollen-Biegen nach Hardt, Roberts und Stelson (vgl. [85])

Die Prozessregelung von Hardt et al. nimmt die relevanten Prozessgrößen aus der Umformzone Krümmung unter Last k_2 und das Biegemoment M_B auf und prognostiziert damit modellbasiert mittels einer M_B - Δk -Beziehung auf eine entlastete Krümmung k_3 des Profils. Entscheidend bei dem Regelungskonzept ist, dass eine genaue Prognose der Rückfederung erfolgt. Basiert die Prognose aus der Biegesteifigkeit, hängt sie vom verwendeten E-Modul und der verwendeten Querschnittsgeometrie ab. Schwankungen bei diesen Werten innerhalb des Profils führen demnach zu einer ungenauen Prognose und dementsprechend zu einer Abweichung im Biegeergebnis. Des Weiteren ist von Nachteil, dass eine Aufnahme des entlasteten Profiltradius nicht erfolgt und somit eine abschließende Korrektur von durch das Modell verursachten Abweichungen nicht durchgeführt werden kann.

Eine weitere Prozessregelung für das Drei-Rollen-Biegen, die auf Prozessgrößen aus der Umformzone basiert, wurde von Yang, Shima und Watanabe [26] vorgestellt und anhand von U-Profilen untersucht. Sie haben ein halbanalytisches Prozessmodell für das Drei-Rollen-

Biegen entwickelt, das unter Berücksichtigung des Profilquerschnitts und eines elastisch-linearplastischen Werkstoffverhaltens eine Momenten-Krümmungs-Beziehung berechnet, siehe Abschnitt 2.3. Des Weiteren werden damit zwei Beziehungen zwischen der belasteten Profilkrümmung k_2 und der entlasteten Profilkrümmung k_3 und der belasteten Profilkrümmung k_2 und der Rollenzustellung d_Z aufgestellt. Mit den ermittelten Beziehungen wurde ein Prozessregelung aufgebaut, bei der auf Basis der Soll-Krümmung k_3 durch die Prozesssimulation eine Rollenzustellung d_Z berechnet wird. Während des Biegeprozesses wird über einen taktilen Krümmungssensor nach der Drei-Punkt-Methode, siehe Abschnitt 7.4.1, die belastete Profilkrümmung k_2 bestimmt und mit der berechneten Beziehung zwischen belasteter und entlasteter Krümmung eine entlastete Krümmung k_{3p} prognostiziert. Aus der Soll-Krümmung k_3 und der prognostizierten entlasteten Krümmung k_{3p} wird die Regeldifferenz berechnet und an einen PID-Regler weitergereicht, Bild 2.13. Der PID-Regler berechnet aus der Regeldifferenz als Stellgröße eine Korrektur der Rollenzustellung Δd_Z . Anhand von durchgeführten Experimenten (U-Profile 10x10x1 mm aus AA 6063, Profilvorschub 0,25 m/min) wurde eine Abweichung von $\pm 3\%$ von der Soll-Krümmung 0,002 (Radius= 500 mm) ermittelt.

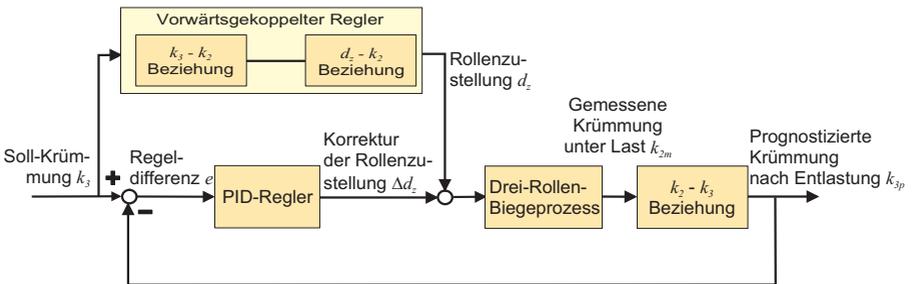


Abbildung 2.13: Prozessregelung für das Drei-Rollen-Biegen nach Yang, Shima und Watanabe (vgl. [26])

Die Prozessregelung von Yang et al. verwendet zur Bestimmung der Stellgröße ausschließlich die Krümmung unter Last k_2 und eine darauf aufbauende modellbasierte Prognose für die Rückfederung. Da die modellbasierte Prognose auf konstanten Profilquerschnittsdaten und Werkstoffkennwerten basiert, die reale Rückfederung aber aufgrund von davon abweichenden Profilkennwerten entsteht, weicht die prognostizierte Rückfederung von der realen ab. Da die Messung der entlasteten Profilkrümmung k_3 nicht erfolgt, kann eine Korrektur der prognostizierten Rückfederung nicht erfolgen.

2.5 Testumgebungen

Der vorhergehende Abschnitt zeigt, dass bereits speziell für das Drei-Rollen-Biegen verschiedene Prozessregelungen untersucht wurden. Soll für eine Drei-Rollen-Biegemaschine eine neue Prozessregelung entwickelt werden, so kann dies direkt an der Biegemaschine erfolgen, oder es kann im Vorhinein eine simulationsunterstützte Betrachtung durchgeführt werden, bei der der Biegeprozess mittels Prozesssimulationen abgebildet wird. Das simulationsgestützte Vorgehen ist dabei vorzuziehen, da dadurch Ressourcen eingespart werden können.

Zur Untersuchung von Prozessregelungen existieren Werkzeuge, die den Aufbau und die Untersuchung von Prozessregelungen unterstützen, wobei neben anderen Matlab/Simulink und Labview genannt werden können und die Funktionalitäten von Matlab/Simulink stellvertretend kurz vorgestellt werden. Matlab ist eine Umgebung für numerische Berechnungen, Analyse und Visualisierung. Es bietet eine eigene Programmiersprache, kann aber auch über Programmierschnittstellen externe Bibliotheken einbinden. Es ist somit offen ausgelegt und kann dementsprechend leicht um zusätzliche Funktionalitäten erweitert werden. Existierende Erweiterungspakete sind z.B. Simulink und Stateflow, wobei Simulink eine interaktive Umgebung zur Modellierung und Offline-Simulation mittels Blockdiagrammen bereitstellt und mit Stateflow eine Integration von Zustandsdiagrammen in Simulink erfolgt. Mit dem Erweiterungspaket Real-Time Workshop können aus einem erstellten Systemmodell automatisch Echtzeit-Code für Tests, die Validierung und die abschließende Target-spezifische Implementierung von Embedded Software erzeugt werden und somit der Übergang von der Simulation zur praktischen Validierung schnell durchgeführt werden. Dies bedingt natürlich, dass die entsprechende Zielplattform mit ihren Sensoren und Aktoren unterstützt wird. Ist letzteres nicht der Fall, so können Sensoren und Aktoren durch zu programmierende Treiber teilweise eingebunden werden.

Somit werden von Matlab/Simulink und entsprechenden Umgebungen viele Module bereitgestellt, die für den Aufbau einer Testumgebung für Prozessregelungen aus dem Drei-Rollen-Biegen notwendig sind. Alternativ zu diesen Systemen können entsprechende Funktionalitäten aber auch selbst programmtechnisch abgebildet werden, wodurch eine Spezialisierung auf das Anwendungsgebiet und somit eine optimierte Umsetzung hinsichtlich Prozessor- und Speicherressourcen erzielt werden kann. Dabei kann auf viele leistungsfähige Open-Source-Bibliotheken zurückgegriffen werden. Diese besitzen den Vorteil, dass die Quelltexte zugänglich sind und somit weitere Optimierungen und Korrekturen einfach durchgeführt werden können.

Die Auswahl zwischen den beiden grundsätzlichen Alternativen hängt demnach maßgeblich davon ab, wie viel Unterstützung für das relevante Anwendungsgebiet angeboten wird und ob die geforderte Plattform mit den notwendigen Prozessorressourcen unterstützt wird.

Kapitel 3

Zielsetzung der Arbeit

Unter den kinematischen Profilbiegeverfahren wird das Drei-Rollen-Biegen aufgrund seiner Flexibilität in der Industrie häufig eingesetzt. Mit einem Rollensatz können sowohl verschiedene Profilkrümmungen als auch verschiedene Profilquerschnitte gebogen werden, wobei auch meist kleinere Losgrößen gefertigt werden. Aus der Breite der Einsatzgebiete von gebogenen Profilen resultiert eine große Vielfalt von notwendigen Halbzeugen, die sich bisher im Werkstoff, der Querschnittsgeometrie und dem Halbzeugherstellverfahren unterscheiden haben. In jüngster Zeit ist als weitere Unterscheidung die Variabilität des Profilquerschnitts entlang der Profillängsachse hinzugekommen, durch die belastungsgerecht ausgelegte Profile realisiert werden können. Aufgrund der vorhandenen zufälligen Schwankungen bei den Halbzeugeigenschaften ist für eine effiziente und stabile Fertigung der Einsatz von Prozessregelungen notwendig. Für deren Untersuchung und Entwicklung wird eine Maschine benötigt, die voll CNC-gesteuert und mit allen notwendigen Sensoren ausgestattet ist. Dies ist kostspielig und dabei werden auch viele Ressourcen sowohl an Personal wie auch an Materialien gebunden. Mit Hinblick auf die Vorgehensweise in der virtuellen Produktentwicklung ist der Einsatz eines virtuellen Prototyps und somit einer simulierten Maschine vorteilhaft. Mit ihr können flexibel verschiedene Prozessregelungen untersucht werden. Des Weiteren ermöglicht sie, die Maschinenkonstruktion hinsichtlich ihrer geometrischen Maße zu optimieren. Aufgrund der kinematischen Gestalterzeugung beim Drei-Rollen-Biegen wird schließlich das Spektrum an herstellbaren Profilkonturen durch die Rollenzustellung und dementsprechend durch die geometrischen Verhältnisse und Proportionen der Maschine definiert. Mit einem virtuellen Prototyp können die Maschinenparameter schnell geändert und somit das Potenzial der Maschine erschlossen werden. Des Weiteren können im

simulierten Prozess abgebildete Prozessgrößen durch ebenfalls simulierte Sensoren aufgenommen werden und der Steuerung bzw. der Prozessregelung zugeführt werden. Auf diese Weise kann deren Eignung für den Einsatz in einer Prozessregelung untersucht und bewertet werden. Hinsichtlich der Untersuchung von Prozessregelungen ergibt sich bei einem simulierten Prozess darüber hinaus der Vorteil, dass Prozessregelungen unter genau definierten Bedingungen untersucht werden können. Dies ist bei Untersuchungen mittels realer Biegungen nicht möglich, stattdessen müssen zur Validierung aufwendige und zahlreiche Versuchswiederholungen durchgeführt werden.

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit bestand darin, diese Problematik aufzugreifen und eine Testumgebung aufzubauen, mit der Prozessregelungen für das Drei-Rollen-Biegen innerhalb eines Simulationssystems untersucht werden können. Ausgehend von der Beschreibung eines Profilhalbzeugs und einer Zielkontur wird in Verbindung mit einer vorzugebenden Rollenzustellung und einer definierten Maschinengeometrie der Profilbiegeprozess in einer Simulationsumgebung abgebildet. Dabei werden Prozessgrößen wie die belastete Profilkrümmung in der Umformzone oder das Biegemoment zur Verfügung gestellt. Potenzielle Prozessregelungen können auf diese und/oder weitere Prozessgrößen zugreifen und entsprechend durch Veränderung der Rollenzustellung regelnd in den Biegeprozess eingreifen. Um auftretende Störgrößen wie Schwankungen bei den Halbzeugeigenschaften abbilden zu können, sind diese entlang der Profillängsachse definierbar und beeinflussen entsprechend die Prozessgrößen und das Biegeergebnis.

Die Testumgebung ist so auszulegen, dass sie sowohl mit einem simulierten Biegeprozess wie auch mit einem realen Biegeprozess arbeiten kann. Dies ermöglicht eine intensive Untersuchung von Prozessregelungen am virtuellen Prototypen, die jedoch mittels realer Biegungen schnell und ohne langwierige Systemänderungen validiert werden können. Da für das Drei-Rollen-Biegen zwei Maschinenkinematiken existieren, bei denen die Mittelrolle bzw. die Außenrollen zugestellt werden, müssen auch beide Maschinentypen von der Testumgebung abgebildet werden. Die Validierung der Testumgebung wird durch verschiedene Prozessregelungen durchgeführt, wobei bestehende Regelungen nach YANG [26] und HARDT [85] betrachtet werden, aber auch eine erweiterte Prozessregelung vorgestellt und untersucht wird. Um einen flexiblen Einsatz der Testumgebung zu ermöglichen, ist diese parametrisierbar und modular aufzubauen. Auf diese Weise kann das Potenzial aus dem breiten Spektrum an Maschinengeometrien und möglichen Sensortypen erschlossen werden.

In den folgenden Kapiteln wird das Modell, die Umsetzung und die Validierung einer entsprechend der Zielsetzung ausgelegten Testumgebung vorgestellt. Dabei werden im folgenden Kapitel für unterschiedliche Profilhalbzeuge Eigenschaftsschwankungen, die entlang der Profillängsachse auftreten, untersucht. Die Untersuchung erlaubt Rückschlüsse auf Anforderungen an eine Prozessregelung. Zusätzlich dient sie aber auch als Basis für Testdaten von Profileigenschaften, die neben Sprungfunktionen eingesetzt werden, um die Prozessregelungen zu untersuchen. Im Anschluss werden die Anforderungen an die Testumgebung definiert. Darauf aufbauend wird eine Systemstruktur der Testumgebung vorgestellt und deren Komponenten mit ihren Funktionalitäten beschrieben. Nachdem die Testumgebung eingeführt wurde, wird die betrachtete Prozessregelung vorgestellt und mittels des virtuellen Prototyps untersucht und validiert. Abschließend erfolgt die Untersuchung am realen Biegeprozess. Sie stellt dar, wie die Testumgebung flexibel an einen realen Versuchsaufbau angekoppelt werden kann und wie sich die Prozessregelungen im realen Biegeprozess verhalten.

Kapitel 4

Schwankungen von Halbzeugeigenschaften

Für den Aufbau einer Prozessregelung für das Drei-Rollen-Biegen ist eine genaue Kenntnis von Geometrie- und Werkstoffeigenschaften der verwendeten Halbzeuge vorteilhaft, da diese beim Aufbau der Regelung berücksichtigt werden müssen. Im Abschnitt 2.2 wurden die Profilhälfte hinsichtlich ihrer Fertigungsverfahren, Querschnittsvielfalt und auch der technischen Lieferbedingungen vorgestellt. Gerade für die Prozessregelung ist aber auch wichtig, inwieweit die Profileigenschaften entlang der Profillängsachse Schwankungen unterliegen. Innerhalb des Querschnitts kann die Streckgrenze in einem kaltgebogenen L- bzw. U-Profil (Werkstoff St 52-3) durch die Kaltverfestigung beispielsweise Werte im Bereich von 450-570 MPa bzw. 320-480 MPa annehmen [86, 87], Bild 4.1.

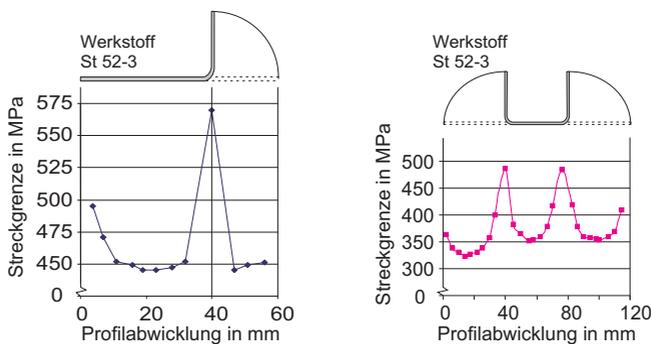


Abbildung 4.1: Veränderung der Streckgrenze im Querschnitt von kaltgebogenen Profilen

Wenn Schwankungen auch entlang der Profillängsachse auftreten, ist es relevant, ob sich diese Schwankungen in einem Profilschnitt von 200 mm oder von 2000 mm ausbilden. Bei

Veränderungen mit kleinem Gradienten kann eine Regelung auf Basis der entlasteten Profilkrümmung immer noch ausreichend genau sein, während sie bei großen Gradienten ungeeignet ist. Im letzteren Fall können die Profileigenschaften, die zu der gemessenen entlasteten Profilkrümmung geführt haben, sich derart verändert haben, dass die Stellgrößenänderung der Regelung eine Erhöhung der Rollenzustellung vornimmt, obwohl die aktuellen Profileigenschaften in der Umformzone eine Verringerung notwendig machen. Neben dem Verlauf der Eigenschaftsschwankungen ist auch relevant, ob die Schwankungen rein zufällig sind oder ob Regelmäßigkeiten auftreten. Unterliegen die Schwankungen einer Regelmäßigkeit, kann die Prozessregelung erweitert werden, sodass diese im Biegeprozess erkannt werden und darauf reagiert wird.

Um für Standardprofile ein Bild von den Schwankungen der Profileigenschaften und insbesondere deren Verlauf entlang der Profillängsachse zu erhalten, wurden drei verschiedene Aluminiumprofile aus EN-AW 6060 [AlMgSi] und drei verschiedene Stahlprofile aus S 235 JR, Tabelle 4.1, hinsichtlich ihrer Eigenschaften untersucht.

Aluminium EN-AW 6060 [AlMgSi]		
U-Profil (stranggepresst)	Vierkantprofil (stranggepresst)	L-Profil (gebogen)
 20x20x2 mm	 30x30x2 mm	 40x40x1 mm
Stahl S 235 JR		
Vierkantprofil (walzprofil.)	T-Profil (warmgewalzt)	Flachprofil (kaltgezogen)
 30x15x2 mm	 25x25x2 mm	 20x5 mm

Tabelle 4.1: Herstellverfahren und Querschnittsmaße der untersuchten Profile

Dabei wurden von jeder Profilgeometrie die Profileigenschaften

- E-Modul,
- Dehngrenze $R_{p0.2}$,
- Zugfestigkeit,
- Eigenspannung (Vergleichsspannung und Hauptspannungswinkel),
- Profildicke bzw. Wandstärke und
- Verwindung

betrachtet. Die geometrischen Profileigenschaften wurden auf Basis der Messergebnisse einer 3D-Koordinatenmessmaschine Zeiss PRISMO VAST 5 HTG und einer Probenlänge von ca. 600 mm ermittelt. Die Werkstoffkennwerte wurden anhand von jeweils drei Zugversuchen nach DIN EN 10002 [88] und die Eigenspannungen anhand von zwei Messungen nach dem Bohrlochverfahren [89] bestimmt. Die jeweiligen Messorte können dem Anhang A entnommen werden. Die Untersuchung gibt einen Eindruck der bestehenden Eigenschaften wieder. In Bild 4.2 werden die Abweichungen vom Mittelwert pro Profil und Eigenschaft zusammengefasst dargestellt. Eine Übersicht über die Absolutwerte kann der Tabelle A.1 entnommen werden.

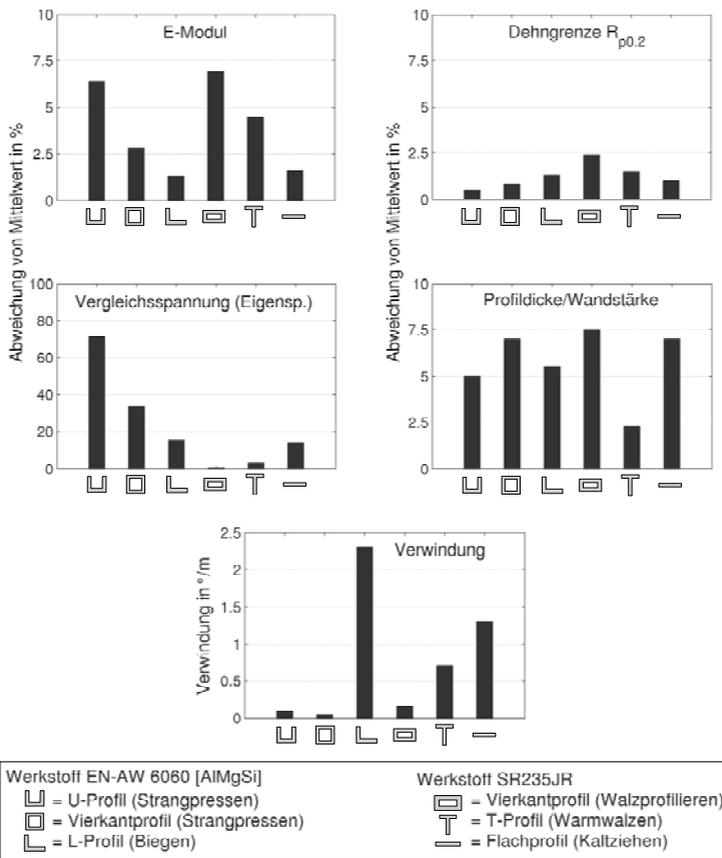


Abbildung 4.2: Schwankungen der Profileigenschaften der untersuchten Profilhalbzeuge

Die Abweichungen des E-Moduls liegen beim L- und Flachprofil bei ca. 2 %, während sie beim walzprofilierten Vierkantprofil jedoch bis zu 7 % beträgt. Da der E-Modul direkt die Rückfederung beeinflusst, führen diese Schwankungen auch direkt zu einer Schwankung der resultierenden Krümmung beim gebogenen Profil. Im Gegensatz dazu variiert die Dehngrenze kaum; sie liegt bei allen untersuchten Profilen bei unter 2,5 %. Betrachtet man die ermittelten Vergleichseigenspannungen, so variieren diese z.T. erheblich. Bei den Aluminiumprofilen sind die Schwankungen besonders hoch, doch die Absolutwerte liegen unter 20 MPa und somit innerhalb der Messunsicherheit der gemessenen Profile. Bei den Stahlprofilen sind die Schwankungen bei den Vergleichsspannungen vergleichsweise niedrig, allerdings sind die Absolutwerte hoch und liegen zwischen 140-282 MPa. Somit ist der Einfluss der Eigenspannungen entlang der Profillängsachse bei den meisten Profilen eher als konstant anzusehen. Die Abweichung bei den Wandstärken liegt in der Regel über 5 %. Gerade in Verbindung mit der Verwindung und weiteren Formabweichungen ergeben sich dadurch während des Biegeprozesses kontinuierliche Veränderungen in der Umformzone und somit Veränderungen beim Biegeergebnis. Die Ergebnisse lassen erkennen, dass bereits in einem Profillabschnitt von 500 mm die Profileigenschaften Schwankungen unterliegen, die einen Einfluss auf das Biegeergebnis haben. Des Weiteren zeigt sich, dass die Abweichungen auch zwischen den untersuchten Profilen stark variieren, wobei diese jeweils auf die verfahrensspezifischen Eigenschaften der Halbzeugherstellverfahren zurückzuführen sind. Da Prozessregelungen aber nicht auf ein begrenztes Halbzeugspektrum festgelegt sein sollen, müssen sie diese Varianz abdecken können.

Da die untersuchten Proben mit einer Länge von unter 900 mm relativ kurz waren, wurde zusätzlich ein 3000 mm langes Vierkantprofil 40x40x2 mm aus Aluminium EN-AW 6060 [AlMg-Si] in vier Segmente der Länge 750 mm unterteilt und bzgl. der Profileigenschaften Wandstärke, E-Modul, Dehngrenze $R_{p0,2}$ und Fließkurve untersucht. Bei der Untersuchung wurden jeweils die beiden Seitenwände des Profils betrachtet, wobei auf beiden Seiten 16 kurze Proben für den Zugversuch nach DIN EN 10002 [88] entnommen wurden. Die Wandstärke wurde im Abstand von 20 mm über dem Boden entlang der Profillängsachse gemessen. In der Tabelle 4.2 sind die Werte für die linke und rechte Seitenwand aufgeführt. Die aufgenommenen Verläufe der Eigenschaftsschwankungen wurden auch zum Aufbau von Testdatensätzen verwendet, die innerhalb der Testumgebung zur Validierung der untersuchten Prozessregelungen benötigt wurden.

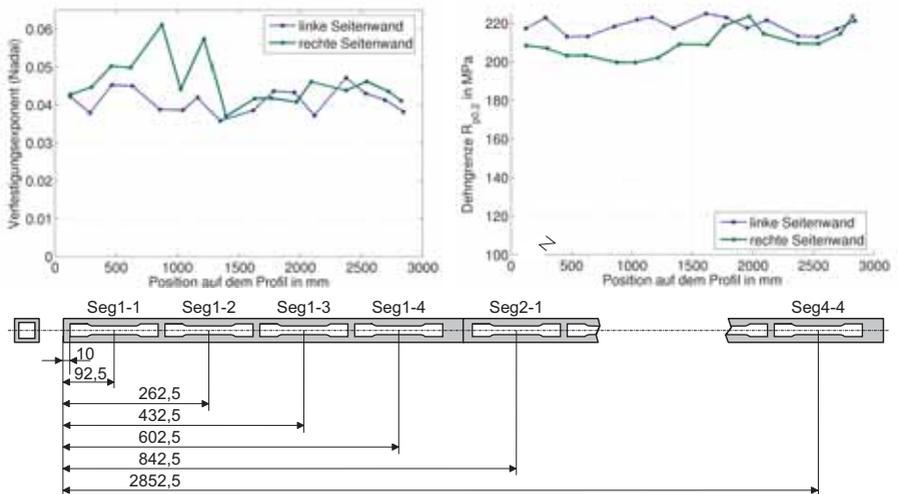
Es zeigt sich, dass die Schwankung der Wandstärke bei dem längeren Profil relativ gering ist. Anders sieht es bei dem Verfestigungsexponenten aus der Fließkurvenapproximation nach

	Wandstärke in mm		Verfest.-Exponent		Dehngrenze $R_{p0,2}$ in MPa	
	links	rechts	links	rechts	links	rechts
Minimum	2,02	1,99	0,0358	0,0370	212,8	199,6
Mittelwert	2,06	2,08	0,0411	0,0458	218,6	209,6
Maximum	2,13	2,15	0,0472	0,0612	225,0	223,6
Std.-abweich. σ	0,009	0,016	0,00333	0,00623	4,1	7,6
Abweichung	3,7 %	4,5 %	14,8 %	33,6 %	2,9 %	6,7 %

Tabelle 4.2: Statistische Daten des Vierkantprofils 40x40x2 mm für die linke und rechte Seitenwand (Abweichung \equiv max. Abweichung vom Mittelwert)

Nadai ($k_f = C_N \varphi^{n_N}$) aus, siehe Bild 4.3.

Vierkantprofil 40x40x2 mm, EN-AW 6060, stranggepresst



Seg1-1: Zugprobe 1 in Segment 1
Segmentlänge: 750mm

Abbildung 4.3: Verlauf des Verfestigungsexponenten (Approx. nach Nadai) und der Dehngrenze $R_{p0,2}$ bei einem Vierkantprofil

Bei ihm tritt am Anfang in der rechten Seitenwand eine starke Erhöhung ein, die sich allerdings in der linken Seitenwand nicht wiederfinden lässt und wohl dementsprechend auf

eine Besonderheit beim Abkühlen bzw. der Lagerung des Profils zurückzuführen ist.

Im Vergleich zu den Verfestigungsexponenten zeigt die Dehngrenze $R_{p0,2}$ einen anderen Verlauf, siehe Bild 4.3. Bei den Messwerten der linken Seitenwand ist die maximale Abweichung mit 2,9 % relativ gering. Des Weiteren lässt der Verlauf auch keine Tendenz erkennen. Der Verlauf der Dehngrenze $R_{p0,2}$ bei der rechten Seitenwand gibt ein anderes Bild. Die maximale Schwankung ist mit 6,7 % vergleichsweise hoch und der Verlauf lässt auch eine ansteigende Tendenz erkennen. Während die Dehngrenzen der linken und rechten Seitenwand sich vom Profilanfang bis kurz nach der Mitte unterschieden, ähneln sie sich anschließend in Wert und Verlauf bis zum Profilende. Auch wenn in der Gesamtheit die Dehngrenze tendenziell leicht ansteigt, ist eine Regelmäßigkeit bei den Verläufen jedoch nicht erkennbar.

Die Schwankungen der Wandstärke sind bei dem untersuchten Profil eher gering. Es wurde jedoch auch nur an zwei Stellen des Profils die Wandstärke bestimmt, da die Untersuchung vornehmlich der Bestimmung des Wandstärkenverlaufs entlang der Profillängsachse galt. Das Bild 4.4 zeigt den Wandstärkenverlauf der Segmente 2-4 der rechten Seitenwand. Auch bei ihm lassen sich keine Regelmäßigkeiten erkennen.

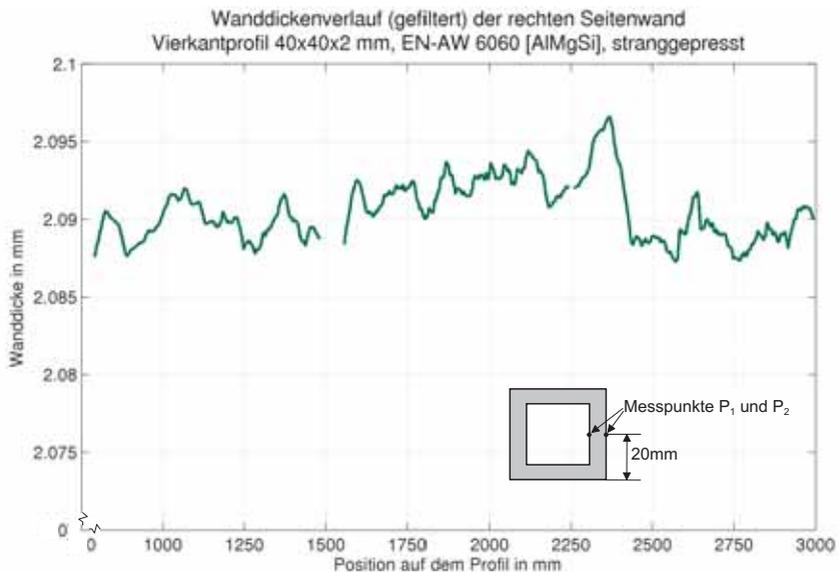


Abbildung 4.4: Verlauf der Wanddicke bei der rechten Seitenwand eines Vierkantprofils

Auch wenn die Untersuchungen nur eine Momentaufnahme wiedergeben, lassen sie jedoch erkennen, dass bei den Halbzeugeigenschaften bereits in kurzen Profilschnitten entlang der Profillängsachse große Schwankungen auftreten können. Regelmäßigkeiten sind bei den Schwankungen allerdings nicht erkennbar. Des Weiteren variieren die Halbzeugeigenschaften auch innerhalb des Profilquerschnitts bei einer festen Position auf der Profillängsachse, wie die Verläufe bei der linken und rechten Seitenwand des Vierkanthohlprofils 40x40x2 mm gezeigt haben. Dies bedeutet, dass sich die Schwankungen durch eine Überlagerung aufheben oder verstärken können. In der Summe führt dies in der Umformzone zu ständig variierenden, den Biegeprozess bestimmenden Größen und somit auch zu einer Variation des Biegeergebnisses. Aus diesem Grund ist es für die Prozessregelung entscheidend, dass ihr Prozessgrößen aus der Umformzone zur Verfügung stehen, die einen Rückschluss auf die aktuellen Halbzeugeigenschaften in der Umformzone ermöglichen.

Kapitel 5

Trobec-Testumgebung

Die Testumgebung für Prozessregelungen für das Drei-Rollen-Biegen soll die Entwicklung von Prozessregelungen unterstützen, wobei vornehmlich die Durchführung von zeitaufwendigen und Maschinen- und Personalressourcen bindenden realen Testfertigungen minimiert werden soll. Aus dieser Zielsetzung ergeben sich verschiedene Anforderungen an eine derartige Testumgebung. Diese werden im folgenden Abschnitt aufgestellt. In den darauf folgenden Abschnitten wird schließlich das Modell der Testumgebung mit seinen Komponenten in seiner Struktur und der Umsetzung vorgestellt.

5.1 Anforderungen an die Testumgebung

Die Reduzierung von realen Testfertigungen wird durch eine virtuelle Umgebung realisiert, in der der Drei-Rollen-Biegeprozess simulationstechnisch abgebildet wird. In ihr können für eine Biegeaufgabe unter Vorgabe einer Prozessregelung Biegungen virtuell durchgeführt werden, wobei der Prozessregelung die notwendigen Prozessgrößen zur Verfügung gestellt werden, siehe Bild 5.1. Des Weiteren ist die Testumgebung so zu gestalten, dass der Übergang von der virtuellen in die reale Umgebung direkt erfolgen kann. Für die Prozessregelung ist es dabei transparent, ob die generierte Stellgröße für den simulierten oder realen Biegeprozess bestimmt ist. Um einen derartigen virtuellen Drei-Rollen-Biegeprozess zu realisieren, wird eine Prozesssimulation des Drei-Rollen-Biegeprozesses benötigt, die unter Vorgabe eines Profilhalbzeugs, einer Maschinen- und Werkzeugspezifikation und einer Stellgröße die gebogene Profilkontur bestimmt. Damit die Prozessregelung in den Biegeprozess eingreifen kann, muss die Prozesssimu-

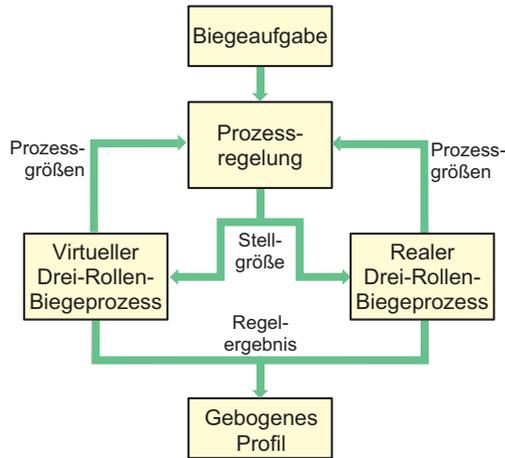


Abbildung 5.1: Grundsätzliche Struktur der Testumgebung

lation ebenfalls alle notwendigen Prozessgrößen berechnen können und der Prozessregelung zur Verfügung stellen. Die wichtigsten Prozessgrößen beim Drei-Rollen-Biegen können dem Bild 5.2 qualitativ entnommen werden. Bestimmend für den Biegeprozess sind als Eingangsgrößen die

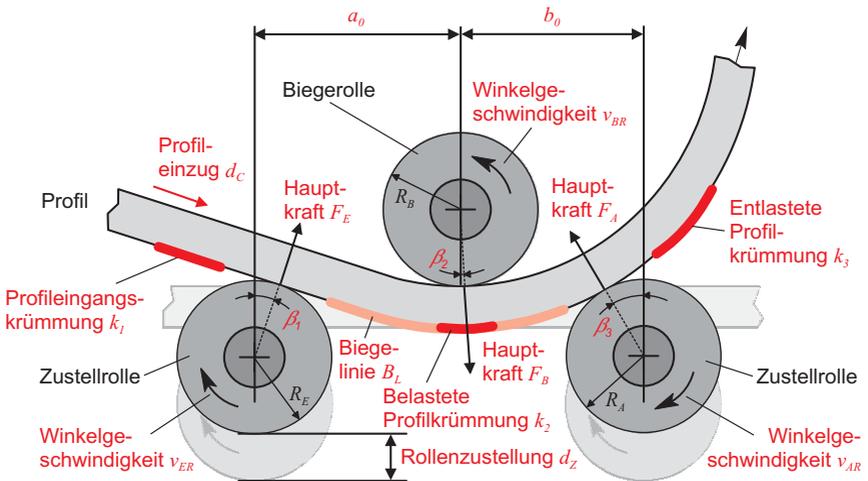


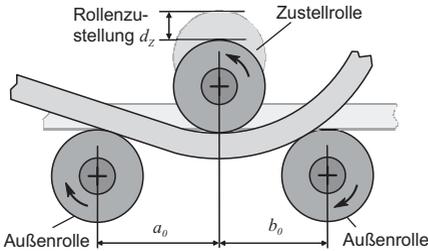
Abbildung 5.2: Qualitative Darstellung der Prozessgrößen beim Drei-Rollen-Biegen

Profileingangskrümmung k_1 und die geometrische Anordnung der Rollen zueinander. Diese wird definiert durch die Rollenzustellung d_Z , die Rollradien R_E , R_B und R_A (mit E: Eingangsrolle, B: Biegerolle, A: Ausgangsrolle) und die Abstände zwischen der Eingangs- und der Biegerolle a_0 und zwischen der Biege- und Ausgangsrolle b_0 . Als weitere Eingangsgrößen sind noch die Winkelgeschwindigkeiten der angetriebenen Rollen v_{ER} , v_{BR} und v_{AR} zu nennen. Aus ihnen und dem tribologischen System zwischen dem Profil und den Rollen ergibt sich der Profileinzug d_C , der insbesondere für die Biegung von Radienverläufen relevant ist. Die Messung von relevanten Halbzeugeigenschaften, wie z.B. Streckgrenze oder Wandstärkenänderungen, ist während des Biegeprozesses nicht direkt möglich. Die Vielfalt an Profilquerschnitten ist sehr groß, sodass für jedes Profil ein Spezielsensor zur Messung der Wandstärke notwendig wäre. Des Weiteren können Messungen auch nur bei offenen Profilquerschnitten an zugänglichen Stellen vorgenommen werden. Dies sind dann punktuelle Messungen, die nicht für den gesamten Profilquerschnitt gelten. Einen Rückschluss auf den aktuellen Biegeprozess und somit die Halbzeugeigenschaften in der Umformzone erlauben als Zustandsgrößen die Hauptkräfte F_E , F_B und F_A an den Rollen und Biegelinie B_l des Profils in der Umformzone. Aus der Hauptkraft F_B an der Biegerolle kann beispielsweise mit Kenntnis der Kontaktwinkel β_1 und β_3 des Profils mit den Rollen das Biegemoment M_B berechnet werden, das in der Umformzone wirkt. Aus der Biegelinie kann die belastete Profilkrümmung k_2 unter der Biegerolle bestimmt werden, sodass für die Erkennung von Schwankungen bei den Halbzeugeigenschaften das Biegemoment M_B und die belastete Profilkrümmung k_2 zur Verfügung stehen. Als wichtigste Ausgangsgröße erhält man letztendlich die entlastete Profilkrümmung k_3 . Da der Übergang vom virtuellen zum realen Biegeprozess direkt erfolgen soll, muss die Prozesssimulation ausreichend schnell die Prozessgrößen zwischen zwei Regelschritten generieren können. Eine weitere Anforderung an die Prozesssimulation ist die Unterstützung der beim Drei-Rollen-Biegen hauptsächlich vertretenen Maschinenkinematiken, siehe Bild 5.3. Bei der Variante a) behalten die Außenrollen während des Biegeprozesses einen festen Abstand und die Rollenzustellung erfolgt über die Zustellung der Mittelrolle. Bei der Variante b) dagegen behält die Mittelrolle eine fixe Position und die Rollenzustellung erfolgt über die Außenrollen, die an Schwenkarmen montiert um einen zentralen Drehpunkt rotieren.

Die Untersuchung von Prozessregelungen in der Testumgebung setzt voraus, dass der virtuelle Biegeprozess mit Störungen belastet werden kann, die beim realen Biegeprozess auftreten können. Eine Beschreibung möglicher Störgrößen bei den Halbzeugeigenschaften kann dem Abschnitt 2.2.2 zur Qualität von Profihalbzeugen entnommen werden. Die Definition der Stör-

Rollenzustellung erfolgt über Positionierung der

a) Mittelrolle



b) Außenrollen

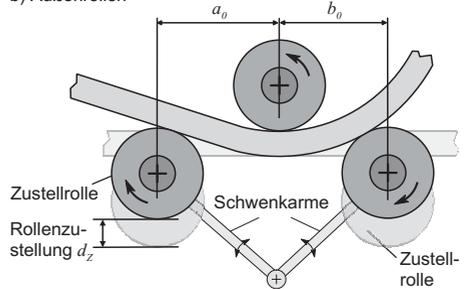


Abbildung 5.3: Maschinenkinematiken beim Drei-Rollen-Biegen

größen muss entlang der Profillängsachse frei und separat erfolgen können. Dies ermöglicht die Definition von Sprungfunktionen, mit denen das Verhalten der Prozessregelung auf einzelne Störgrößen gezielt betrachtet werden kann. Werden mehrere Störgrößen parallel definiert, müssen alle betrachtet werden und sich ihr Einfluss auf den Biegeprozess überlagern.

Das Hauptziel der Testumgebung besteht in der Untersuchung von Prozessregelungen, so dass dementsprechend verschiedene Regelungen einfach in die Testumgebung integriert und ihre Leistungsfähigkeit untersucht und verglichen werden können. Aus diesem Grund müssen Basisregler zur Verfügung gestellt werden, die bei Bedarf erweitert werden können. Daneben müssen aber auch komplett neue Prozessregelungen aufgenommen werden können. Da Prozessregelungen nach Abschnitt 2.4.1 viel Rechenbedarf haben können, ist darauf zu achten, dass die Testumgebung möglichst schonend mit den Prozessor- und Speicherressourcen umgeht.

Abschließend ist bei der Handhabung der Testumgebung darauf zu achten, dass sie sowohl komplett parametrisiert über die Befehlszeile des Betriebssystems (= Backend) wie auch interaktiv über eine Benutzungsoberfläche angesteuert und bedient werden kann. Die Umsetzung als Backend erlaubt eine vollständige Parametrisierung der Testumgebung über eine Eingabedatei und/oder Angaben von Kommandozeilenparametern beim Aufruf des Programms. Dies ermöglicht den einfachen Aufruf der Testumgebung aus einem Programm, wodurch automatisiert Parametervariationen durchgeführt werden können. Um diese im Nachhinein auswerten zu können, müssen alle relevanten Daten während des Programmablaufs aufgenommen und gespeichert werden können.

Zusammenfassend ergibt sich aus dem soeben Beschriebenen der folgende Anforderungskatalog:

1. Definition der Halbzeugbeschreibung (Profilquerschnitt, Werkstoff)
2. Definition der Zielkontur
3. Angabe der Maschinen- und Werkzeugbeschreibung mit Unterstützung der Maschinenkinematiken
 - (a) Zustellung mittels rotierender Außenrollen
 - (b) Zustellung mittels geradliniger Zustellung der Mittelrolle
4. Abbildung des realen in einen virtuellen Biegeprozess, der alle notwendigen Prozessgrößen zur Verfügung stellt und eine freie Definition von Schwankungen bei den Halbzeugeigenschaften
 - Profilquerschnitt,
 - Streckgrenze,
 - E-Modul und
 - Fließkurveentlang der Profillängsachse unterstützt
5. Einfache Integration von Prozessregelungen und Bereitstellung von Basisreglern
6. Die Testumgebung ist prozessor- und speicherschonend auszulegen, damit ausreichend Ressourcen für eine Realisierung in Echtzeit zur Verfügung steht
7. Realisierung der Testumgebung als Backend und basierend auf einer Benutzungsoberfläche
8. Komplette Archivierung von auftretenden Daten
9. Die Testumgebung arbeitet sowohl mit dem realen wie auch dem virtuellen Biegeprozess

5.2 Module der Testumgebung

Die Umsetzung des Anforderungskatalogs in eine Testumgebung beginnt mit der Entscheidung, ob diese auf ein System zum Aufbau von Testumgebungen wie z.B. Matlab, siehe Abschnitt 2.5, aufsetzt oder als komplett eigenständige Anwendung realisiert werden soll. Beide Alternativen weisen eigene Vorteile aus. Systeme zum Aufbau von Testumgebungen unterstützen den Anwender mit vielen vorhandenen Modulen und Schnittstellen zu Hardwarekomponenten, Programmierschnittstellen und auch Reglerkomponenten, auf deren Basis das eigene System entwickelt werden kann. Um diese Funktionalität zu erreichen, müssen sie einen generischen Aufbau haben, der automatisch zu einem zusätzlichen Bedarf an Prozessorressourcen führt. Dagegen kann eine eigenständige Anwendung auf genau die notwendigen Funktionalitäten reduziert werden, sodass eine optimale Ausnutzung der Prozessor- und Speicherressourcen erzielt werden kann.

Die Auswahl einer Alternative wird demnach maßgeblich davon abhängen, wie viele Komponenten von bestehenden Systemen verwendet werden können und wie der Ressourcenbedarf einzuschätzen ist. Aus dem Anforderungskatalog ist ersichtlich, dass viele Komponenten wie der virtuelle Biegeprozess, die Anbindung an die Eingabedaten und den realen Biegeprozess und die Umsetzung der Testumgebung mit Benutzungsoberfläche und als Backend eine spezielle Umsetzung notwendig machen und demnach nur beschränkt auf bestehende Komponenten zurückgegriffen werden kann. Vorteile können bei der Verwendung von Basisreglern und bei der Visualisierung gesehen werden, wenn auf ein bestehendes System aufgesetzt wird.

Für den Aufbau der Testumgebung für das Drei-Rollen-Biegen wurde der Weg einer eigenständigen Anwendung gewählt, da viele Komponenten der Testumgebung von bestehenden Systemen nicht bereitgestellt werden und neu realisiert werden müssen. Von bestehenden Systemen wie Matlab würden im Großen und Ganzen nur Basisfunktionalitäten verwendet werden, sodass aus Gründen der Ressourcenschonung eine eigenständige Anwendung vorzuziehen ist. Die erstellte Testumgebung wird im Folgenden Trobec-Testumgebung genannt, wobei Trobec als Abkürzung für **Three-Roll-Bending Control** steht.

Im Bild 5.4 wird der grundsätzliche Aufbau der Trobec-Testumgebung dargestellt. Die Software wurde objektorientiert und dabei vornehmlich in der Programmiersprache C++ realisiert. Als Basis der Trobec-Testumgebung dienen die Softwarebibliotheken:

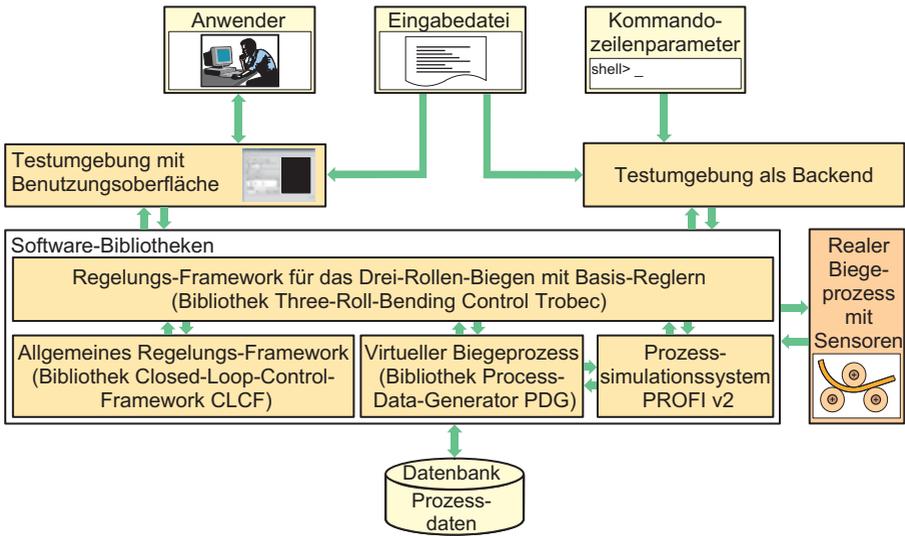


Abbildung 5.4: Modularer Aufbau der Testumgebung

Closed-Loop Control Framework (CLCF) realisiert Grundfunktionalitäten, die für den Ablauf und generischen Datenfluss in einer Prozessregelung benötigt werden.

Profile Bending Simulation (PROFI-V2) Das Prozesssimulationssystem ermöglicht die Berechnung von Prozessgrößen, z.B. die Rollenzustellung, für das Drei-Rollen-Biegen. Die verwendete Bibliothek ist eine Erweiterung der von Chatti [24] realisierten Version.

Three-Roll-Bending Process Data Generator (PDG) Die Bibliothek PDG ermöglicht die Simulation des Drei-Rollen-Biegeprozesses, wobei definierte Schwankungen bei den Halbzeugeigenschaften berücksichtigt werden können.

Three-Roll-Bending Control (Trobec) Die Bibliothek Trobec stellt eine Testumgebung mit Basisreglern bereit, mit denen Prozessregelungen an einem virtuellen und einem realen Drei-Rollen-Biegeprozess untersucht werden können.

Letztendlich führt die Spezialisierung der Bibliothek CLCF für das Drei-Rollen-Biegen und die Integration der Bibliotheken PDG und PROFI-V2 zu der Bibliothek *Three-Roll-Bending Control (Trobec)*. Sie ermöglicht die Anbindung an den Versuchsstand der Drei-Rollen-Biegemaschine

mit den Sensoren und beinhaltet die notwendigen Basisregler. Das Hinzufügen weiterer Regler kann durch eine weitere Spezialisierung der Bibliothek Trobec erfolgen. Die Umsetzung der Testumgebung in Versionen mit Benutzungsoberfläche und als Backend erfolgt in separaten Programmen, wobei beide die notwendigen Eingabedaten jedoch aus derselben Eingabedatei lesen und die Prozessdaten auch im selben Format speichern. Spezielle Kontrolleinstellungen können jeweils mittels Benutzungsoberfläche bzw. mittels Kommandozeilenparametern beim Backend vorgenommen werden. In den folgenden Abschnitten werden die Softwarekomponenten bzgl. ihrer Aufgabe und Konzeption vorgestellt.

5.3 Closed-Loop Control Framework (CLCF)

Closed-Loop Control Framework (CLCF) ist eine objektorientierte Software-Bibliothek, die in C++ [90] geschrieben ist. Sie stellt ein Framework zur Erstellung von Prozessregelungen zur Verfügung, dessen Struktur und Komponenten dem Bild 5.5 entnommen werden können. Das

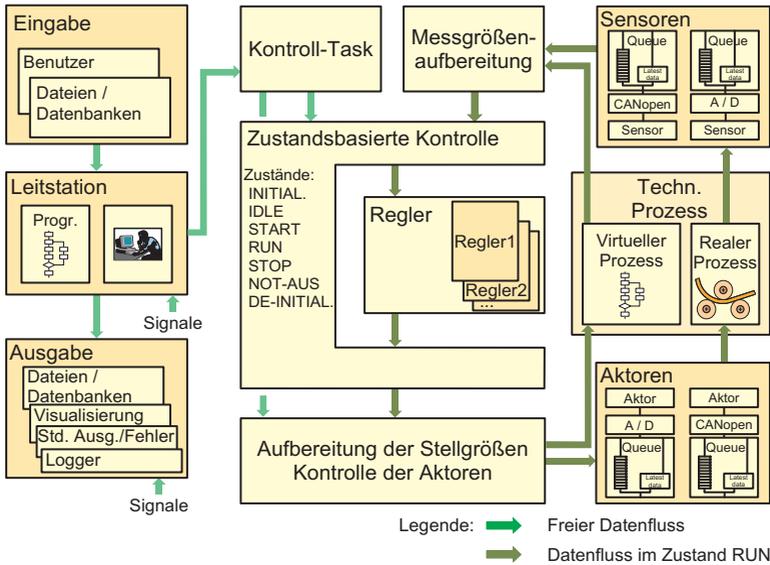


Abbildung 5.5: Struktur und Komponenten der Software-Bibliothek *Closed-Loop Control Framework (CLCF)*

Regelungs-Framework arbeitet zustandsbasiert, wobei es die sieben Zustände INITIALISIERUNG, IDLE, START, RUN, STOP, DEINITIALISIERUNG, NOT-AUS einnehmen kann. Die Kontrolle und mögliche Wechsel der Zustände werden von der Komponente *Kontroll-Task* vorgenommen, und die Aktionen in den einzelnen Zuständen werden von der Komponente *Zustandsbasierte Kontrolle* umgesetzt. Nach dem Start eines Testlaufs beginnt das Framework mit dem Startzustand *INITIALISIERUNG*. Nach notwendigen Initialisierungen, z.B. Reset des Zeitgebers, wird automatisch in den *IDLE*-Zustand gewechselt. In ihm werden keine Aktionen durchgeführt. Wenn der Durchlauf durch die Regelungsschleife vom Kontroll-Task initiiert wird, wird in den *Start*-Zustand gewechselt. Dieser führt einmalige Aufgaben wie z.B. das Starten von Hintergrundprozessen durch und wechselt im Anschluss automatisch in den *RUN*-Zustand. In ihm werden nach einem vorgebbaren Zeitraster die Komponenten

1. Messgrößenaufbereitung,
2. Regler und
3. Aufbereitung der Stellgrößen / Kontrolle der Aktoren

nacheinander aufgerufen. Die Komponente *Messgrößenaufbereitung* erfragt die aktuellen Prozessgrößen vom Drei-Rollen-Biegeprozess. Beim realen Biegeprozess werden diese von der Komponente *Sensoren* bereitgestellt, während sie beim virtuellen Biegeprozess direkt von diesem zur Verfügung gestellt werden. Des Weiteren wird durch die Komponente *Messgrößenaufbereitung* die Berechnung von Referenzwerten für die verschiedenen Prozessgrößen durch PROFILV2 für die aktuelle Profilposition initiiert. Die gemessenen Prozessgrößen und die berechneten Referenz-Prozessgrößen werden an die Komponente *Regler* weitergereicht. In ihr sind die Regler repräsentiert, wobei der ausgewählte Regler anhand der Prozessgrößen die Stellgrößen berechnet. Diese werden an die Komponente *Aufbereitung der Stellgrößen / Kontrolle der Aktoren* geleitet, die die Stellgrößen aufbereitet und sie beim realen Biegeprozess an die Komponente *Aktoren* bzw. beim virtuellen Biegeprozess direkt an diesen übergibt. Somit wird im *RUN*-Zustand die Regelungsschleife

1. Daten von der Messeinrichtung lesen und aufbereiten,
2. Berechnung der Stellgrößen durch den Regler und
3. Kontrolle der Stelleinrichtung

durchlaufen. Damit die CLCF-Bibliothek an die verschiedensten Szenarien beim Drei-Rollen-Biegen angepasst werden kann, sind die Komponenten vornehmlich als C++-Templates [90] realisiert. Dieses sind konfigurierbare Basisklassen, die durch Angabe von drei Datenspezifikationen vervollständigt werden. In der CLCF-Bibliothek entsprechen diese Datenspezifikationen Angaben für

Statische Daten: Daten, die sich während der Prozessregelung nicht ändern und zu denen z.B. die Halbzeugbeschreibung und die Zielkontur gerechnet werden,

Prozessgrößen: Mess- und Zustandsgrößen, die Eingangsdaten für einen Regelungsschritt darstellen, und

Stellgrößen: Rollenzustellung als Ergebnisgröße des Reglers und der Profileinzug mit der dazugehörigen Profileinzugsgeschwindigkeit.

Um die Integration von neuen Reglern in die Trobec-Testumgebung zu erleichtern, stellt die Bibliothek CLCF eine Basisklasse für Regler zur Verfügung. In dieser ist eine Funktion definiert, der die Daten

1. gemessene und aufbereitete Prozessgrößen,
2. Referenz-Prozessgrößen,
3. Differenz zwischen gemessenen Prozessgrößen und den Referenz-Prozessgrößen und
4. statische Daten

zur Verfügung gestellt werden und deren Rückgabewert die aktualisierten Stellgrößen sind. Durch Nachfahrenbildung dieser Basisklasse und Spezialisierung der Funktion werden neue Regler in die Trobec-Testumgebung aufgenommen.

Bei der Konzeption der Trobec-Testumgebung wurde darauf geachtet, dass die Modellierung unabhängig von Interaktionen mit dem Anwender und der Visualisierung erfolgt. Dies führt zu einer klaren Modulstruktur, die untereinander wenig Abhängigkeiten besitzt und sich somit leicht erweitern und portieren lässt. Eine entsprechende Vorgehensweise wird durch die MVC-Architektur (Model-View-Controller) [91,92] realisiert. Darin erfolgt in der Modell-Komponente

die Modellierung der Aufgabenstellung und die entsprechende Datenhaltung komplett entkoppelt von der Interaktion mit dem Anwender (Controller-Komponente) und der Visualisierung und dem Aufzeichnen der Daten (View-Komponente). Da das Modell keine Kenntnisse von den View-Komponenten hat, werden Änderungen im Modell durch das Verschicken von Signalen bekannt gemacht. Die einzelnen View-Komponenten können sich jeweils an die für sie wichtigen Signale koppeln und somit alle relevanten Änderungen des Modells erkennen und entsprechend visualisieren. Dieser Mechanismus ist sehr „mächtig“, da so eine vielfältige Visualisierung und Aufzeichnung der Daten transparent möglich ist, ohne dass in die Modellierung eingegriffen werden muss. Die folgende Aufstellung gibt eine Zuordnung der Komponenten der CLCF-Bibliothek zu den Komponenten der MVC-Architektur wieder:

- Modell
 - Zustandsbasierte Kontrolle,
 - Messgrößenaufbereitung,
 - Sensoren,
 - Technischer Prozess,
 - Aufbereitung der Stellgrößen / Kontrolle der Aktoren und
 - Aktoren.
- Controller
 - Leitstation
 - Kontroll-Task
- View
 - Ausgabe

5.4 Prozesssimulationssystem PROFI-V2

Das halbanalytische Prozesssimulationssystem PROFI-V2 für das Drei-Rollen-Biegen ist eine weitere Software-Bibliothek, die innerhalb der Trobec-Testumgebung eingesetzt wird. Sie ist eine Erweiterung des halbanalytischen Prozesssimulationssystems PROFI, das von Chatti [24]

entwickelt wurde. Dieses ist jedoch auf Drei-Rollen-Biegemaschinen in Pyramidenbauweise beschränkt, bei denen die Rollenzustellung über die Mittelrolle erfolgt und die Abstände der Außenrollen zur Mittelrolle a_0 und b_0 vor dem Biegeprozess fest eingestellt werden, siehe Bild 5.3 links. Für die Anwendung innerhalb der Testumgebung wurde PROFIL um die Maschinenkinematik erweitert, bei der die Rollenzustellung mittels drehbarer Außenrollen erfolgt, siehe Bild 5.3 rechts. Die Berücksichtigung dieser Maschinenkinematik hat zur Folge, dass sich mit einer Veränderung der Rollenzustellung d_Z die Abstände a_0 und b_0 und dementsprechend auch die Kräfteverhältnisse ändern. Der Algorithmus von PROFIL ist für eine derartige Maschinenkinematik nicht geeignet. Des Weiteren wird in PROFIL zur Bestimmung der Biegelinie der belastete Profilabschnitt durch einen geraden, vollständig elastischen Biegebalken ersetzt. Dies führt gerade bei größeren Abständen der Außenrollen zu einem Fehler bei der Berechnung der Rollenzustellung, da die Biegelinie als kreisförmig angenommen wird. Aus diesen Gründen wurde die Berechnung der Rollenzustellung durch ein Verfahren ersetzt, das beide Maschinenkinematiken berücksichtigt und zur Erhöhung der Genauigkeit eine Segmentierung der belasteten Biegelinie vornimmt.

Ausgangspunkt der Berechnung der Rollenzustellung sind die bekannten Krümmungen k_1 und k_3 des Profils an der Eingangs- und an der Ausgangsrolle. Des Weiteren wird die von PROFIL-V2 berechnete Profilkrümmung unter Last k_2 , die sich am Kontaktpunkt des Profils mit der Mittelrolle einstellen muss, benötigt, Bild 5.6.

Die Bestimmung der Biegelinie folgt dem Prinzip, das bei Prozesssimulationen für das Freibiegen im Gesenk angewendet wird [93]. Das ungebogene Profil wird entlang der Profillängsachse in Segmente unterteilt, für jedes Segment wird das darauf wirkende Biegemoment berechnet, die dazugehörige Krümmung bestimmt und die einzelnen Kreisbogensegmente zu einer Biegelinie geometrisch addiert. Als Ergebnis erhält man eine Biegelinie entsprechend Bild 5.7. Da die Kontaktwinkel zwischen dem Profil und den Rollen β_1 , β_2 und β_3 von dem Biegelinienverlauf abhängen, der Biegelinienverlauf aber von den Abständen zwischen den Kontaktpunkten a_2 und b_2 und somit von den Kontaktwinkeln abhängt, erfolgt eine iterative Berechnung der Rollenzustellung, siehe Bild 5.8. Gestartet wird mit einem ungekrümmten, segmentierten Profil, für das die Kontaktverhältnisse mit den Rollen bestimmt werden können und bei dem die entlastete Profilkrümmung $k_{3,0} = 0$ ist. Im Anschluss wird die entlastete Profilkrümmung um ein kleines Inkrement Δk erhöht und mittels der von PROFIL-V2 berechneten Rückfederung die belastete Profilkrümmung $k_{2,n}$ bestimmt. Anhand der dann bekannten Krümmungen k_1 ,

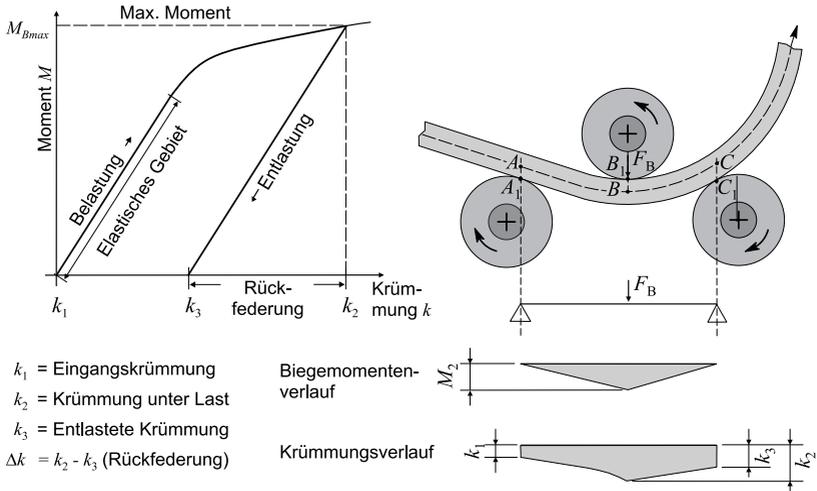


Abbildung 5.6: Verlauf des Biegemoments und der Krümmung entlang der Biegelinie

$k_{2,n}$ und $k_{3,n}$ werden für jedes Segment der Biegelinie die zugehörigen Biegemomente und die entsprechenden Krümmungen berechnet und die Segmente geometrisch addiert. Somit ist der Biegelinienverlauf bestimmt, sodass im nächsten Schritt die Kontaktverhältnisse des gebogenen Profils mit den Rollen berechnet werden. Hier gibt es keine eindeutige Lösung, vielmehr kann zwischen verschiedenen Strategien der Rollenzustellung unterschieden werden. Beispielsweise kann eine Zustellung ausschließlich durch die Ausgangsrolle erfolgen, oder beide Außenrollen werden symmetrisch (Abstände der Außenrolle zur Mittelrolle ist identisch; $a_0 = b_0$) zugestellt. Im Algorithmus wurde die symmetrische Zustellung umgesetzt, da dadurch eine Veränderung der Rollenzustellung auf zwei Positionsänderungen der Außenrollen verteilt wird und somit die Positionsänderung der einzelnen Rollen minimiert wird. Würde nur eine der Außenrollen ihre Position ändern, müsste sie einen längeren Weg zurücklegen, um die gleiche Änderung der Rollenzustellung zu erzielen. Dieser Vorgang würde entsprechend länger dauern.

Basis zur Bestimmung der Kontaktverhältnisse ist der Sachverhalt, dass das Profilsegment mit der größten Krümmung immer Kontakt mit der Mittelrolle hat, da an dieser Stelle das maximale Biegemoment auftritt. Dies ermöglicht den Einsatz eines binären Suchalgorithmus, der den Kontaktwinkel β_2 so lange verändert, bis bei einem Kontakt der Außenrollen mit dem Profil eine symmetrische Zustellung erreicht wird. Nachdem der Kontaktwinkel β_2 bestimmt wurde,

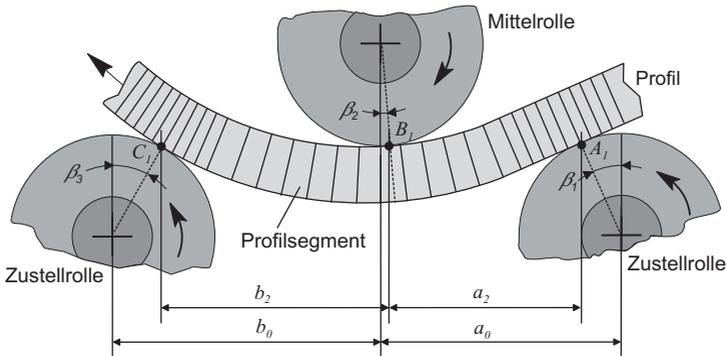


Abbildung 5.7: Segmentierung des Profils

werden die noch fehlenden Kontaktwinkel β_1 und β_3 bzw. Kontaktpunkte A_1 und C_1 bestimmt, mit denen wiederum die Kontaktabstände a_2 und b_2 berechnet werden. Wenn die Berechnung der Biegelinie noch nicht für die endgültige Profilkrümmung nach Entlastung k_3 durchgeführt wurde, wird $k_{3,n}$ wieder um ein kleines Inkrement Δk erhöht und der zugehörige Biegelinienverlauf und die zugehörige Rollenzustellung berechnet. Die Iteration wird durchgeführt, bis die endgültige Profilkrümmung nach Entlastung erreicht wird.

Konstruktion der Biegelinie

Nach der obigen Kurzbeschreibung der Konstruktion der Biegelinie wird die Vorgehensweise zu ihrer Konstruktion im Folgenden detailliert beschrieben. Die Biegelinie wird ausgehend von einem Startsegment an der Mittelrolle in Richtung Eingangs- und Ausgangsrolle separat aufgebaut. Als Erstes wird das Startsegment entsprechend Bild 5.9 erzeugt. Dabei wird das

ebene Segment in ein gebogenes Segment überführt, wobei die Krümmung k_2 verwendet wird. Im Anschluss wird das gebogene Startsegment um den Kontaktwinkel β_2 zwischen Profil und Mittelrolle rotiert, sodass der Kontaktpunkt zwischen dem Startsegment und der Mittelrolle dem Kontaktpunkt B_1 entspricht. Der Ursprung des lokalen Koordinatensystems der Biegelinie wird in den Punkt P_0 gelegt.

Die geometrische Addition der Segmente wird beispielhaft anhand des ersten Segments der Eingangsbiegelinie Seg_{E1} vorgestellt, wobei der Anschlusspunkt $P'_{0,2}$ und der Anschlusswinkel

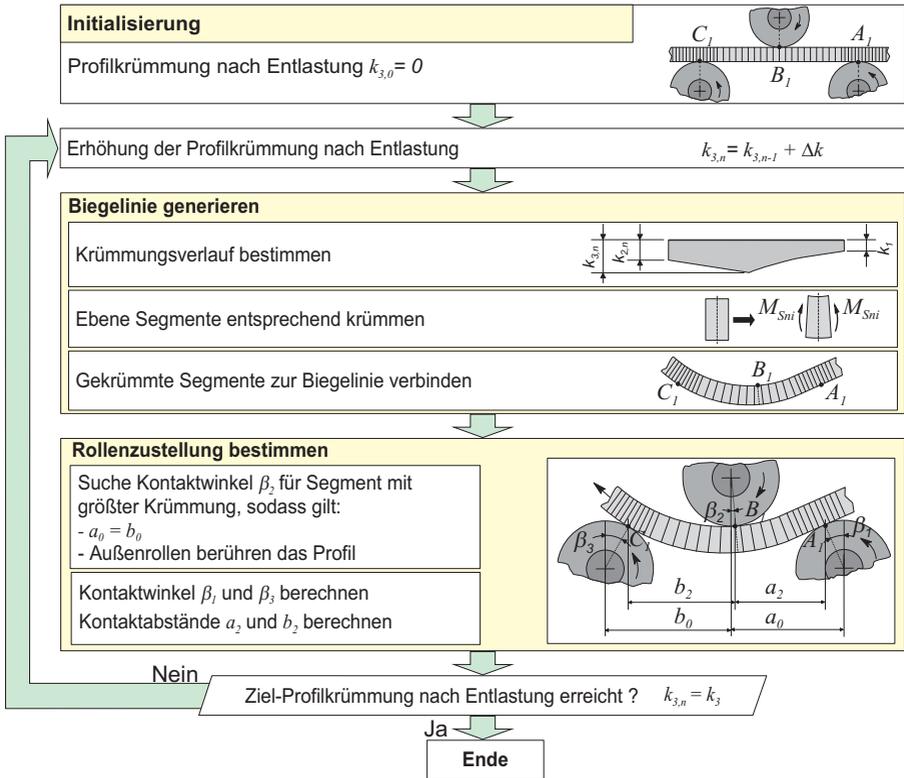


Abbildung 5.8: Algorithmus zur Bestimmung der Rollenzustellung d_Z

γ_{E0} des Startsegments Seg_0 verwendet werden, siehe Bild 5.10. Für ein ebenes Segment mit der Segmentbreite b_s wird die x-Position in der Eingangsbiegeline näherungsweise entsprechend Gleichung 5.1 bestimmt, indem die Hälfte der Abszissenausdehnung des Vorgängersegments zum Punkt $P'_{0,2}$ addiert wird.

$$x_{E1} = P'_{0,2}(x) + \frac{P'_{0,2}(x) - P'_{0,1}(x)}{2} \tag{5.1}$$

Ausgehend von der Position des Segments in der Eingangsbiegeline kann die zugehörige Krümmung nach dem folgenden Prinzip bestimmt werden. Von dem Profil ist die Eingangskrümmung k_1 bekannt, die bereits vor dem Kontaktpunkt A_1 vorhanden ist. Zwischen den

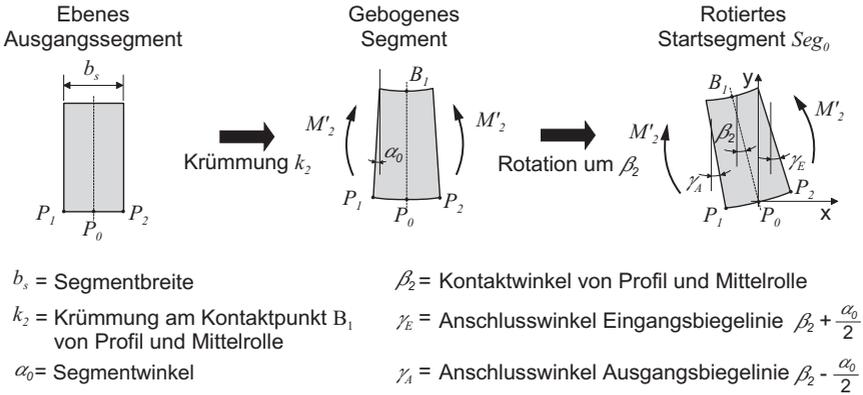


Abbildung 5.9: Konstruktion des Startsegments der virtuellen Biegelinie

Kontaktpunkten A_1 und B_1 nimmt das Biegemoment stetig zu, sodass nach einer rein elastischen auch eine elastisch-plastische Umformung stattfindet. Durch den Biegeprozess muss das Profil entsprechend umgeformt werden, sodass zwischen den Kontaktpunkten A_1 und B_1 eine Krümmungserhöhung um k'_2 erfolgt, Gleichung 5.2.

$$k'_2 = k_2 - k_1 \quad (5.2)$$

Mit k'_2 kann das dafür notwendige Biegemoment M'_2 beim Kontaktpunkt B_1 aus der von PROFILV2 berechneten Momenten-Krümmungsbeziehung ermittelt werden. Da das Biegemoment M'_2 , ausgehend vom Kontaktpunkt B_1 in Richtung des Kontaktpunktes A_1 , linear bis 0 abnimmt, kann mit M'_2 und der x-Position x_{E1} des neuen Segments Seg_{E1} anhand der Momenten-Krümmungsbeziehung die sich ausbildende Krümmungserhöhung k'_1 des Segments bestimmt werden.

Das ebene Segment wird daraufhin in ein gebogenes Segment mit der Krümmung $k_1 + k'_1$ überführt und um den Winkel γ_{E0} um den Kreismittelpunkt des gebogenen Segments rotiert. Dadurch wird das rotierte Segment so ausgerichtet, dass es sich tangential an die bestehende Biegelinie in Punkt $P'_{0,2}$ anschließen lässt.

Mit den Daten des rotierten Segments Seg_{E1} und dem Anschlusspunkt $P'_{E0,2}$ können entsprechend den Gleichungen 5.3 und 5.4 der neue Anschlusspunkt $P'_{E1,2}$ und der neue Anschlusswinkel γ_{E1} der Eingangsbiegeline bestimmt werden. Der neue Anschlusspunkt $P'_{E1,2}$ wird schließlich

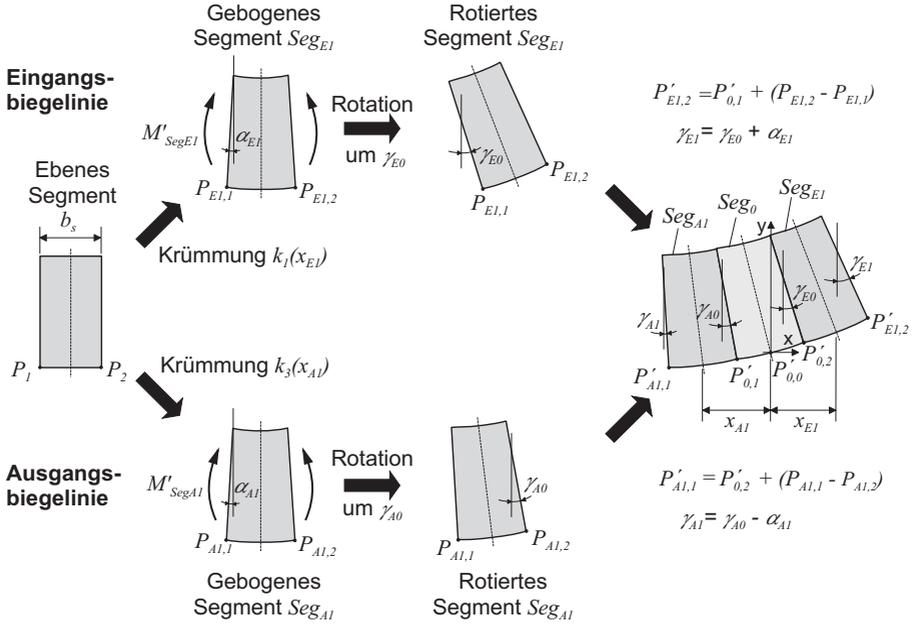


Abbildung 5.10: Konstruktion der rotierten Segmente und deren Addition zur virtuellen Biegelinie am Beispiel der Segmente Seg_{AI} , Seg_0 und Seg_{EI}

der virtuellen Biegelinie hinzugefügt. Mit dem Anschlusspunkt $P'_{EI,2}$ und dem Anschlusswinkel γ_{EI} können nach der gleichen Methode das Segment Seg_{EI2} und alle übrigen Segmente der Eingangsbiegelinie generiert und zu der Biegelinie addiert werden.

$$P'_{EI,2} = P'_{E0,2} + (P_{EI,2} - P_{EI,1}) \tag{5.3}$$

$$\gamma_{EI} = \gamma_{E0} + \alpha_{EI} \tag{5.4}$$

Die Konstruktion der Segmente für die Ausgangsbiegelinie gestaltet sich nach dem gleichen Prinzip, wobei jedoch die Berechnung der Krümmung der Segmente vereinfacht durchgeführt werden kann. Zwischen den Kontaktpunkten B_1 und C_1 des Profils mit der Mittel- und Ausgangsrolle findet eine elastische Entlastung des Profils statt, sodass die Krümmung von k_2 an der Mittelrolle linear bis zur Krümmung k_3 an der Ausgangsrolle abnimmt.

Validierung des Algorithmus zur Berechnung der Rollenzustellung

Zur Validierung des Algorithmus zur Berechnung der Rollenzustellung d_Z wurden an einer Drei-Rollen-Biegemaschine Vergleichsbiegungen vorgenommen und mittels der FEM Vergleichsberechnungen durchgeführt.

Die Vergleichsbiegungen wurden an einer Drei-Rollen-Biegemaschine ROUND0 R2S spezial, siehe Abschnitt 7.2, für Vierkanthohlprofile aus Baustahl S 235 JR und der Aluminiumlegierung EN-AW 6060 für verschiedene entlastete Radien berechnet und mit ihnen Probiegungen durchgeführt. Die gemessenen entlasteten Radien $1/k_3$ und die Abweichung zu den Soll-Radien können der Tabelle 5.1 entnommen werden. Die gemessenen Radien weichen im Mittel 0,4 % - 5,0 % vom geforderten Sollradius ab, wobei die hohen Abweichungen bei großen Radien auftreten.

Berechneter Radius $1/k_3$ (= Soll-Radius)	Mittlerer gemessener Radius $1/k_{3m}$ (= Ist-Radius)	Abweichung Soll-/Ist-Radius
Vierkanthohlprofil 20x40x2 mm EN-AW 6060		
500 mm	494 mm	1,2 %
1000 mm	996 mm	0,4 %
2000 mm	2028 mm	1,4 %
Vierkanthohlprofil 20x40x2 mm S 235 JR		
500 mm	502 mm	0,4 %
2000 mm	2100 mm	5,0 %
Vierkanthohlprofil 20x30x2 mm S 235 JR		
1000 mm	1040 mm	4,0 %

Tabelle 5.1: Gemessene entlastete Profilradien $1/k_{3m}$ unter Verwendung mittels PROFI-V2 berechneter Rollenzustellungen d_Z

Die Validierung mittels FEM wurde mit dem FE-Programm Ansys v11.0 vorgenommen. Die Vergleichsrechnung diente der Ermittlung der Biegelinie und der Kontaktpunkte des Profils mit den Rollen bei einer vorgegebenen Rollenzustellung und Erreichen des stationären Zustands. Dabei wurde der Biegeprozess eines Vollprofils 20 x 30 mm aus EN-AW 6060 mit den Rollenzustellungen d_Z von 25 mm, 30 mm und 40 mm entsprechend den geometrischen Verhältnissen einer Drei-Rollen-Biegemaschine ROUND0 R2S spezial, siehe Bild 5.11 und Abschnitt 7.2,

abgebildet. Der Profilbiegeprozess wurde unter Annahme des ebenen Spannungszustands berechnet, wobei bei den Querschnittsmaßen von 20 x 30 mm in der Realität sowohl die Annahme eines ebenen Spannungszustands wie die eines ebenen Verzerrungszustandes nicht korrekt ist. Bezogen auf die Dickenrichtung gilt an der Profilloberfläche der ebene Spannungszustand, der kontinuierlich in Richtung Profilquerschnittsmittelpunkt in den ebenen Verzerrungszustand übergeht. Dementsprechend ist der Flächenanteil, der dem ebenen Spannungszustand zugerechnet werden muss größer als der des ebenen Verzerrungszustandes, sodass die Annahme des ebenen Spannungszustands dem Problem entsprechend angemessen ist. Um die Abweichung zwischen beiden Annahmen zu ermitteln, wurden für eine Rollenzustellung von 25 mm Berechnungen sowohl mit ebenem Spannungs- wie auch ebenem Verzerrungszustand durchgeführt, wobei die Abweichungen minimal sind, siehe Bild 5.13. Für die Beschreibung des Profils wurde das 8-Knotenelement *plane82* mit quadratischer Ansatzfunktion verwendet. Dieses Element ist für große Deformationen und Starrkörperbewegungen geeignet, die beispielsweise im Profil während der Rollenzustellung auftreten. Massenträgheitskräfte und Dämpfungskräfte wurden nicht berücksichtigt. Es wurde das implizite Zeitintegrationsschema verwendet, da aufgrund der verhältnismäßig langen Prozesszeit (mehrere hundert Sekunden), der stabilen Kontaktsituation und der geringen Anzahl von sich in Kontakt befindlichen Knoten die Verwendung der explizite Zeitintegration keine Vorteile erwarten ließ. Der Transport des Profils erfolgt nicht über die Haftreibung zwischen den Rollen und dem Profil, sondern es wird ein Pusher verwendet. Dieser wird durch einen Knoten abgebildet, der über die Zeit eine Verschiebungsrandbedingung in Vorschubrichtung erhält. Für die Rollenzustellung von 25 mm wurde das Profil während des Biegeprozesses durch den Pusher um 450 mm fortbewegt, wobei der Biegeprozess mit einer Rollenzustellung von 0 mm beginnt und diese während der ersten 50 mm Profilvorschub linear erhöht wird. Der restliche Vorschub von 400 mm bewirkt, dass alle Elemente des Profils zwischen den Außenrollen die abschließende Rollenzustellung durchlaufen haben und ein stationärer Biegezustand erreicht ist. Die Berechnung erfolgt reibungsfrei, und für die Berücksichtigung des Kontakts zwischen dem Profil und den Rollen wird das Lagrange-Verfahren eingesetzt. Des Weiteren wird die Fließhypothese nach von Mises verwendet und ein Verfestigungsverhalten des Werkstoffs gemäß der Nadai-Gleichung ($k_f = C_N \varphi^{n_N}$) angenommen. Dabei ist die Annahme eines isotropen Werkstoffverhaltens nach Vorgabe eines vorgeschaltetem Rekristallisationsglühens gerechtfertigt. Zur Bestimmung der Elementanzahl über die Profilhöhe und des Elementseitenverhältnisses wurde eine Konvergenzstudie durchgeführt, die für acht Elemente mit einem Breiten-/Höhenverhältnis von 2 kaum

Rollenzustellung	Rollenabstand
$d_z = 0$ mm:	$l_0 = 612,8$ mm
$d_z = 25$ mm:	$l_{25} = 603,0$ mm
$d_z = 30$ mm:	$l_{30} = 600,6$ mm
$d_z = 40$ mm:	$l_{40} = 595,1$ mm
Rollenradien	
$R_E, R_B, R_A = 85$ mm	

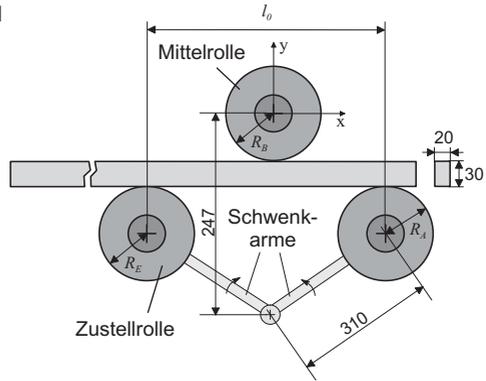


Abbildung 5.11: Im FE-Modell abgebildete Maschinenkinematik

veränderliche Werte bei der Biegelinie ergab. Die Genauigkeit bei der Berechnung des Kontaktpunktes steigt jedoch mit zunehmender Diskretisierung weiter an, wobei zur Validierung die Verwendung von acht Elementen ausreichend genau ist.

Die Berechnungen wurden für die Rollenstellungen d_z 25 mm, 30 mm und 40 mm durchgeführt. Die Biegelinien wurden an der Außenkontur des Profils ermittelt und werden zusammen mit den von PROFI-V2 berechneten Biegelinien im Bild 5.12 dargestellt. Insgesamt stimmen

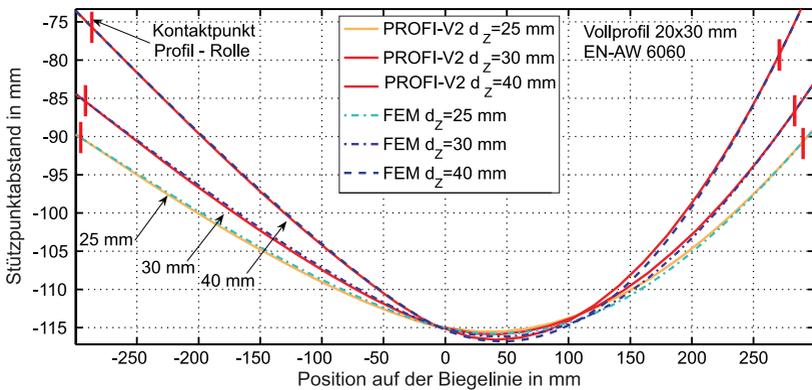


Abbildung 5.12: Biegelinien von PROFI-V2 bzw. mittels FEA mit schematischer Darstellung der Kontaktpunkte zwischen Profil und Außenrollen

die Biegelinien bei allen drei Rollenzustellungen sehr gut überein, wobei die Übereinstimmung im Bereich der Außenrollen größer als bei der Mittelrolle ist. Dies begründet sich darin, dass durch die vorgegebenen Rollenzustellungen die Außenrollen eine fixe Position einnehmen und somit das Profil einer gewissen Führung unterliegt. Das Bild 5.13 zeigt für Rollenzustellungen d_z von 25 mm und 40 mm einen Ausschnitt im Bereich der Mittelrolle, wobei maximale Abstände zwischen den berechneten Biegelinien (PROFI-V2 und FEM) von ca. 0,75 mm erkennbar sind.

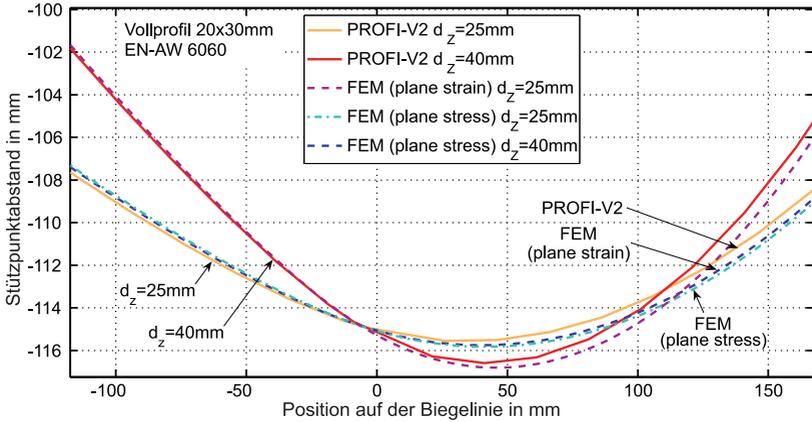


Abbildung 5.13: Biegelinienausschnitt (PROFI-V2, FEA) und Ergebnisgegenüberstellung für Berechnung mit ebenem Spannungs- bzw. ebenem Verzerrungszustand

Die Ergebnisse aus den Vergleichsberechnungen mittels PROFI-V2 und FEA für die Kontaktpunkte an den Eingangs- und Ausgangsrollen und dem belasteten Radius $1/k_2$ sind in der Tabelle 5.2 zusammengefasst. Während der belastete Radius bei PROFI-V2 direkt ein Berechnungsergebnis ist, muss er bei den Ergebnissen aus der FEA aus der Biegelinie bestimmt werden. Am Kontaktpunkt des Profils mit der Mittelrolle ist das Maximum des Biegemoment M_B , sodass an dieser Stelle auch die belastete Krümmung am größten ist. In Richtung der Ausgangsrolle ändert sich die Profilkrümmung nur noch aufgrund der Rückfederung, sodass die Krümmungsänderung pro Profillängeneinheit im Bereich der Eingangsbiegelinie größer als im Bereich der Ausgangsbiegelinie ist. Aus diesem Grund wird zur Berechnung der belasteten Krümmung k_2 bzw. des belasteten Radius $1/k_2$ ab dem Kontaktpunkt Profil/Mittelrolle in Richtung der Ausgangsrolle ein Ausschnitt der Biegelinie (Länge: 30 mm; bei $d_z= 25$ mm $\{|x| -4\text{mm} \dots 26\text{mm}\}$) entnommen. Mittels nichtlinearer Regression wird aus dem Biegelinien-

ausschnitt der belastete Radius $1/k_2$ bestimmt. Die Abweichungen bei den Kontaktpunkten

Daten	PROFI-V2 (P)	FEA (F)	Diff. (P-F)
Rollenzustellung $d_Z = 25\text{mm}$			
Kontaktpkt. Eingangsrolle in mm	(-292,79; -90,45)	(-292,29; -90,44)	(-0,50; -0,01)
Kontaktpkt. Ausgangsrolle in mm	(287,10; -91,23)	(284,70; -91,68)	(2,40; 0,45)
Belasteter Radius $1/k_2$ in mm	1146	1097 {x -4mm ... 26mm}	49 (4,3 %)
Rollenzustellung $d_Z = 30\text{ mm}$			
Kontaktpkt. Eingangsrolle in mm	(-288,89; -85,77)	(-288,94; -85,76)	(0,05; -0,01)
Kontaktpkt. Ausgangsrolle in mm	(281,10; -87,19)	(280,89; -87,24)	(0,21; 0,05)
Belasteter Radius $1/k_2$ in mm	936	902 {x -5mm ... 25mm}]	34 (3,6 %)
Rollenzustellung $d_Z = 40\text{ mm}$			
Kontaktpkt. Eingangsrolle in mm	(-283,54; -76,16)	(-283,97; -76,12)	(0,43; -0,04)
Kontaktpkt. Ausgangsrolle in mm	(272,13; -78,89)	(271,70; -79,02)	(0,43; 0,13)
Belasteter Radius $1/k_2$ in mm	642	656 {x -8mm ... 22mm}	-14 (2,2 %)

Tabelle 5.2: Berechnungsergebnisse von PROFIV2, FEA und deren Differenz für Rollenzustellungen 25 mm, 30 mm und 40 mm für Kontaktpunkte des Profils mit den Außenrollen und ermittelter belasteter Radius $1/k_2$ (Biegelinienausschnitt bei FEA-Ergebnissen bspw. {x|-4 mm ... 26 mm})

sind, bis auf den Kontaktpunkt bei der Ausgangsrolle, bei der Rollenzustellung mit 25 mm sehr gering und liegen für die y-Koordinate unter 0,13 mm und für die x-Koordinate unter 0,50 mm. Diese gute Übereinstimmung zeigt sich auch bei dem belasteten Radius $1/k_2$, bei dem die Abweichung maximal 4,5 % beträgt. Insgesamt zeigen die Vergleichsrechnungen mittels FEM wie auch die Vergleichsbiegungen eine gute Übereinstimmung zu den Berechnungsergebnissen von PROFIV2. Bei beiden liegt die maximale Abweichung unter 5 %, womit gezeigt wäre, dass der Algorithmus zur Berechnung der Rollenzustellung geeignet ist. Aufgrund der deutlich kürzeren Berechnungszeiten von PROFIV2 (≤ 100 ms) im Vergleich zu denen bei der FEA (bei vergleichbarer Computerleistung im Stundenbereich), eignet sich die FEA nicht für den Einsatz in der Testumgebung.

5.5 Virtueller Biegeprozess

Der virtuelle Biegeprozess soll den realen Biegeprozess dahingehend ersetzen, dass er die Untersuchung von Prozessregelungen erlaubt. Dies bedeutet, dass der virtuelle Biegeprozess unter

Vorgabe der Eingangsgrößen

- Halbzeugbeschreibung,
- Beschreibung von Schwankungen vom Profilquerschnitt und Werkstoffeigenschaften entlang der Profillängsachse,
- Biegemaschinen- und Werkzeuggeometrie,
- Geschwindigkeiten und Soll-Positionen der numerisch gesteuerten Achsen der Biegemaschine

als Ausgangsgrößen die sich beim Biegeprozess ausbildende Profilkontur und während der Biegung auftretende Prozessgrößen

- Hauptkräfte des Profils auf die Rollen,
- Biegelinie des Profils in der Umformzone,
- belastete Profilkrümmung k_2 ,
- entlastete Profilkrümmung k_3 und
- Ist-Positionen der CNC-Achsen

berechnen muss. Dies wird durch eine mehrstufige Vorgehensweise erreicht, bei der der Biegeprozess zeitlich diskretisiert wird. Für wählbare Zeitpunkte wird die aktuelle Maschinenkonfiguration mit allen CNC-Achsenpositionen bestimmt. Entsprechend der Position der Vorschubachse ist die Profilposition bekannt, sodass anhand der Beschreibung der Schwankungen der Halbzeugeigenschaften entlang der Profillängsachse eine Aktualisierung der Halbzeugbeschreibung durchgeführt wird. Mittels der aktuellen Halbzeugbeschreibung und der aktuellen Maschinenkonfiguration kann ein Prozessdatengenerator auf Basis von PROFI-V2 die oben genannten Prozessgrößen berechnen. Auf diese Weise erhält man zu angegebenen Zeitpunkten den aktuellen Zustand des Biegeprozesses, Zustände zwischen diesen Zeitpunkten können interpoliert werden. Für die Untersuchung von Prozessregelungen ist eine Interpolation der Prozessgrößen jedoch nicht notwendig, sondern diese werden jeweils für den geforderten Zeitpunkt bestimmt.

Zentral für den virtuellen Biegeprozess ist der Prozessdatengenerator. Dieser wurde in der Softwarebibliothek *Three-Roll-Bending Process-Data-Generator (PDG)* realisiert, die im Folgenden vorgestellt wird.

5.5.1 Three-Roll-Bending Process-Data-Generator (PDG)

Entsprechend Bild 5.14 ist das halbanalytische Prozesssimulationsystem PROFI-V2 die Basis für die Prozessdatengenerierung. Dieses bestimmt für eine vorgegebene Profil- und Maschinenkonfiguration und einen Zielradius die dafür notwendige Rollenzustellung und weitere Prozessdaten, wie z.B. die auftretenden Kräfte an den Rollen. Durch ein Suchverfahren kann PROFI-V2 jedoch auch eingesetzt werden, um für eine vorgegebene Rollenzustellung den sich ausbildenden Profilradius zu bestimmen. Abhängig vom Profileinzug wird entsprechend der Konfiguration für die Schwankungen der Profileigenschaften die Profilbeschreibung verändert und an PROFI-V2 weitergegeben. Die geforderten Schwankungen werden für den Profilquerschnitt und für die Werkstoffeigenschaften in einer Konfigurationsdatei definiert, wobei darin beliebig viele Eigenschaftsschwankungen mittels Variationsdefinitionen definiert werden können.

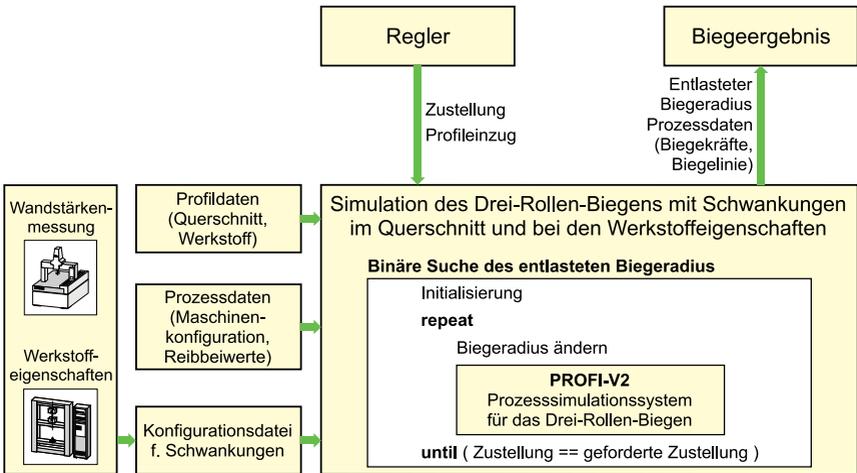


Abbildung 5.14: Aufbau des Prozessdatengenerators für das Drei-Rollen-Biegen

Definition der Schwankungen der Profileigenschaften

Jede Variationsdefinition spezifiziert, welche Profileigenschaft variiert werden soll, und enthält eine Funktionsbeschreibung, wie die Variation entlang der Profillängsachse erfolgen soll. Für alle Profileigenschaften können beliebig viele Variationsdefinitionen angegeben werden, wobei

sich die letztendliche Veränderung der Profileigenschaft durch Überlagerung der einzelnen Variationen ergibt.

Für den Profilwerkstoff können die Eigenschaften

- E-Modul,
- Streckgrenze und
- bei den Fließkurvenapproximationen nach Swift ($k_f = C_S(\varphi + \varphi_{C_S})^{n_S}$) und Nadai ($k_f = C_N\varphi^{n_N}$)
 - Werkstoffkonstante,
 - Umformkonstante (nur bei Fließkurvenapproximation nach Swift) und
 - Verfestigungsexponent

variiert werden. Die Definition der Schwankungen für den Profilquerschnitt erfolgt auf Basis der Profilquerschnittsbeschreibung in der Simulation, die als Liste von Polygonen erfolgt, siehe Bild 5.15. Um den Profilquerschnitt zu variieren, wird innerhalb einer Variationsdefinition

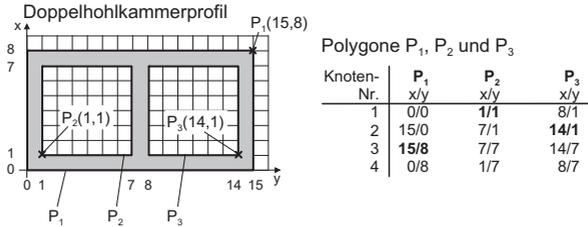


Abbildung 5.15: Beschreibung eines Doppelhohlkammerprofils in der Simulation

von einem Polygon ein Punkt und davon die x- oder y-Koordinate ausgewählt. Anhand der Funktionsbeschreibung wird die entsprechende Koordinate dann entlang der Profillängsachse modifiziert.

Als Funktionsbeschreibung stehen für alle Variationsdefinitionen die Sinus-Funktion zur Beschreibung von periodischen Schwankungen und daneben die Angabe von Stützpunkten zur Verfügung, wobei die folgenden Parameter angegeben werden müssen.

- Sinus-Funktion:

- Wellenlänge in mm,
- Amplitude und
- Phasenoffset in mm, bezogen auf Profileinzug 0 mm
- Stützpunkte:
 - Offset in mm, bezogen auf Profileinzug 0 mm
 - Liste von Stützpunkten (x-Koordinate gibt die Profilposition an)

Bei der Stützpunktbeschreibung werden die Werte zwischen den Stützpunkten linear interpoliert, wobei die angefragte Profilposition durch die mathematische Modulo-Funktion auf den zur Verfügung stehenden Profillängenbereich reduziert wird.

Mit den beiden Funktionsbeschreibungen und deren Überlagerung lassen sich verhältnismäßig einfach komplizierte Verläufe bei den Schwankungen der Profileigenschaften abbilden. Mit der Sinus-Funktion kann ein periodisches Verhalten kompakt beschrieben werden. Des Weiteren können mittels der Stützpunktbeschreibung reale Messergebnisse verwendet werden. Bei der Untersuchung der Prozessregelungen in dieser Arbeit wurden beispielsweise auch die im Kapitel 4 vorgestellten Messergebnisse für die Schwankungen der Werkstoffeigenschaften und Wandstärken eingesetzt. Des Weiteren wurden aber auch künstliche Variationsdefinitionen verwendet, mit denen sich unter anderem Sprungfunktionen bei den Profileigenschaften beschreiben lassen und somit die Sprungantwort des Reglers ermittelt werden kann.

5.5.2 Konstruktion der virtuellen Biegelinie des Profils

Eine wichtige Messgröße für die Prozessregelung ist die Profilkrümmung unter Last k_2 . Diese wird beim realen Biegeprozess aus dem Biegelinienverlauf bestimmt, indem ein Krümmungssensor, siehe Abschnitt 7.4, beispielsweise Stützpunkte auf der Außenkontur des Profils in der Umformzone aufnimmt. Aus den Stützpunkten wird in einem nachgeschalteten Schritt die Profilkrümmung unter Last k_2 bestimmt. Da der simulierte technische Prozess den realen Biegeprozess möglichst vollständig nachbilden soll, wird auch der Verlauf der Biegelinie in Teilbereichen der Umformzone entsprechend Bild 5.16 benötigt. Für dessen Berechnung wird als Basis der Algorithmus von dem erweiterten Prozesssimulationssystem PROFI-V2 zur Berechnung der Rollenzustellung verwendet, siehe Abschnitt 5.4. Er wurde jedoch dahingehend modifiziert,

das eine vorgebbare, konstante Segmentbreite b_s verwendet werden kann. Als Stützpunkte auf der Biegelinie werden die Anschlusspunkte der einzelnen Segmente eingesetzt, wobei der y -Koordinate bei Bedarf noch ein Rauschen überlagert werden kann.

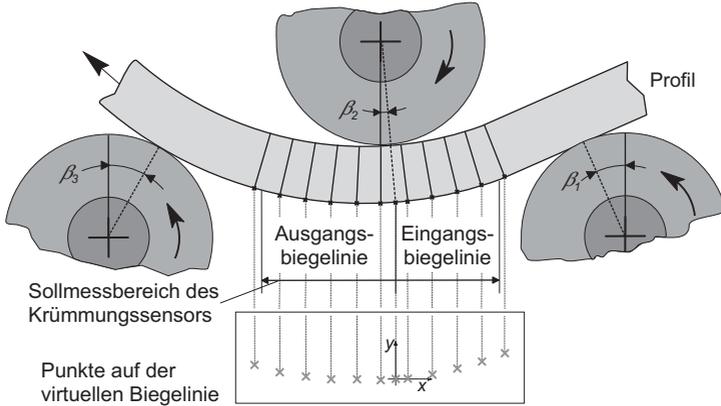


Abbildung 5.16: Aufbau der virtuellen Biegelinie

5.5.3 Ereignisgesteuerte Simulation

In den obigen Abschnitten wurde vorgestellt, wie die einzelnen Prozessdaten innerhalb des virtuellen Biegeprozesses berechnet werden. Im Folgenden wird darauf aufbauend die Bestimmung der aktuellen Maschinenkonfiguration und die Einbettung in das Regelungs-Framework CLCF skizziert.

Wie in Abschnitt 5.3 beschrieben, durchläuft die Prozessregelung den Regelkreis in einem festen vorgegebenen Zeitraster. Währenddessen wird vom Regelungs-Framework die Messgrößenaufbereitung aufgerufen, die wiederum die Messgrößen vom virtuellen Biegeprozess erfragt. Dieser bestimmt als Erstes die aktuelle Maschinenkonfiguration, d.h. die Positionen der Eingangs- und Ausgangsrollen werden bestimmt. Dies erfolgt beispielsweise für die Eingangsrolle mittels der Daten

- letzte Achsenposition,
- aktuelle Geschwindigkeit der Achse und

- Zeitraum seit der letzten Aktualisierung der Maschinenkonfiguration.

Neben den Achsenpositionen der Rollen wird auch die Profilposition bestimmt. Eine Änderung der Achsengeschwindigkeiten der Rollen und des Profilverstärkers ist jederzeit möglich. In diesem Fall werden für den aktuellen Zeitpunkt die Systemkonfiguration aktualisiert und die neuen Geschwindigkeiten und der neue Zeitstempel gespeichert. Für die aktualisierte Systemkonfiguration wird dann der Prozessdatengenerator PDG aufgerufen und die virtuelle Biegelinie berechnet. Die ermittelten Prozessdaten werden dann an die Messgrößenaufbereitung zurückgegeben.

5.6 Testumgebung mit Three-Roll-Bending Control

Die Softwarebibliothek *Three-Roll-Bending Control Trobec* stellt alle Basisfunktionalitäten der Trobec-Testumgebung zur Untersuchung von Prozessregelungen für das Drei-Rollen-Biegen zur Verfügung. Insbesondere werden die einzelnen vorgestellten Bibliotheken CLCF, PROFI-V2 und PDG in Trobec integriert und spezialisiert. Dazu erfolgte entsprechend Abschnitt 5.3 eine Spezialisierung der konfigurierbaren Basisklassen (= Template-Klassen), die von der Softwarebibliothek CLCF bereitgestellt werden. In einem ersten Schritt erfolgte die Spezialisierung der Datenklassen zur Beschreibung der statischen Daten (`static_dataC`), der Prozessgrößen (`dynamic_dataC`) und der Stellgrößen (`out_dataC`), in denen alle notwendigen Daten für die Prozessregelung vorgehalten werden. Für das Drei-Rollen-Biegen ergeben sich die folgenden Dateninhalte:

- statische Daten
 - Zielkontur
 - Halbzeugbeschreibung aus Profilquerschnitt und Werkstoff
 - Maschinen- und Werkzeugbeschreibung
 - Kontrolldaten
 - * Anzahl der Schichten, mit denen PROFI-V2 den Profilquerschnitt beschreibt
 - * Defaultgeschwindigkeiten für den Profileinzug und die Rollenzustellung
- Prozessgrößen

- Profilposition
- Hauptkräfte des Profils auf die Rollen
- Kontaktpunkte und -winkel des Profils mit den Rollen
- Biegemoment M_B
- Außenkontur der Biegelinie des Profils
- Entlastete Profilkrümmung k_3
- Ist-Rollenzustellung d_{Z_i}
- Stellgrößen
 - Soll-Rollenzustellung d_{Z_s}
 - Profilposition d_C
 - Geschwindigkeit des Profileinzugs

Auf Basis dieser Datenklassen wurden die parametrisierbaren Klassen der Komponenten

- Zustandsbasierte Kontrolle,
- Messgrößenaufbereitung,
- Aufbereitung der Stellgrößen / Kontrolle der Aktoren,
- Technischer Prozess,
- Sensoren und
- Aktoren

spezialisiert, wobei in die Komponente *Technischer Prozess* der virtuelle Biegeprozess integriert wurde. Die Komponenten *Sensoren* und *Aktoren* kommen nur zum Tragen, wenn in der Testumgebung der reale Biegeprozess gewählt wird, wobei die Anbindung des Versuchsaufbaus im Kapitel 7 vorgestellt wird.

Die Komponente *Messgrößenaufbereitung* dient der Entkopplung der Sensordaten von den Prozessgrößen, die von den Prozessregelungen benötigt werden. Die belastete Profilkrümmung k_2 unter der Mittelrolle kann beispielsweise mittels verschiedenster Messverfahren bestimmt

werden, Näheres dazu in Abschnitt 7.4.1. Eine Methode, die auch in der Arbeit realisiert wurde, ist die Aufnahme von Stützpunkten entlang der Profilaußenkontur. Diese Stützpunkte sind z.B. die Ausgabedaten eines Sensors. In der Komponente *Messgrößenaufbereitung* wird aus diesen Stützpunkten die belastete Profilkrümmung k_2 berechnet und das Ergebnis bei den Prozessgrößen (Instanz von `dynamic_dataC`) abgelegt.

5.6.1 Basisregler

Zur Definition von neuen Reglern in der Testumgebung muss ein Nachfahre der Basisklasse `clcf::controllerC` aus der CLCF-Bibliothek erstellt und die Methode `compute_output()` überschrieben werden, siehe Abschnitt 5.3. Um die Erstellung von Prozessregelungen weiter zu erleichtern, wurden in die Bibliothek Trobec Basisregler aufgenommen, die zur Erstellung eigener Prozessregelungen verwendet werden können. Neben dem konventionellen PID-Regler handelt es sich um den Neuro-Fuzzy-Controller NEFCON [79, 82, 94, 95]. Dieser kann sowohl als reiner statischer Fuzzy-Regler arbeiten, aber auch als Fuzzy-Regler, dessen Regelbasis zur Laufzeit weiter optimiert werden kann. Darüber hinaus bietet er die Möglichkeit, die Regelbasis selbst zu generieren bzw. zu modifizieren. Somit bietet er eine breite Basis von Funktionalitäten, die innerhalb eigener Prozessregelungen verwendet werden können.

5.6.2 Dateneingabe und -ausgabe

Ein wichtiger Faktor bei der Untersuchung einer Prozessregelung ist die einfache Beschreibung einer Biegeaufgabe, mit der die Prozessregelung untersucht werden soll. In der Trobec-Testumgebung erfolgt dies über eine ASCII-Projekteingabedatei, in der alle notwendigen Projektdaten definiert werden. In ihr erfolgt beispielsweise die Angabe der Maschinenkinematik mit den dazugehörigen Maßangaben. Die Angabe, dass die Maschinenkinematik mit der Mittelrolle als Zustellrolle eingesetzt wird, erfolgt direkt mit der Angabe von Maschinenparametern, wie z.B. den Abständen der Außenrollen zur Mittelrolle, und hat folgendes Format:

```
MACHINE_CONFIGURATION_START
MACHINE_KINEMATICS MIDDLE_ROLL_MOVES
DISTANCE_A0_MM 200.0
DISTANCE_B0_MM 200.0
MIN_Y_DISTANCE_MIDDLE_ROLL_OUTER_ROLLS_MM 10.0
```

```
MAX_Y_DISTANCE_MIDDLE_ROLL_OUTER_ROLLS_MM 300.0
MIN_VELOCITY_CYLINDER_MIDDLE_ROLL_MM_S 1.0
MAX_VELOCITY_CYLINDER_MIDDLE_ROLL_MM_S 25.0
MACHINE_CONFIGURATION_END
```

Wird dagegen die Maschinenkinematik verwendet, bei der die Rollenzustellung durch drehbare Außenrollen erfolgt, wird dies in der Eingabedatei mit den zugehörigen Maßen für die Länge der Schwenkarme und die Distanz des Drehpunktes zum Mittelpunkt der Mittelrolle nach dem folgenden Format durchgeführt:

```
MACHINE_CONFIGURATION_START
MACHINE_KINEMATICS OUTER_ROLLS_MOVE
ARM_LENGTH_MM 310.0
MIDDLE_ROLL_DISTANCE_MM 247.0
MACHINE_CONFIGURATION_END
```

Dem Anhang B.2 kann ein Beispiel für die Inhalte einer Projekteingabedatei entnommen werden. Neben der Beschreibung der Projektdaten ist auch die Dokumentation von Untersuchungen wichtig. Wie bereits im Abschnitt 5.3 vorgestellt, wird dazu der Signalmechanismus verwendet. Alle Komponenten, die zu dokumentierende Daten generieren, machen diese durch Verschicken von Signalen bekannt. In der Trobec-Testumgebung existiert eine Datenaufzeichnungskomponente, die alle gesendeten Signale empfängt und die Daten formatiert in eine ASCII-Datei schreibt. Dem Anhang B.3 kann ein Ausschnitt einer Datenausgabedatei entnommen werden. Sowohl die Projekteingabedatei wie auch die Datenausgabedatei wurden als formatierte ASCII-Datei realisiert, da dieses Format für den Menschen und für Programme einsehbar und bearbeitbar ist. Für eine Parametervariation können Projekteingabedateien einfach generiert werden, und für eine automatisierte Aufbereitung von Testdaten können alle notwendigen Daten aus einer Datenausgabedatei durch Programme gefiltert und aufbereitet werden.

5.6.3 Testumgebung mit Benutzungsoberfläche und als Kommandozeilenversion

Als Programmversion existiert die Trobec-Testumgebung als Version mit Benutzungsoberfläche und als Version zum Starten von der Befehlszeile des Betriebssystems (=Backend). Die Ba-

ckendversion ist ohne Benutzungsoberfläche und wird mittels Kommandozeilenparameter konfiguriert, wobei auch die Projekteingabedatei angegeben wird. Nach dem Einlesen der Daten erfolgt automatisch der Simulationslauf unter Verwendung der ausgewählten Prozessregelung und alle notwendigen Daten werden wie oben in die Datenausgabedatei geschrieben und können analysiert werden. Das Backend dient dabei der automatisierten Parametervariation. Für das interaktive Arbeiten mit der Trobec-Testumgebung ist die Version mit Benutzungsoberfläche vorzuziehen, da in ihr die Daten einfacher modifiziert und die Ergebnisse eines Testlaufs auch direkt visualisiert werden können. Des Weiteren können Einstellungen für Sensoren vorgenommen werden, wie z.B. die Skalierung für den Ladungsverstärker, der zur Messung der Hauptkraft an der Biegerolle verwendet wird, siehe Abschnitt 7.5, und auch Prozessgrößen während des Biegeprozesses in Diagrammfenstern visualisiert werden.

Kapitel 6

Prozessregelungen

In diesem Kapitel wird eine Prozessregelung für das Drei-Rollen-Biegen vorgestellt. Sie und die in Abschnitt 2.4.2 vorgestellten Prozessregelungen von Hardt et al. [85] und Yang et al. [26] werden in die Trobec-Testumgebung integriert und mittels des virtuellen Biegeprozesses einander gegenübergestellt. Im Abschnitt 5.1 wurde bereits ein Überblick über die Prozessgrößen beim Drei-Rollen-Biegen gegeben, sodass im Folgenden direkt die Anforderungen und Randbedingungen für die neuen Prozessregelungen für das Drei-Rollen-Biegen vorgestellt werden.

6.1 Anforderungen und Randbedingungen

Aus regelungstechnischer Sicht ist die Regelgröße beim Drei-Rollen-Biegen die entlastete Profilkrümmung k_3 . Da die Schwankungen bei den Werkstoffeigenschaften und den geometrischen Eigenschaften des Profils als Störgröße auftreten und deren Auswirkung erst nach einer Verzögerungszeit durch die Messung der entlasteten Profilkrümmung k_3 erkannt werden können, ist eine ausschließlich darauf aufbauende Prozessregelung nur bei Profihalbzeugen mit geringen und langsamen Schwankungen ausreichend genau. Die in Abschnitt 2.4.2 vorgestellten Prozessregelungen von Yang et al. [26] und Hardt et al. [85] ersetzen deshalb die Messung der entlasteten Profilkrümmung k_3 durch eine modellbasierte Prognose der entlasteten Profilkrümmung k_3 , die auf der Messung der belasteten Profilkrümmung k_2 und bei Hardt et al. zusätzlich auf dem Biegemoment M_B basiert. Auf diese Weise werden Veränderungen der Halbzeugeigenschaften indirekt berücksichtigt, wobei dies jedoch mit einem festen Modell erfolgt, das auf einmal bestimmten Profileigenschaften wie E-Modul oder Flächenträgheitsmoment beruht. Die-

se Profileigenschaften weichen jedoch von den Eigenschaften des gerade zu biegenden Profils ab, sodass ein Fehler auftreten wird. Aus diesem Grund sollte die entlastete Profilkrümmung k_3 gemessen werden, sodass eine Korrektur der Rollenzustellung vorgenommen werden kann.

Ein weiteres Kriterium für die Prozessregelung ist ihr Einsatz für ein breites Spektrum an Profilhälften. Aus diesem Grund sollte die Prozessregelung eine Prozesssimulation enthalten, die auf Basis einer Profilbeschreibung (Geometrie und Werkstoff) jeweils einen Vorgabewert für die Rollenzustellung d_Z und Referenzwerte für das Biegemoment M_B und die belastete Profilkrümmung k_2 berechnet. Auf diese Weise können abgelegte Kennfelder vermieden werden, und eine Parametrisierung des Reglers kann jeweils auf Basis der Profilbeschreibung direkt erfolgen. Bei Verwendung einer Prozesssimulation kann für die Stellgröße statt der Rollenzustellung d_Z indirekt auch die Soll-Krümmung unter Last k_2 verwendet werden. Aus dieser indirekten Stellgröße berechnet im Anschluss die Prozesssimulation die von der Biegemaschine verwendete Rollenzustellung d_Z . Dies ist vorteilhaft, weil die Korrektur der Rollenzustellung von vielen Größen wie z.B. dem Profilwerkstoff und der Maschinengeometrie abhängt. Insbesondere bei Maschinengeometrien, bei denen sich mit der Rollenzustellung auch die Abstände zwischen den Zustellrollen und der Biegerolle a_0 und b_0 ändern, siehe Bild 5.3, ist von einer Korrektur der Rollenzustellung durch den Regler abzusehen, da dieser dafür individuell parametrisiert werden muss.

Beim Aufbau des Versuchsstands zur Validierung der Einsatzfähigkeit der Trobec-Testumgebung wurde ein Krümmungssensor zur Bestimmung der belasteten Profilkrümmung k_2 entwickelt, siehe Abschnitt 7.4. Bei seiner Erprobung zeigte es sich, dass Hohlprofile mit geringen Wandstärken im Bereich der größten Zugbelastung bei der Außenkontur zu einer elastischen Querschnittsdeformation des Profilquerschnitts neigen, siehe Abschnitt 7.4.6. Dadurch wird die Messung der belasteten Profilkrümmung k_2 fehlerhaft. Die elastische Querschnittsdeformation kann bei einigen Profilquerschnitten durch stützende Maßnahmen minimiert werden, doch ist dies mit einem großen Aufwand verbunden. Aus diesem Grund ist eine Prozessregelung vorteilhaft, die die belastete Profilkrümmung k_2 nicht benötigt.

Aufbauend auf den vorgestellten Anforderungen wird im folgenden Abschnitt eine Prozessregelung vorgestellt und mittels des virtuellen Biegeprozesses validiert. Des Weiteren wird ihre Integration in die Trobec-Testumgebung vorgestellt.

6.2 Prozessregelung TRB

Die Basis der Systemstruktur der Prozessregelung *TRB* wird in Bild 6.1 dargestellt. Die Prozessregelung verwendet das Prozesssimulationssystem *PROFI-V2*, um aus der vorgegebenen Profilbeschreibung, der Maschinengeometrie und der entlasteten Soll-Krümmung k_3 eine belastete Soll-Krümmung k_2 zu berechnen. Ein weiteres Modul von *PROFI-V2* berechnet aus dieser belasteten Soll-Krümmung eine Rollenzustellung d_Z , mit der der Biegeprozess begonnen wird. Während des Biegeprozesses werden in der Umformzone die belastete Ist-Krümmung k_{2m} und das Ist-Biegemoment M_{Bm} gemessen. Mit dem Ist-Biegemoment M_{Bm} und der Profilbiegestei-

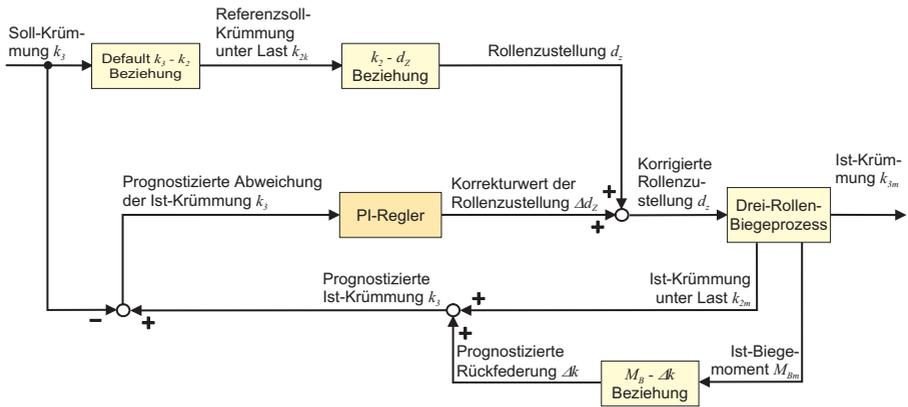


Abbildung 6.1: Basis-Systemstruktur der Prozessregelung *TRB* mit der Rollenzustellung als Stellgröße

figkeit EI , die auf Basis der Profilbeschreibung berechnet wird, wird entsprechend Bild 6.2 und Gleichung 6.1 die Rückfederung Δk_p prognostiziert. Mit ihrer Prognose und der gemessenen belasteten Ist-Krümmung k_{2m} wird eine Prognose für die entlastete Ist-Krümmung k_{3p} entsprechend Gleichung 6.2 vorgenommen.

$$\Delta k_p = \frac{M_{Bm}}{EI} \quad (6.1)$$

Δk_p = prognostizierte elastische Rückfederung

M_{Bm} = gemessenes Biegemoment

E = E-Modul

I = Flächenträgheitsmoment

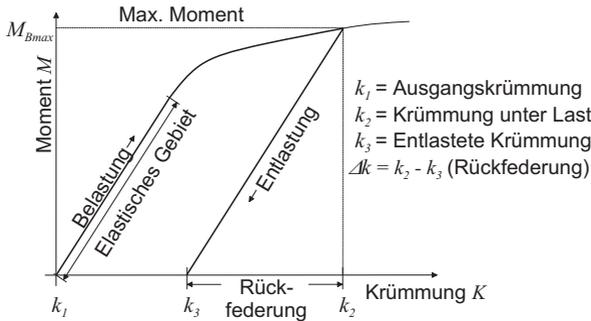


Abbildung 6.2: Typische Momenten-Krümmungs-Beziehung

$$k_{3p} = k_{2m} + \Delta k_p \tag{6.2}$$

Aus der prognostizierten Ist-Krümmung k_{3p} und der Soll-Krümmung k_3 wird die erwartete Abweichung bei der Profilkrümmung berechnet und als Regeldifferenz e einem PI-Regler zugeführt. Dieser berechnet einen Korrekturwert Δd_Z der Rollenzustellung, der zur berechneten Rollenzustellung d_Z addiert wird. Dieser Basisregler entspricht einer Kombination der Regler nach Hardt et al. und Yang et al., siehe Abschnitt 2.4.2. Um eine weitestgehende Unabhängigkeit der Reglerparameter von der Maschinengeometrie zu erhalten, wird der Basisregler dahingehend modifiziert, dass die Rollenzustellung d_Z durch die belastete Soll-Krümmung k_2 als Stellgröße ersetzt wird, siehe Bild 6.3.

Mit einer abschließenden Erweiterung wird die Berücksichtigung der entlasteten Ist-Krümmung k_{3m} der Prozessregelung *TRB* hinzugefügt. Bild 6.4 zeigt die um die Berücksichtigung der entlasteten Krümmung k_{3m} erweiterte Systemstruktur der Prozessregelung. Da durch die Distanz zwischen der Umformzone und dem Messort der entlasteten Krümmung k_{3m} eine Totzeit entsteht, ist in der Systemstruktur ein Verzögerungsglied integriert. Auf diese Weise wird die gemessene Ist-Krümmung k_{3m} mit der zugehörigen Soll-Krümmung k_3 verglichen und die korrekte Abweichung Δk_3 berechnet. Die Abweichung Δk_3 wird durch die Regeldifferenzaufbereitung RD_{k_3} bearbeitet und das Ergebnis als aufbereitete Radienabweichung Δk_{3a} zur Korrektur der prognostizierten Ist-Krümmung k_{3p} verwendet. Der Korrekturwert Δk_{3a} wird so lange unverändert verwendet, bis die zugehörige entlastete Ist-Krümmung k_{3m} gemessen werden kann. Mit ihr

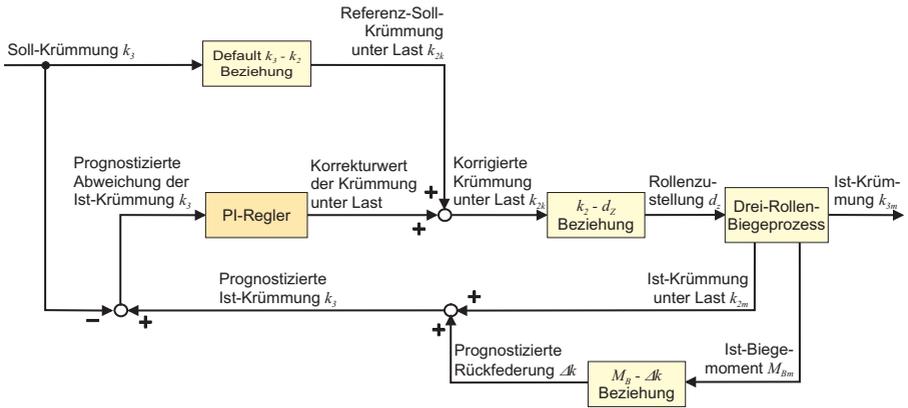


Abbildung 6.3: Basis-Systemstruktur der Prozessregelung TRB mit der belasteten Profilkrümmung als indirekte Stellgröße

wird wiederum die evtl. weiterhin vorhandene Abweichung berechnet und zur vorhergehenden Abweichung addiert.

Durch die aufbereitete Radienabweichung Δk_{3a} erfolgt somit in gewissen Abständen eine Validierung der Modellparameter und bei Bedarf erfolgt eine Verschiebung des Modells. Die Verschiebung wirkt sich auf alle folgenden Rollenzustellungen aus und sollte somit möglichst genau erfolgen. Da die gemessene Abweichung der Ist-Krümmung Δk_{3m} neben dem Modellfehler aber auch nicht ausreichend korrigierte Abweichungen aufgrund von Schwankungen der Profileigenschaften beinhaltet, wird die aufbereitete Radienabweichung Δk_{3a} nach einem Sicherheitsabstand d_s von 50 mm über einen Profillängenbereich l_p von 100 mm gemittelt und mit einer Dämpfung d versehen. Die Dämpfung ist abhängig von der Standardabweichung der gemessenen Werte. Je kleiner die Standardabweichung ist, desto stabiler und eindeutiger ist der Modellfehler und die Dämpfung ist gering. Eine große Standardabweichung deutet darauf hin, dass die Profileigenschaften großen Schwankungen unterliegen bzw. der Biegeprozess gestört ist. In diesem Fall erfolgt eine große Dämpfung der aufbereiteten Radienabweichung Δk_{3a} , um den Prozess nicht weiter zu destabilisieren. Der genaue Ablauf der Berechnung der aufbereiteten Radienabweichung Δk_{3a} kann den Gleichungen 6.3 - 6.5 entnommen werden.

$$\Delta \bar{k}_{3m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta k_{3m_i} \tag{6.3}$$

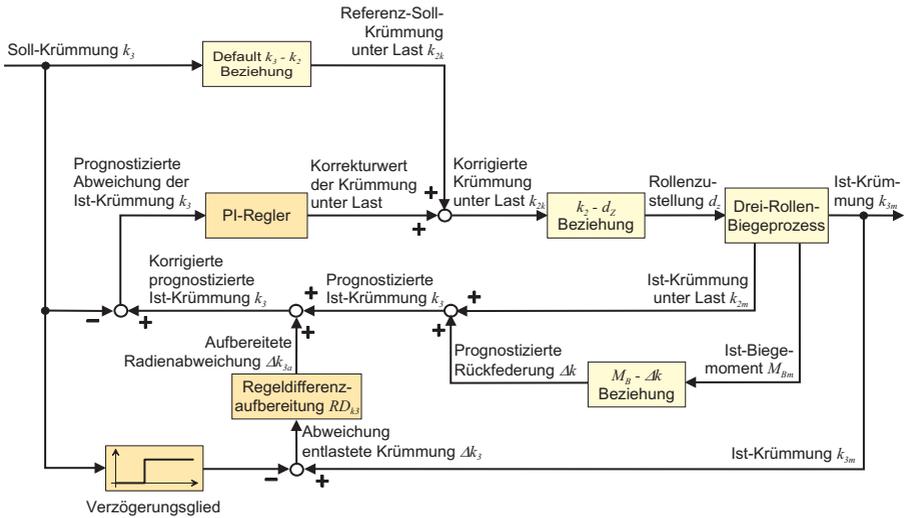


Abbildung 6.4: Systemstruktur der Prozessregelung *TRB* mit Berücksichtigung der gemessenen entlasteten Profilkrümmung

$$d = \begin{cases} 0,1 & : \frac{\sigma_{\Delta k_{3m}}}{|\Delta k_{3m}|} > 0,9 \\ 1,0 - \frac{\sigma_{\Delta k_{3m}}}{|\Delta k_{3m}|} & : \text{sonst} \end{cases} \quad (6.4)$$

$$\Delta k_{3a_i} = \Delta k_{3a_{i-1}} + d * \Delta \bar{k}_{3m} \quad \text{mit } \Delta k_{3a_0} = 0 \quad (6.5)$$

6.2.1 Validierung von TRB

Um die Leistungsfähigkeit von der Prozessregelung *TRB* bewerten zu können, werden im Folgenden Biegesimulationen mit dem virtuellen Prozess durchgeführt. Dabei wird ein Vierkantprofil 20 x 30 mm aus dem EN-AW 6060 über die hohe Kante auf einen Soll-Radius von 1000 mm gebogen. Zum Vergleich werden die Simulationen neben der Prozessregelung *TRB* auch mit den folgenden Reglern durchgeführt:

KONSTANT - Die von dem Prozesssimulationssystem *PROFI-V2* berechnete Rollenzustellung wird unverändert beibehalten.

YANG - Ein Regler nach der Beschreibung von Yang et al. [26], siehe Abschnitt 2.4.2.

HARDT - Ein Regler nach der Beschreibung von Hardt et al. [85], siehe Abschnitt 2.4.2.

Zum Vergleich der Regler werden Sprungfunktionen verwendet, da in dem Sprungsignal die volle Bandbreite an Frequenzkomponenten enthalten ist. Die Prozessregelungen müssen somit auf alle Frequenzen unmittelbar reagieren, was einer harten Systembelastung entspricht. Bei den verwendeten Sprungfunktionen werden gezielt jeweils die einzelnen Profileigenschaften

- E-Modul (+10 %)
- Streckgrenze (+10 %)
- Verfestigungsexponent (+10 %)
- Profilhöhe (+10 %)

ab der Profilposition 500 mm verändert. Während des Biegeprozesses wird das Profil mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 15 mm/s transportiert. Neben den Sprungfunktionen wird jedoch auch ein Simulationslauf vorgenommen, der die Streckgrenze und die Fließkurve gleichzeitig und kontinuierlich entlang der Profillängsachse variiert, wobei die Werkstoffkennwerte entsprechend den in Kapitel 4 vorgestellten Verläufen variiert werden. Die folgenden Bilder 6.5 bis 6.9 zeigen die Ergebnisse der einzelnen Simulationsläufe, wobei Bild 6.5 die Sprungantwort bei Erhöhung des E-Moduls um 10 % zeigt. Seine Erhöhung führt nach Gleichung 6.1 erwartungsgemäß zu einer Verringerung der Rückfederung, sodass ohne Korrektur der Rollenzustellung bei dem Konstant-Regler der entlastete Radius bei dem verwendeten Profil um ca. 38 mm abnimmt. Mit der Veränderung der Biegesteifigkeit nimmt die belastete Profilkrümmung gering ab und führt bei den Reglern YANG, HARDT und TRB zu der Prognose eines zu geringen entlasteten Profiltradius. Dies führt zu einer Erhöhung der Rollenzustellung und somit zu einer teilweisen Kompensation der Radienabweichung. Der Fehler wird jedoch erst zu ca. 23 % korrigiert, und erst die Messung der entlasteten Profilkrümmung beim Regler TRB führt zu einem entlasteten Profiltradius von 998 mm.

Die Erhöhung der Streckgrenze um 10 % führt zu einer Zunahme der Rückfederung und entsprechend einer Erhöhung des entlasteten Profiltradius auf 1039 mm, siehe Bild 6.6. Da mit der Erhöhung der Streckgrenze auch die Fließspannung steigt, steigt auch das Biegemoment. Dies wird von den Reglern HARDT und TRB als Zunahme der Rückfederung gedeutet und mit der Zunahme der Rollenzustellung beantwortet. Die Korrektur führt zu einem entlasteten

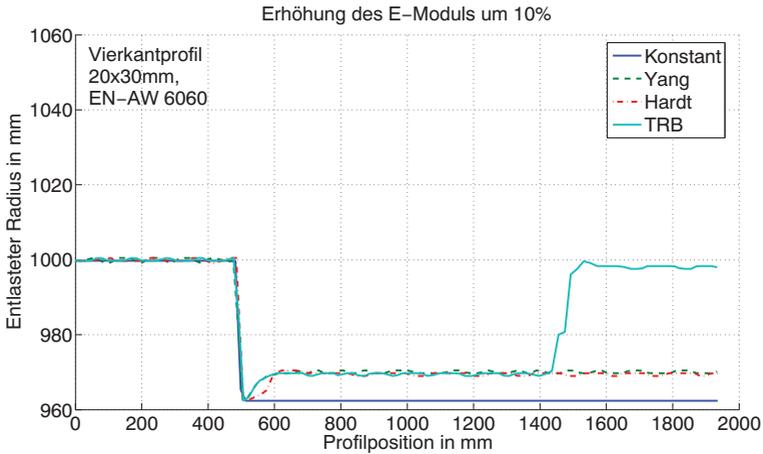


Abbildung 6.5: Sprungantwort nach Erhöhung des E-Moduls um 10 % (Profilvorschubgeschwindigkeit: 15 mm/s)

Profilradius von 1006 mm, die der Regler TRB nach der Messung des entlasteten Profilradius auf 1000 mm korrigiert. Der Regler YANG wertet nur die belastete Profilkrümmung aus. Deren Veränderung ist jedoch nur gering, sodass die Korrektur dementsprechend ebenfalls gering ausfällt und zu einem entlasteten Profilradius von 1034 mm führt. Mit der Erhöhung des Verfestigungsexponenten um 10 % steigt das Biegemoment, die Rückfederung nimmt zu und dementsprechend vergrößert sich der entlastete Profilradius um 14 mm. Die belastete Profilkrümmung nimmt so weit zu, dass der Regler YANG trotz einer geringer prognostizierten Rückfederung von einem zu großen entlasteten Profilradius ausgeht und die Rollenzustellung erhöht. Dies führt in diesem Fall zu einer vollständigen Kompensation der Radienabweichung, wobei dies bei dem Regler YANG jedoch nicht generell der Fall sein wird. Die Regler HARDT und TRB gehen aufgrund des gemessenen Biegemoments von einer erhöhten Rückfederung aus, sodass ihre Prognose für den entlasteten Profilradius größer als bei dem Regler YANG ausfällt. Dies führt auch zu einer erhöhten Korrektur der Rollenzustellung, die zu einer Abweichung des entlasteten Profilradius von -27 mm führt und somit größer als die Abweichung ohne Korrektur der Rollenzustellung ist. Mit der Messung des entlasteten Profilradius beim Regler TRB wird die Radienabweichung abschließend auf -1 mm korrigiert.

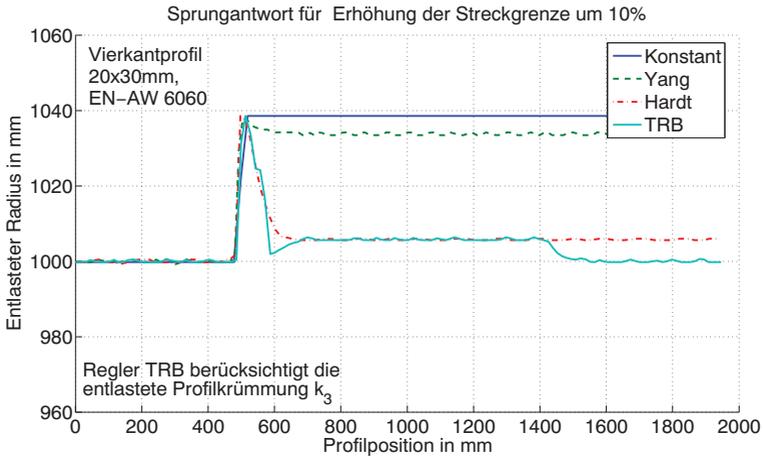


Abbildung 6.6: Sprungantwort nach Erhöhung der Streckgrenze um 10 % (Profilvorschubgeschwindigkeit: 15 mm/s)

Die Veränderung der Profilquerschnittshöhe, siehe Bild 6.8, führt durch die veränderten geometrischen Verhältnisse automatisch zu einer Erhöhung der Rollenzustellung, die zu einer Abnahme der belasteten Profilkrümmung von 10 mm führt. Des Weiteren nimmt das Biegemoment aufgrund des erhöhten Flächenträgheitsmomentes um 29 Nm zu. Die erhöhte Rollenzustellung und die erhöhte Biegesteifigkeit des Profils führen zu einer Abnahme des entlasteten Profilradius auf 979 mm. Die Zunahme des Biegemoments führt bei den Reglern HARDT und TRB zu der Prognose einer erhöhten Rückfederung. In Verbindung mit dem gemessenen belasteten Profilradius prognostizieren sie jedoch einen zu kleinen entlasteten Profilradius, sodass sie die Rollenzustellung vermindern und zu einem entlasteten Profilradius von 986 mm korrigieren können. Der Regler YANG prognostiziert dagegen eine geringere Rückfederung, sodass der prognostizierte entlastete Profilradius geringer als bei den Reglern HARDT und TRB und somit die Korrektur der Rollenzustellung größer ist. Der Regler YANG regelt den entlasteten Profilradius auf einen Wert von 995 mm ein. Auch in diesem Fall führt die Messung des entlasteten Profilradius beim Regler TRB zu einer endgültigen Korrektur der Radienabweichung.

Den Sprungantworten auf die verschiedenen Störgrößen beim Profilbiegen kann entnommen werden, dass alle Regler ein stabiles und kein Aufschwingverhalten zeigen. Bei den Reglern HARDT und YANG bleibt in der Regel eine bleibende Regeldifferenz bestehen, da beide ein

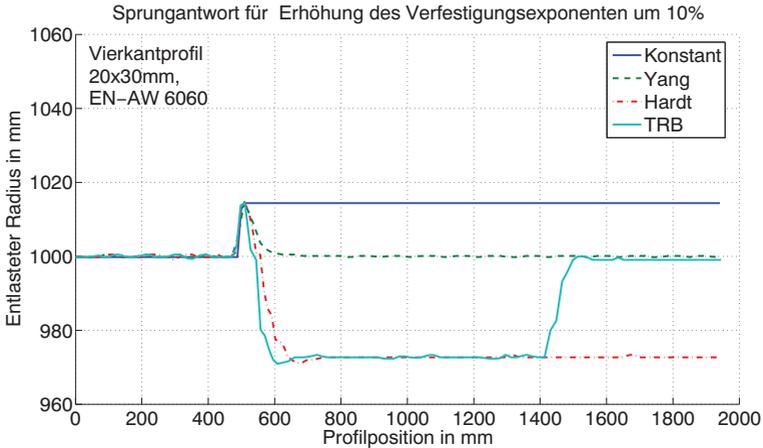


Abbildung 6.7: Erhöhung des Verfestigungsexponenten um 10 % (Profilvorschubgeschwindigkeit: 15 mm/s)

festes Modell verwenden und die entlastete Profilkrümmung nicht berücksichtigen. Des Weiteren liegt die Ausregellänge ohne Berücksichtigung der Korrektur auf Basis der entlasteten Profilkrümmung bei den Reglern bei ca. 120 mm - 200 mm. Bei einer Profilvorschubgeschwindigkeit von 15 mm/s ergibt sich daraus eine Ausregelzeit von 8 s - 13 s. Dies ist eine relativ lange Zeit, begründet sich aber darin, dass in den Reglern der I-Regler zwar genau, aber auch langsam regelt. Des Weiteren bewirkt die erste Reaktion der Regler auf die Sprungfunktion wiederum Veränderungen bei dem Biegemoment und der belasteten Profilkrümmung. Auf diese Veränderungen reagieren die Regler wieder, sodass sich hier auch erst eine Gleichgewichtssituation bilden muss. Um die Wirkung der Ausregelzeit bewerten zu können, wurde das Verhalten der Regler bei kontinuierlich auftretenden Schwankungen bei der Streckgrenze und der Fließkurve ebenfalls im virtuellen Biegeprozess betrachtet, dessen Ergebnis dem Bild 6.9 entnommen werden kann. Dabei wurden die beiden Werkstoffkennwerte entsprechend den ermittelten Verläufen aus Kapitel 4, siehe Bild 4.3, entlang der Profillängsachse variiert. Das Biegeergebnis aus dem virtuellen Biegeprozess zeigt, dass die Regler HARDT und TRB die Ist-Soll-Abweichung des entlasteten Profiltradius gegenüber dem unregulierten Prozess reduzieren können. Die Standardabweichung der Ist-Soll-Abweichung liegt beim unregulierten Prozess bei 12,3 und wird beim Regler nach HARDT auf 7,2 bzw. beim Regler TRB auf 7,5 reduziert. Die Standardabweichung ist bei dem Regler TRB etwas größer, wobei dies aus der Berücksichtigung der

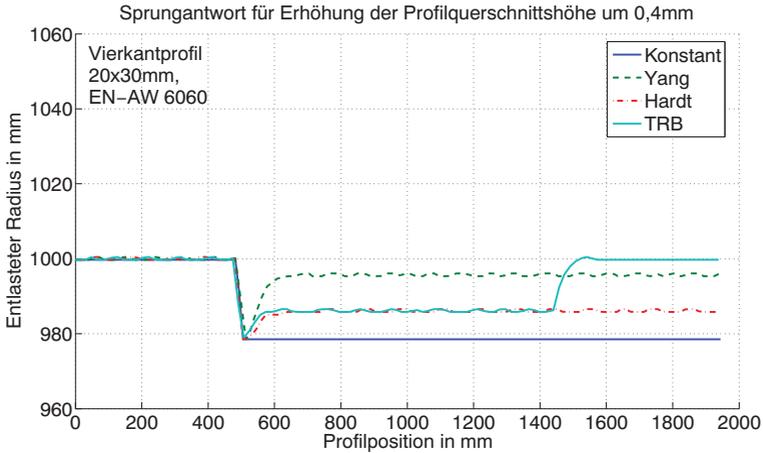


Abbildung 6.8: Sprungantwort nach Erhöhung der Profilquerschnittshöhe um 0,4 mm (Profilvorschubgeschwindigkeit: 15 mm/s)

entlasteten Profilkrümmung resultiert. Diese gleicht bestehende Regelabweichungen aus und führt dementsprechend zu einem Versatz des Modells. Bei geringen Abweichungen führt dies zu einem geringen Schwingen um den Idealwert, wobei dies über den Dämpfungsfaktor d , siehe Gleichung 6.4, gesteuert werden kann.

Sind dagegen beim simulierten Profil die Streckgrenze und der Verfestigungsexponent ständig größer als die in der Profilbeschreibung angegebenen Kennwerte, so ist nur der Regler TRB in der Lage, dies zu erkennen und die Regeldifferenz weitestgehend zu minimieren, siehe Bild 6.10. Der Ausgleich von TRB erfolgt erst nach einer relativ langen Profilstrecke von ca. 700 mm Profilstrecke. Dies begründet sich darin, dass bei dem virtuellen Biegeprozess die realen kinematischen Verhältnisse der Profilbiegemaschine ROUNDO R2S spezial abgebildet werden und bei dieser aufgrund einer Spezialanfertigung die Außenrollen einen großen Abstand zur Mittelrolle besitzen, siehe Abschnitt 7.2. Dies bewirkt, dass der Messort der entlasteten Profilkrümmung ca. 550 mm von der Umformzone entfernt ist. Durch den im Regler TRB verwendeten Sicherheitsabstand von 50 mm und den Bereich zur Mittelwertbestimmung der Radienabweichung von 100 mm ergibt sich die Distanz von 700 mm.

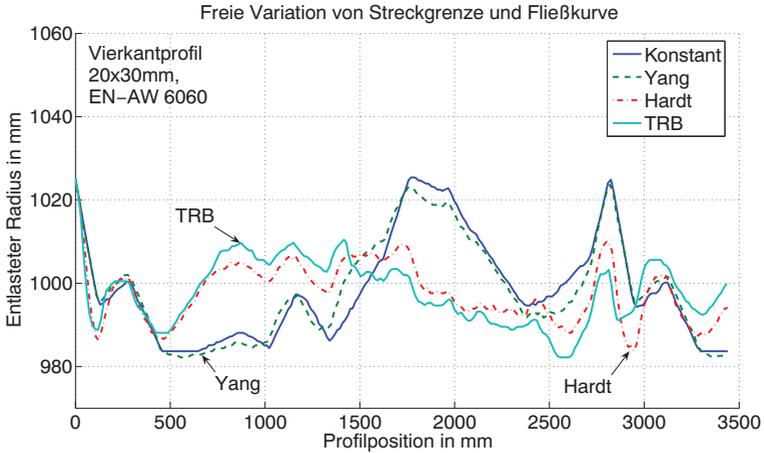


Abbildung 6.9: Kontinuierliche Variation der Streckgrenze und der Fließkurve (Profilvorschubgeschwindigkeit: 15 mm/s)

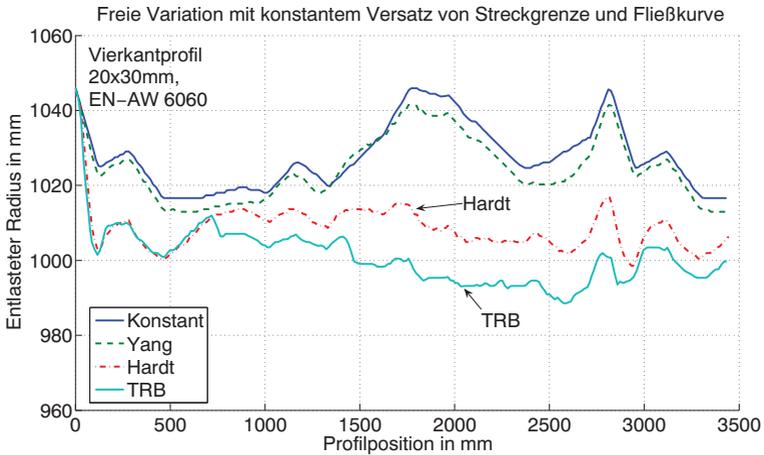


Abbildung 6.10: Kontinuierliche Variation und konstanter Versatz der Streckgrenze und der Fließkurve (Profilvorschubgeschwindigkeit: 15 mm/s)

6.2.2 Erweiterungspotenzial

Betrachtet man die Sprungantworten des Reglers TRB bei Erhöhung des Verfestigungsexponenten und der Profilquerschnittshöhe, so zeigt sich bei ihnen, dass die Prognose der Rückfederung zu groß ausfällt und somit im ersten Korrekturschritt eine relativ große Regeldifferenz bestehen bleibt. Dies begründet sich in der großen Abweichung des Biegemoments durch die Veränderung der Halbzeugeigenschaften. Des Weiteren setzt der Regler TRB die Messung der belasteten Profilkrümmung k_2 voraus. Dies ist problematisch, da elastische Querschnittsdeformationen die Messungen verfälschen, siehe Abschnitt 7.4.6, eine Andrückrolle eingesetzt wird oder nahe beieinanderstehende Außenrollen den Zugang zur Biegelinie verhindern.

Soll die Messung der belasteten Profilkrümmung k_2 vermieden werden, so muss die Messung durch eine Prognose ersetzt werden, die nur auf Basis des gemessenen Biegemoments erfolgen kann. Zur Bewertung, ob das Biegemoment für eine Prognose mit ausreichender Güte geeignet ist, wurden die Veränderungen des Biegemoments und des belasteten Profilradius den Sprungantworten bei dem Regler KONSTANT aus dem obigen Abschnitt entnommen, für die entlasteten Sollradien von 500 mm und 2000 mm Daten entsprechend generiert und in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei zunehmendem Biegemoment der belastete Profilradius sowohl ab- wie auch zunehmen kann. Des Weiteren variieren die Veränderungen des belasteten Profilradius auf das Biegemoment bezogen zwischen den veränderten Halbzeugeigenschaften sehr stark. Beides zusammen zeigt, dass auf Basis des gemessenen Biegemoments keine gesicherte Prognose für Veränderungen des belasteten Profilradius vorgenommen werden kann. Der belastete Profilradius ist dementsprechend eine wichtige Prozessgröße, wenn eine Prozessregelung auf Veränderungen von Halbzeugeigenschaften schnell reagieren soll.

Den Ergebnissen aus Tabelle 6.1 kann aber auch entnommen werden, dass die überhöhte Prognose der Rückfederung reduziert werden kann. Dabei kann aufgrund der Veränderung des belasteten Profilradius entschieden werden, ob das erhöhte Biegemoment auf Basis einer Zunahme bei der Profilhöhe oder einer erhöhten Werkstoffverfestigung auftritt. Mit dieser Kenntnis kann vor der Prognose der Rückfederung als Korrektur eine Dämpfung des Biegemoments erfolgen, wobei dies durch ein Kennlinienfeld realisiert werden kann. Bei der Parametrisierung des Kennlinienfelds ergibt sich allerdings die Problematik, dass im realen Biegeprozess das Biegemoment von verschiedenen Halbzeugeigenschaften beeinflusst wird. Somit kann das ge-

Sollradius	500 mm	1000 mm	2000 mm
E-Modul +10 %			
Biegemoment	+0,7 Nm	+2,0 Nm	+5,0 Nm
Bel. Radius	-2 mm	-5 mm	-10 mm
Streckgrenze +10 %			
Biegemoment	+0,3 Nm	+0,6 Nm	+1,5 Nm
Bel. Radius	-2 mm	-6 mm	-14 mm
Verfestigungsexponent +10 %			
Biegemoment	+19,7 Nm	+11,0 Nm	+8,5 Nm
Bel. Radius	+1 mm	+2 mm	+4 mm
Profilquerschnittshöhe +0,1 mm			
Biegemoment	+7,5 Nm	+7,4 Nm	+7,6 Nm
Bel. Radius	-1 mm	-3 mm	-6 mm

Tabelle 6.1: Veränderung des belasteten Radius und des Biegemoments bei Variation von Halbzeugeigenschaften (Vollprofil 20 x 30 mm aus EN-AW 6060)

messene Biegemoment nicht eindeutig der Abweichung einer Halbzeugeigenschaft zugeordnet werden. Ein starres Kennlinienfeld kann dementsprechend zu einer falschen Korrektur erfolgen, sodass der Einsatz eines Neuro-Fuzzy-Modells wie z.B. des NEFCON-Modells [94] vorteilhaft sein kann. Dieses erlaubt eine Optimierung des Kennlinienfelds während des Prozesses, wobei dies teilweise auch durch den virtuellen Prozess im Vorfeld erfolgen kann.

Kapitel 7

Versuchsaufbau und Experimente

In den beiden vorhergehenden Kapiteln wurde die Trobec-Testumgebung vorgestellt und dieses zur Untersuchung von neuen und bereits bestehenden Prozessregelungen eingesetzt und validiert. Dabei wurden entsprechend Kapitel 6 von den Prozessregelungen die folgenden Prozessgrößen bzw. Stellgrößen

- Profileingangskrümmung k_1 ,
- Profileinzug d_c ,
- Verlauf der Biegelinie B_L und/oder die belastete Profilkrümmung k_2 ,
- entlastete Profilkrümmung k_3 ,
- Rollenzustellung d_Z bzw. Position der Zustellstellen (a_0 und b_0) und
- Hauptkräfte an der Biegerolle und den Zustellrollen

eingesetzt. Im folgenden Kapitel wird die Anbindung der Trobec-Testumgebung an eine Versuchseinrichtung vorgestellt, die die erforderlichen Prozessgrößen bereitstellt. Dazu wird als Erstes der Versuchsaufbau in seiner Gesamtheit vorgestellt, und im Anschluss daran seine Komponenten im Einzelnen. Abschließende geregelte Biegungen dienen der experimentellen Validierung der Trobec-Testumgebung.

7.1 Versuchsaufbau

Der Gesamtaufbau des Versuchsstandes und seine Anbindung an die Trobec-Testumgebung kann dem Bild 7.1 entnommen werden. Die Trobec-Testumgebung ist auf einem separaten Linux-PC installiert, der als Steuerungs-PC fungiert. In ihm sind verschiedene Mess- und CAN-Buskarten installiert, über die die Aktoren kontrolliert bzw. die Sensoren ausgelesen werden. Bei den CAN-Buskarten handelt es sich um intelligente Versionen, auf denen der CAL/CANopen-Dienst komplett realisiert ist und somit der Prozessor des Steuerungs-PCs von diesen Aufgaben entlastet ist. Eine Trägerkarte MAX6PCI der Firma Sorcus beherbergt neben den Messkarten auch zwei Computermodule, auf denen das Echtzeitbetriebssystem OS-X installiert ist. Programme auf den Computermodulen kontrollieren die Messkarten und können auch die Messdaten einer Vorbearbeitung unterziehen, womit ebenfalls eine Entlastung des Steuerungs-PCs realisiert werden kann.

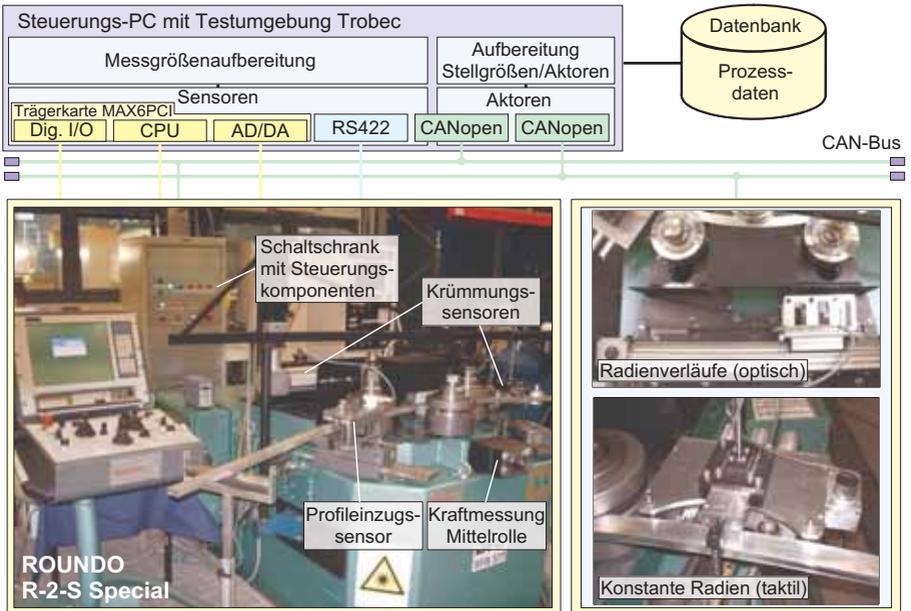


Abbildung 7.1: Versuchsaufbau zur Prozessregelung beim Drei-Rollen-Biegen

Beim Versuchsstand kommt als Biegemaschine eine speziell angepasste Drei-Rollen-Biege-

maschine *ROUND O R2S spezial* der Firma Roundo AB, Schweden, zum Einsatz. Die Messung des Profileinzugs kann intern durch die Biegemaschine oder durch einen externen Profileinzugssensor gemessen werden. Weil die interne Messung auf Basis der Rotation der Biegerolle erfolgt und somit anfällig für Schlupf zwischen dem Profil und den Rollen ist, wird für die Untersuchungen ausschließlich der externe Profileinzugssensor verwendet, siehe Abschnitt 7.3.

Da die Untersuchung der Prozessregelungen anhand eines einzigen Durchlaufs des Profils erfolgt, kann auf eine Messung der Profileingangskrümmung k_1 verzichtet werden. Stattdessen wird für k_1 die Profileingangskrümmung verwendet, die in der Halbzeugbeschreibung bei den Eingangsdaten angegeben wird. Die Aufnahme der Biegelinie erfolgt durch einen selbst entwickelten optischen Krümmungssensor, der durch Verfahren eines Lasertriangulationssensors entlang der Profilkontur Stützpunkte von der Umformzone aufnimmt, siehe Abschnitt 7.4. Somit können beliebige Ausschnitte der Biegelinie zur Auswertung herangezogen werden und sowohl konstante Radien wie auch Radienverläufe erfasst werden. Die entlastete Profilkrümmung k_3 wird nicht mit dem optischen Krümmungssensor aufgenommen, da mit der Rollenzustellung der Messort der entlasteten Profilkrümmung k_3 großen Änderungen unterliegt und somit eine Nachführung des Krümmungssensors während des Biegeprozesses notwendig ist, siehe Bild 7.2. Eine entsprechende Nachführung wäre bei dem selbst entwickelten optischen Krümmungssensor

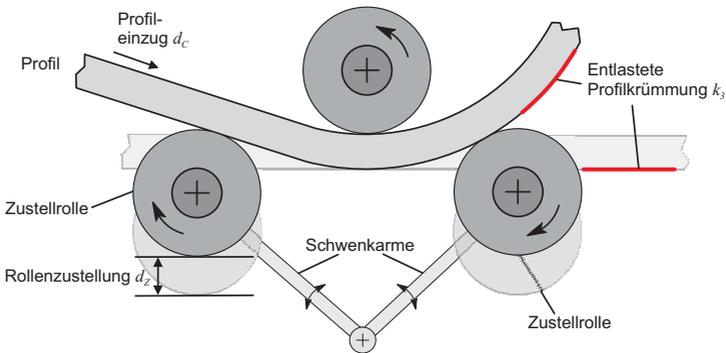


Abbildung 7.2: Messort der entlasteten Profilkrümmung verschiebt sich mit der Rollenzustellung aufgrund des bewegten Lasertriangulationssensors und der damit verbundenen Dynamik sehr aufwendig, sodass stattdessen der in Kapitel 7.4.1 vorgestellte taktile Mehrpunktkrümmungssensor verwendet wird. Dieser ist an der Biegemaschine mittels einer schwenkbaren Aufhängung befestigt und eine Andrückrolle sorgt für einen permanenten Kontakt mit dem Profil. Als letzte

Prozessgröße für die Prozessregelung wird die Kraft gemessen, die das Profil auf die Mittelrolle ausübt, siehe Abschnitt 7.5, und auf deren Basis das Biegemoment M_B berechnet.

Die einzelnen Sensoren und Aktoren werden über einzelne nebenläufige Prozesse ausgelesen bzw. angesprochen. Die Sensordaten werden dabei von der Trobec-Testumgebungs Komponente *Messgrößenaufbereitung* ausgelesen und die Stellgrößen und Aktorendaten werden von der Trobec-Testumgebungs Komponente *Aufbereitung Stellgrößen/Aktoren* an die Aktoren weitergereicht.

7.2 Drei-Rollen-Biegemaschine

Roundo R2S spezial

Die Drei-Rollen-Biegemaschine ROUND0 R2S spezial ist eine Sonderanfertigung der Firma ROUND0 AB, Schweden, und basiert auf deren Standardmodell ROUND0 R2S. Bei diesem sind die Zustellrollen an Schwenkarmen befestigt, deren andere Enden an einem gemeinsamen Drehpunkt gelagert sind, siehe Bild 7.3. Die Positionierung der Zustellrollen erfolgt einzeln über Hydraulikzylinder, die an den Schwenkarmen angreifen. Bei dieser Art von Maschinenkinematik bewirkt eine Änderung der Rollenzustellung d_Z immer auch eine Änderung der Abstände a_0 und b_0 . Damit diese Abstände nicht unnötig groß werden und somit beim Anbiegen von Profilen viel Verschnitt entsteht, sind die Schwenkarme bei den Standardmaschinen relativ kurz ausgelegt. Dies führt dazu, dass bei einer großen Rollenzustellung d_Z die Zustellrollen beinahe aneinanderstoßen und somit die Biegelinie nicht mehr optisch erfasst werden kann. Da die Biegelinie für die Prozessregelung eine notwendige Prozessgröße ist, ist die ROUND0 R2S spezial mit langen Schwenkarmen ausgestattet, sodass von der Biegelinie immer eine Länge von $l_U \geq 300 \text{ mm}$ zugänglich ist. Als weiteres Sonderelement besitzt die ROUND0 R2S spezial eine Biegerolle, die um eine Achse in Richtung der Zustellrollen schwenken kann und dabei einen Weg von maximal $d_M = 10 \text{ mm}$ verfahren kann. Diese Eigenschaft wird zur Messung der Kraft an der Biegerolle eingesetzt, wobei dies in Abschnitt 7.5 detailliert beschrieben wird.

Die Ansteuerung der Biegemaschine erfolgt üblicherweise über einen HMI-Rechner, der über den CAN-Bus Befehle und Daten mit der SPS der Biegemaschine austauscht. Da der HMI-Rechner kein programmierbares Interface bietet, erfolgt die Ansteuerung der Biegemaschine für die Versuchsdurchführungen über einen Steuerungs-PC, der ebenfalls an den CAN-Bus

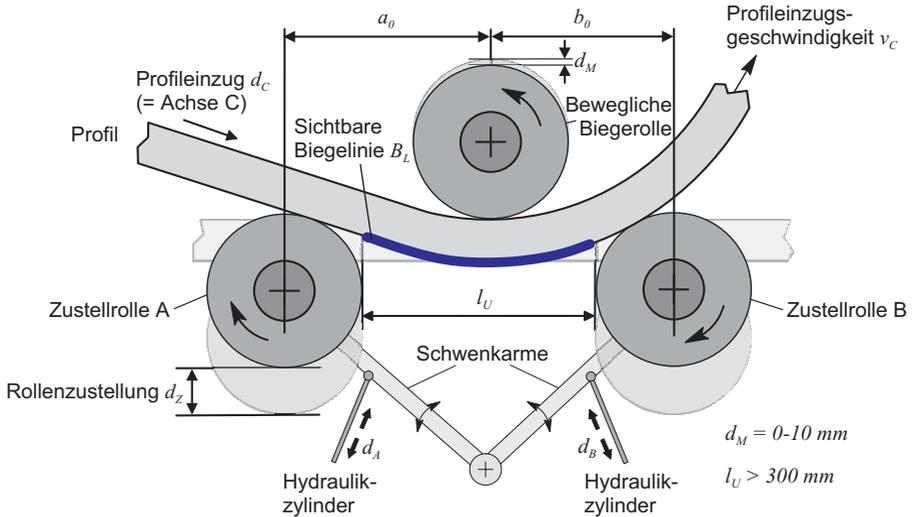


Abbildung 7.3: Kinematik und Achsen der Drei-Rollen-Biegemaschine ROUND0 R2S spezial
 angeschlossen ist. Die Firma ROUND0 AB hat diesbezüglich Einblicke in das auf dem CAN-
 Bus verwendete Protokoll offengelegt, sodass der Steuerungs-PC die in Tabelle 7.1 aufgeführten
 Achsen ansteuern und auslesen kann.

Achse	ID	Geschw.
Eingangsrolle	A	1-25 mm/s
Ausgangsrolle	B	1-25 mm/s
Profilleinzug	C	1-116,67 mm/s

Tabelle 7.1: Aufstellung der kontrollierbaren Achsen der Biegemaschine ROUND0 R2S spezial
 mit ihrem jeweiligen Geschwindigkeitsbereich

Für die Untersuchung der Prozessregelung ist das dynamische Verhalten der Biegemaschine
 und somit das der numerisch gesteuerten Achsen A, B und C relevant. Die Achsen A und B
 müssen präzise verfahren werden können, da ihre Position die Rollenzustellung d_Z definiert. Bei-
 de Achsen fahren eine neue Position lagegeregelt an. Sobald der Toleranzbereich erreicht wird,
 wird der Hydraulikkreislauf durch ein Sperrventil geschlossen und somit die Achse in Position
 gehalten. Da die Prozessregelung mit jedem Regelungsschritt die Rollenzustellung als Stellgröße
 an die Maschine schickt, findet in kurzen Abständen immer wieder eine Aktualisierung der

Achsenpositionen statt, sodass Leckagen in der Hydraulik keine Auswirkungen haben können. Des Weiteren haben Experimente gezeigt, dass die Rollenzustellung mit einer Genauigkeit von ± 0.03 mm erfolgt, wobei die Überschwingweite im Mittel ± 0.09 mm mit einer Standardabweichung von 0.04 mm beträgt. Die genaue Positionierung der Rollenzustellung ist wichtig, da z.B. bei einem 30 x 30 x 2 mm Hohlprofil aus EN-AW 6060 und einem Biegeradius von 1000 mm Änderungen der Rollenzustellung im Bereich von 0,1 mm Änderungen im Profilradius von 10 mm zur Folge haben können. Im Vergleich zu den Achsen *A* und *B* muss die Achse *C* nicht mit der gleichen Präzision verfahren werden können. Sie definiert den Profileinzug d_C und somit den Durchlauf des Profils durch die Biegemaschine; Messungen haben hier eine Positionsgenauigkeit der Lageregelung von $\pm 0,3$ mm ergeben.

7.3 Profileinzugssensor

Bei der Biegemaschine ROUND0 R2S spezial wird der Profileinzug d_C standardmäßig über einen Inkrementaldrehgeber aufgenommen, der die Rotation der Mittelrolle misst. Bei diesem Verfahren wird die Rotation über den einstellbaren Abstand zwischen dem Profil und der Rotationsachse der Mittelrolle in den Profileinzug umgerechnet. Eine genaue Messung des Profileinzugs bedingt somit, dass zwischen dem Profil und der Mittelrolle kein Schlupf auftritt und der Abstand sich nicht ändert. Diese Annahmen sind jedoch nicht haltbar, da je nach den Reib-

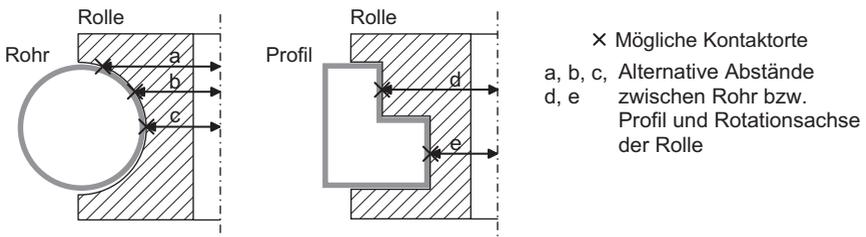


Abbildung 7.4: Undefinierte Kontaktsituation bei Rohren bzw. Profilen mit mehreren Kontaktflächen

verhältnissen Schlupf zwischen den angetriebenen Rollen und dem Profil nicht ausgeschlossen werden kann. Des Weiteren sind während des Biegeprozesses die Kontaktverhältnisse zwischen dem Profil und der Mittelrolle bei Rohren bzw. Profilen mit mehreren möglichen Kontaktflächen zur Mittelrolle nicht eindeutig bestimmt, siehe Bild 7.4. Dies verhindert die korrekte

Umrechnung der Mittelrollenrotation in den Profileinzug, sodass ein externer Profileinzugssensor eingesetzt werden muss.

In der Regel werden externe Profileinzugssensoren in eine Andrückrolle integriert, die unter der Mittelrolle gegen das Profil drückt. Dies hat den Vorteil, dass an dieser Stelle die Profilposition nahezu unabhängig vom zu biegenden Profilradius ist. Für den vorliegenden Versuchsaufbau ergibt sich jedoch der Nachteil, dass der Profileinzugssensor im Bereich der Umformzone arbeitet und somit die Aufnahme der Biegelinie in Teilbereichen verhindern würde. Aus diesem Grund wurde ein externer Profileinzugssensor entwickelt [97], der vor der Eingangsrolle auf das ungebogene Profil gesetzt wird, siehe Bild 7.5. Dabei wird der Profileinzug mittels

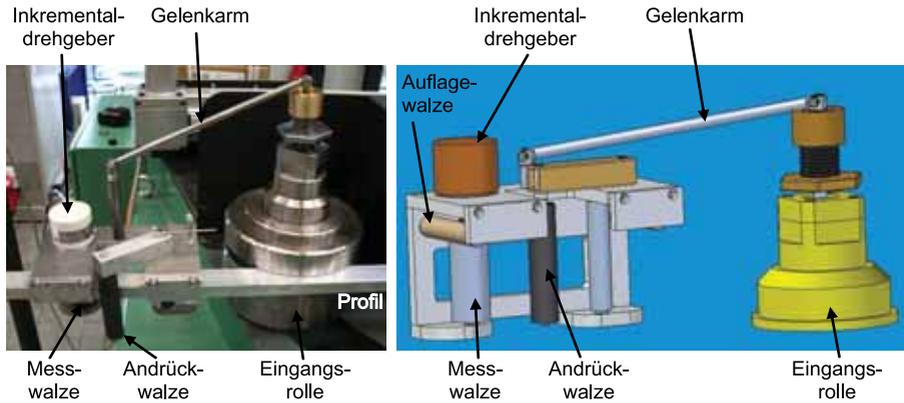


Abbildung 7.5: Sensor zur Messung des Profileinzugs

einer am Profil anliegenden, frei rotierenden Messwalze in eine Rotation übertragen, die von einem Inkrementaldrehgeber aufgenommen wird. Die gemessenen Inkremente werden dann in Verbindung mit dem Durchmesser der Messwalze in den Profileinzug d_C umgerechnet. Auflagewalzen an der Oberseite und an der Hinterseite des Einzugssensors sorgen in Verbindung mit einer Andrückwalze für eine gute Führung des Sensors und den notwendigen schlupffreien Kontakt der Messwalze zum Profil. Mit der Profilbiegemaschine ist der Einzugssensor über einen Gelenkarm mit einwärtigen Gelenken auf der Eingangsrolle lagernd montiert. Die einwärtigen Gelenke verhindern eine Verkippung des Sensors bei schmalen Profilen oder Rohren. Des Weiteren sorgt die Montage an der Eingangsrolle dafür, dass der Sensor sowohl beim ungebogenen Profil als auch bei kleinsten Biegeradien immer nahe der Eingangsrolle verbleibt, sodass übermäßiger Verschnitt vermieden wird. Der Inkrementalgeber des Profileinzugssensors ist direkt

an der ROUND0 R2S spezial angeschlossen und wird über deren SPS in den Profileinzug d_C umgerechnet. Sein Wert wird über den CAN-Bus an den Steuerungs-PC übertragen.

7.4 Krümmungssensor

Zur Messung der belasteten Profilkrümmung konnte auf keinen bestehenden Krümmungssensor zurückgegriffen werden, sodass ein Krümmungssensor neu entwickelt wurde. Dieser sollte sowohl einen konstanten Radius wie auch eine Kontur bzw. einen Radienverlauf aufnehmen können, sodass nicht nur die belastete Profilkrümmung, sondern auch die Biegelinie aufgenommen werden kann. Bevor dieser im Einzelnen vorgestellt wird, werden Messmethoden zur Krümmungsmessung anhand von realisierten Krümmungssensoren skizziert.

7.4.1 Methoden der Krümmungsmessung

Prinzipiell werden zur Krümmungsmessung im Bereich der Profilmumformung optische und taktile Sensoren eingesetzt, wobei die taktilen auf dem Stützpunkt- oder dem Integralverfahren basieren. Das Bild 7.6 zeigt eine Klassifizierung der verschiedenen Messprinzipien mit jeweils ein oder zwei realisierten Vertretern.

Basis der Stützpunktverfahren ist das vornehmlich taktile Abtasten der Oberfläche des Profils zur Aufnahme von Stützpunkten. Ist der Abstand von drei Messpunkten auf der Profilloberfläche zueinander bekannt, kann durch Anwendung der Sekantengleichung [101] eine Krümmung berechnet werden. Bei dieser direkten Vorgehensweise führen jedoch Oberflächenbeschädigungen des Profils zu großen Abweichungen bei der berechneten Krümmung. Des Weiteren existiert ein Trade-Off zwischen der Messung von kleinen Krümmungen und einem möglichst kleinen Abstand zwischen den äußeren Messpunkten. Mit wachsendem Abstand zwischen den Messpunkten wächst auch die Sekantenhöhe, die durch den mittleren Messpunkt aufgenommen wird. Dadurch können mit einem beschränkten Messfehler auch große Radien gemessen werden. Mit wachsendem Abstand der äußeren Messpunkte fällt jedoch auch die Eignung des Krümmungssensors zur Aufnahme von Krümmungsverläufen. Der Krümmungssensor Bending Scanner BS10 der Firma Klingelberg verwendet zwei Rollen in einem Abstand von 90 mm zur Definition der äußeren Messpunkte und einen Lasertriangulationssensor zur Aufnahme der Sekantenhöhe. Ein Servoantrieb verfährt dieses System entlang der Profillängsachse, sodass die

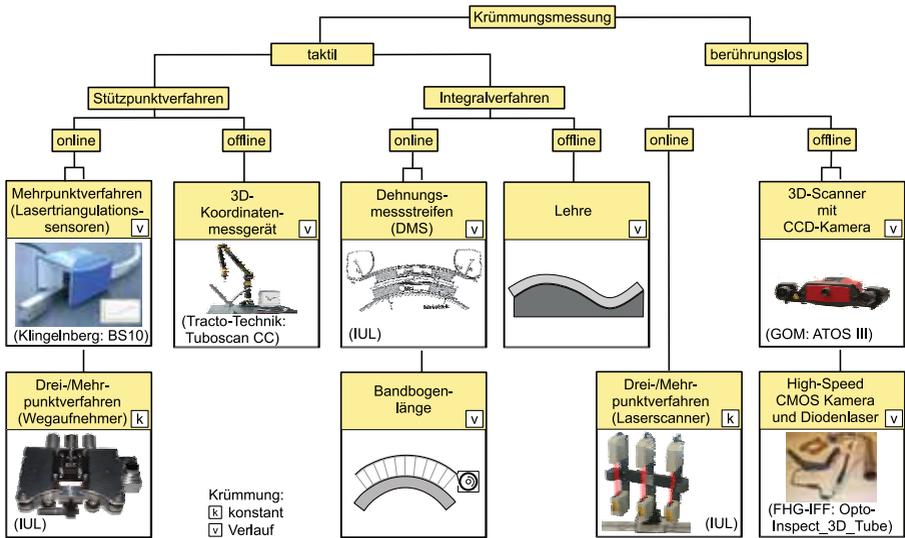


Abbildung 7.6: Übersicht über verschiedene Prinzipien der Krümmungsmessung mit Unterscheidung von Online- bzw. Offlineverfahren und Messung von konstanten Krümmungen bzw. Krümmungsverläufen (Quellen: [24, 99–106])

Profilkontur mit einer Genauigkeit von 0,1 mm abgetastet wird und neben konstanten Krümmungen auch Krümmungsverläufe aufgenommen werden können. Eine Möglichkeit, Messabweichungen durch Oberflächenbeschädigungen zu vermindern, besteht durch Aufnahme von mehr als drei Messpunkten. Am IUL wurde von Chatti [24] ein Krümmungssensor entwickelt, der insgesamt fünf Laufrollen zur Abtastung der Profilkontur verwendet. Die äußeren Messpunkte sind starr und 250 mm voneinander entfernt. Die mittleren drei Laufrollen sind an verschiebbaren Schäften montiert, an deren entgegengesetzten Enden Umlenkrollen befestigt sind. Durch diese Umlenkrollen wird ein Faden von einer Trommel abgewickelt, wobei die Abwicklung durch einen Drehgeber gemessen wird. Die Abwicklungslänge des Fadens kann den Sekantenhöhen der drei Messpunkte zugeordnet und somit die Krümmung berechnet werden. Aufgrund des großen Abstands der äußeren Laufrollen voneinander eignet sich der Krümmungssensor nur zur Aufnahme von konstanten Krümmungen, wobei Radien ≥ 100 mm und ≤ 5000 mm [101] mit relativen Messfehlern von $\leq 0,5$ % gemessen werden können.

Während Krümmungssensoren des Stützpunktverfahrens die Krümmung auf Basis von ein-

zelen Stützpunkten berechnen, verwenden die Krümmungssensoren auf Basis des Integralverfahrens eine Messgröße, die einen größeren Bereich der Profilkontur repräsentiert und somit einen Rückschluss auf die Krümmung in diesem Bereich erlaubt. Als Messgröße kommt unter anderem die Dehnung durch Einsatz von Dehnungsmessstreifen (DMS) [99] oder die Bogenlänge (Abwicklung eines Fadens entlang der Oberfläche) [24] in Betracht. Bei komplexeren Konturen und langen Profilen können Konturlehren, die das gesamte Profil gleichzeitig vermessen, vorteilhaft sein, da sie eine Beurteilung des Biegeergebnisses als Ganzes ermöglichen. In diesem Falle erlauben sie eine Bewertung ähnlich der Messung einer Koordinatenmessmaschine, bei der das Profil fix in ein Koordinatensystem gelegt wird und die Kontur punktweise abgetastet wird. Bei Verwendung von lokal arbeitenden Krümmungssensoren kann aufgrund des auftretenden Messfehlers und der Aufsummierung dieses Messfehlers entlang der Profilkontur eine Kontur entstehen, die mit der tatsächlichen Kontur nicht übereinstimmt.

Neben den taktilen Krümmungssensoren stellen die optischen und somit berührungslos arbeitenden Krümmungssensoren eine weitere Kategorie dar. Da sie zur Bestimmung der Kontur keinen direkten Kontakt zum Profil haben müssen, eignen sie sich auch für den Einsatz bei extremen Bedingungen, wie der Messung der Profilkrümmung beim Runden beim Strangpressen nach dem Austritt aus dem Pressenmaul. An dieser Stelle hat das Profil noch eine Temperatur im Bereich von 450-500 °C, sodass ein Krümmungssensor auf Basis von drei Laserscannern eingesetzt und die Krümmung mittels des Sekantenverfahrens berechnet wird [101].

7.4.2 Sensoraufbau

Von den vorgestellten Methoden zur Krümmungsmessung können Integralverfahren für den zu entwickelnden Krümmungssensor nicht eingesetzt werden, da neben konstanten Radien auch Radienverläufe messbar sein sollen. Dementsprechend wurde ein Krümmungssensor entwickelt, der das Stützpunktverfahren einsetzt und die einzelnen Stützpunkte durch eine optische Distanzmessung aufnimmt, siehe Bild 7.7. Für die optische Distanzmessung wird ein Lasertriangulationssensor eingesetzt, der auf einer Linearachse montiert ist. Mittels dieser Linearachse kann der Triangulationssensor entlang der Profilkontur verfahren, die Stützpunkte können aufgenommen und diese im Anschluss weiterverarbeitet werden. Da die Messung online und während des Biegeprozesses erfolgen soll, verfährt der Triangulationssensor mit einer Geschwindigkeit von mindestens 800 mm/s am Profil entlang, um bei einer Profilverdrängungsgeschwindigkeit

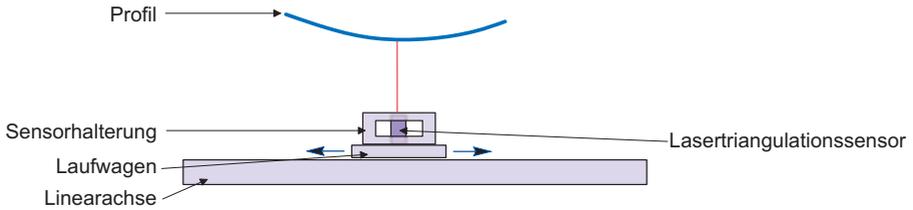


Abbildung 7.7: Krümmungssensor mittels Stützpunktverfahren und optischer Distanzmessung

von 20 mm/s eine „Quasi-Momentaufnahme“ der Profilkontur aufzunehmen. Dabei werden pro 100 mm Profilkontur 236 Stützwerke aufgenommen. Der Vorteil bei diesem Aufbau liegt insbesondere in der Flexibilität, da über die Geschwindigkeit der Linearachse und deren Verfahrenweg die Messlänge bei der Profilkontur und die erreichbare Genauigkeit beeinflusst werden kann.

Als Lasertriangulationssensor kommt das Modell DLS2000 der Firma LMI zum Einsatz, [108]. Dieser Triangulationssensor zeichnet sich durch einen langen Messbereich von $304,8 \text{ mm}$ (12 Zoll) bei einer maximalen Auflösung von $25 \mu\text{m}$ aus, wobei der Messbereich erst ab einem Abstand von 115 mm zum Sensor beginnt. Des Weiteren können die Messwerte des Triangulationssensors über zwei Analogschnittstellen ($\pm 10 \text{ V}$ und $4\text{-}20 \text{ mA}$) kontinuierlich bzw. über eine serielle Digitalschnittstelle (RS-422/485) mittels eines Streamingmodus mit einer Scanrate von 1891 Hz ausgelesen werden. Innerhalb des Krümmungssensors wird die Digitalschnittstelle verwendet, da über sie der Triangulationssensor mit seiner maximalen Auflösung ausgelesen werden kann und darüber hinaus über die Digitalschnittstelle die Eigenschaften des mikroprozessorgesteuerten Triangulationssensors beeinflusst werden können. Die prinzipielle Funktionsweise eines Lasertriangulationssensors wird im Bild 7.8 dargestellt. Mittels einer Laserdiode und einer Optik wird von dem Lasertriangulationssensor ein gebündelter Laserstrahl ausgesendet. Trifft dieser Laserstrahl auf ein Objekt, wird von diesem der Laserstrahl reflektiert. Von der Empfängeroptik des Triangulationssensors werden Teile des diffus reflektierten Lichts gebündelt und auf einen lichtempfindlichen, eindimensionalen Positionsdetektor (Position Sensitive Detectors: PSD) abgelenkt. Aus dem Auftreffpunkt auf dem PSD kann der Abstand zu dem Messobjekt ermittelt werden. Bei den PSD können prinzipiell zwei Arten unterschieden werden. Analoge PSD bestehen aus einer pin-Fotodiode, siehe Bild 7.9, die an der p-Schicht zwei Kontakte und an der n-Schicht einen Kontakt besitzen [112]. Abhängig vom Ort einer Lichteinstrahlung auf die p-Schicht, können an den Ausgängen zwei Ströme I_1 und I_2 gemessen werden, wobei entspre-

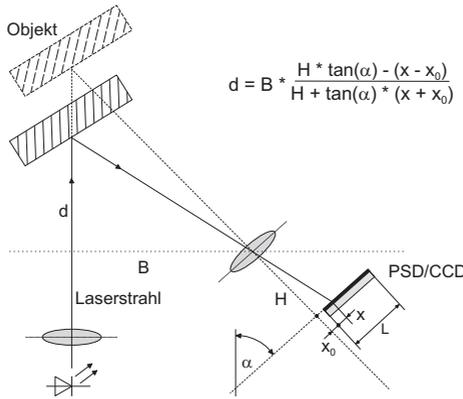


Abbildung 7.8: Prinzip der Funktionsweise eines Lasertriangulationssensors (aus [109])

chend der Gleichung 7.1 der Ort mit der intensivsten Einstrahlung ermittelt werden kann. Da die Diode eine Integration über die Intensitätsverteilung auf der p-Schicht durchführt, führen mehrere Lichtpunkte auf dem PSD zu einem falschen Distanzwert [109, 112–114].

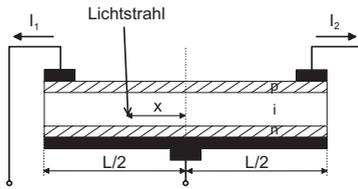


Abbildung 7.9: Aufbau eines analogen PSD (nach [112])

$$x = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \tag{7.1}$$

Dieser Fall kann eintreten, wenn der Laserstrahl an dem Messobjekt mehrfach reflektiert wird und die reflektierten Strahlen auch von der Empfängeroptik des Sensors aufgenommen werden. Bei dem zweiten PSD-Typ handelt es sich um den CCD-Sensor, der entlang seiner Messlänge in einzelne lichtempfindliche Zellen unterteilt ist, deren Licht einfall einzeln ausgelesen werden kann. Treffen auf einen eindimensionalen CCD mehrere Lichtpunkte, kann deren Position und Intensität durch einen Mikroprozessor bearbeitet werden und z.B. der Lichtpunkt mit der höchsten Intensität zur Distanzermittlung herangezogen werden. Der Triangulationssensor

DLS2000 ist mit einem CCD-Sensor ausgerüstet, dessen Werte von einem entsprechenden Mikroprozessor ausgelesen werden. Dieser Mikroprozessor regelt daneben die Laserstrahlintensität und filtert auch den Laserstrahl aus dem Umgebungslicht heraus. Die eingesetzte Empfindlichkeit kann dabei mittels eines Schwellwerts über die digitale Schnittstelle modifiziert werden, und somit kann eine Anpassung an die Oberflächeneigenschaften des Messobjekts erfolgen. Um eine stark spiegelnde Oberfläche, siehe Bild 7.10, zu detektieren, muss eine hohe Empfindlichkeit eingestellt werden, da der diffus reflektierte Lichtanteil relativ gering ist. Trotz des angepassten Schwellwerts kann es vorkommen, dass der Triangulationssensor keine eindeutige Distanz bestimmen kann und einen Fehlerwert zurückgibt. Da die Stützpunktanzahl in der Regel aber über 100 liegt, sind für eine Konturauswertung ausreichend viele Stützpunkte vorhanden.



Abbildung 7.10: Rohr mit stark spiegelnder Oberfläche

Für das Verfahren des Triangulationssensors wird eine Linearachse der Firma INA-Schaeffler mit einem maximalen Verfahrweg von 600 mm eingesetzt, wobei zu deren Ansteuerung eine Lageregelung Compax3 S075V4F11I21T11 der Firma Parker eingesetzt wird. Die Compax3 ist über einen CAN-Bus [115,116] an den Steuerungs-PC angeschlossen, der mit der Lageregelung über das CANopen Profil DSP-402 [117] kommuniziert. Dieses erlaubt das Anfahren einer Position unter Anwendung eines definierten Bewegungsprofils. In ihm kann die Zielposition, die Endgeschwindigkeit, die Beschleunigung und Verzögerung spezifiziert werden. Die eingesetzte Motorisierung der Linearachse erlaubt dabei eine maximale Endgeschwindigkeit von 5 m/s bei einer maximalen Beschleunigung von 50 m/s².

Entscheidend für das Stützpunktverfahren ist die Zuordnung der durch den Triangulationssensor aufgenommenen Distanzwerte zu der jeweiligen Position der Linearachse, da dadurch die Kontur repräsentiert wird. Um dies zu erreichen, müssten die Distanz- und Positionswerte jeweils direkt beim Einlesen mit einem Zeitstempel versehen werden, worüber dann die Zuordnung erfolgen kann. Um ausreichend viele Positionswerte von der Linearachse auszulesen, wäre jedoch eine hohe Last auf dem CAN-Bus notwendig, die auch zu einer hohen Last auf dem Steuerungs-PC führen würde. Aus diesem Grund wurde eine alternative Vorgehenswei-

se ausgewählt, die keine Belastung auf dem Steuerungs-PC generiert. Voraussetzung für diese Alternative ist, dass

1. die Linearachse nach der Beschleunigung und vor der Verzögerung mit einer konstanten Geschwindigkeit verfährt,
2. der Triangulationssensor eine konstante Scanrate hat,
3. der Triangulationssensor auch nur gültige Distanzwerte bei konstanter Geschwindigkeit zurückliefert und
4. die Lage des ersten gemessenen Distanzwerts in Bezug zur Nullposition der Linearachse ermittelt werden kann.

Wenn die Voraussetzungen erfüllt sind, kann der Abstand der Stützpunkte voneinander aus der Geschwindigkeit der Linearachse und der Scanrate des Triangulationssensors bestimmt werden. Somit ist die Kontur darstellbar und durch Kenntnis der Lage des ersten Distanzwertes kann die Kontur dem Messobjekt zugeordnet werden.

Punkt 1 sollte theoretisch leicht erfüllbar sein, da man der Linearachse ein Bewegungsprofil mit einer Endgeschwindigkeit, Beschleunigung und Verzögerung vorgibt. Mit diesen Werten kann bestimmt werden, zwischen welchen Positionen die Linearachse mit konstanter Geschwindigkeit verfährt. Liest man jedoch den Schleppfehler (Differenz von Soll- und Ist-Position) von der Lageregelung aus, so zeigt sich, dass sich dieser permanent verändert und eine Größenordnung von $\pm 2,6$ mm hat. Mit einer Optimierung der Lageregelung durch Einstellung der Steifigkeit und der Stromvorsteuerung kann der Schleppfehler jedoch erheblich verkleinert werden, sodass er sich mit einer ausreichenden Genauigkeit konstant verhält, siehe Bild 7.11.

Punkt 2 konnte durch Messungen verifiziert werden. Dabei wurde ermittelt, dass der Triangulationssensor im Datenstreamingmodus im Mittel eine Scanrate von 1890,9 Hz bei einer Standardabweichung von 0,3 Hz erreicht.

Die beiden übrigen Voraussetzungen 3 und 4 werden durch Verwendung einer Begrenzungs-
maske erfüllt, die zwischen dem Profil und dem Triangulationssensor montiert wird. Sie lässt nur in dem gewünschten Positionsbereich ein freies Sichtfeld auf die aufzunehmende Kontur zu. Außerhalb des gewünschten Bereichs ist die Maske näher als 115 mm Abstand zum Triangulationssensor montiert. Dadurch ist der notwendige Mindestabstand zwischen dem Triangulationssensor und dem Messobjekt nicht eingehalten und der Triangulationssensor gibt eine

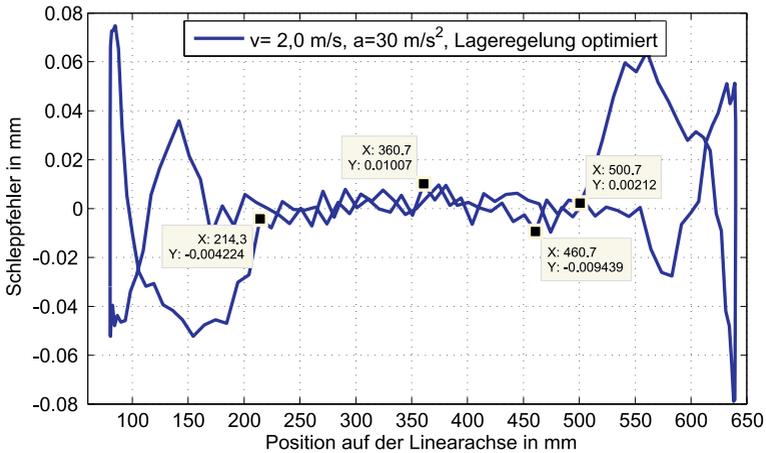


Abbildung 7.11: Schleppfehler bei Hin- und Rückweg des Sensors mit optimierter Lageregelung

entsprechende Fehlerkennung zurück. Durch Ausrichtung der Maske zur Nullposition der Linearachse ist schließlich auch die letzte Voraussetzung erfüllt, wobei hier anzumerken ist, dass die Genauigkeit bei der Ausrichtung begrenzt ist. Da sich der Lasertriangulationssensor mit einer Geschwindigkeit fortbewegt, ergibt sich ein Fehler, der von der Scanrate des Triangulationssensors abhängig ist. In der Tabelle 7.2 ist der berechnete Abstand zwischen zwei Stützpunkten dargestellt, wobei dieser Stützpunktabstand auch den maximalen Fehler angibt. Er führt dazu,

Sensorvorschubgeschwindigkeit	Abstand zwischen zwei Messungen
500 mm/s	0,26 mm
1000 mm/s	0,53 mm
1500 mm/s	0,79 mm
2000 mm/s	1,06 mm
2500 mm/s	1,32 mm

Tabelle 7.2: Maximaler Fehler bei der Lagebestimmung der Stützpunktkurve beim Krümmungssensor

dass zwei aufgenommene Konturen um diesen Abstand auf der x-Achse zueinander verschoben sein können. Bei einer aufgenommenen Biegelinie, die einen Radienverlauf darstellt, ergibt sich somit eine Abweichung des ermittelten Radius. Bei den großen zu messenden Radien ist der

resultierende Fehler jedoch gering; Tests ergaben für einen Versatz von 0,43 mm bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 800 mm/s beispielsweise eine Radienabweichung von 0,33 mm (von 1004,00 mm zu 1004,33 mm). Der Aufbau des Krümmungssensors und seine Montage auf der Drei-Rollen-Biegemaschine kann dem Bild 7.12 entnommen werden.

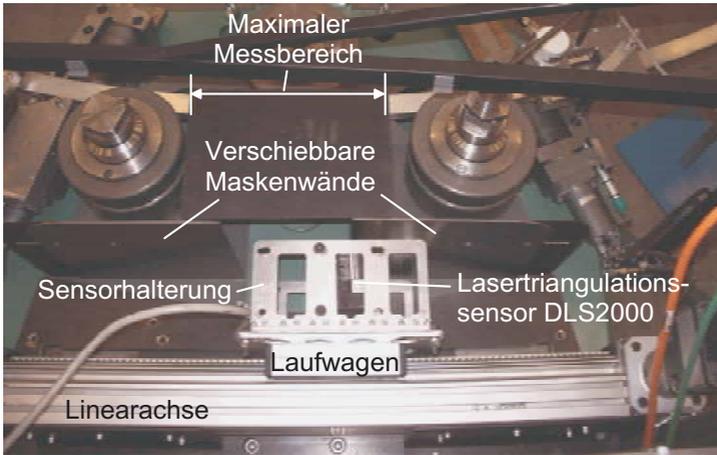


Abbildung 7.12: Aufbau des Krümmungssensors an der ROUND0 R2S spezial

7.4.3 Korrektur der Stützpunktkurve

Mit dem beschriebenen Aufbau des Krümmungssensors können flexibel Stützpunkte von einer Profilkontur aufgenommen werden. Bevor diese weiterverarbeitet bzw. ausgewertet werden, sind jedoch Vorbearbeitungen notwendig. Zum einen handelt es sich hierbei um die Beseitigung von Ausreißern. Deren Behandlung gestaltet sich bei der Stützpunktkurve einfach, da der Radienbereich, in dem sich die Stützpunktkurve bewegt, bekannt ist. Nach Bild 7.13 kann ausgehend von dem minimal auftretenden Radius r in der Stützpunktkurve, dem Abstand Δx zwischen zwei Stützpunkten und einem maximalen Abstand m eines Stützpunkts zum Kreismittelpunkt mittels der Gleichung 7.2 der maximale Höhenunterschied Δy zwischen zwei benachbarten Distanzmessungen berechnet werden. Wenn zu dem maximalen Höhenunterschied Δy noch zweimal die maximale Auflösung des Lasertriangulationssensors addiert wird, erhält man den Grenzwert Δy_G , Gleichung 7.3. Unterscheidet sich der Distanzwert eines Stützpunkts von dem

seiner beiden Nachbarn um mindestens Δy_G , so wird der Stützpunkt als Ausreißer aussortiert.

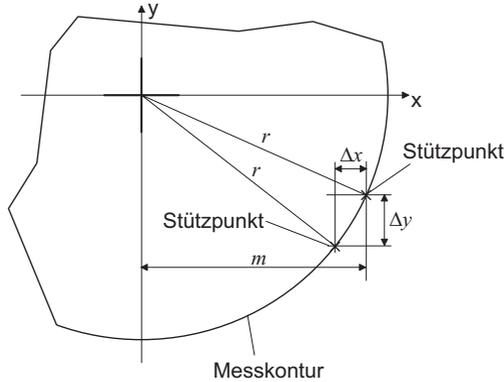


Abbildung 7.13: Bestimmung der maximalen Höhendifferenz Δy zur Erkennung von Ausreißern innerhalb der Stützpunktkurve

$$\Delta y = \sqrt{r^2 - (m - \Delta x)^2} - \sqrt{r^2 - m^2} \tag{7.2}$$

$$\Delta y_G = \Delta y + 2d_R \text{ mit } d_R = \text{Messgenauigkeit des Lasersensors} \tag{7.3}$$

Neben möglichen Ausreißern muss auch der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf den Lasertriangulationssensor betrachtet werden. Da der Triangulationssensor keine beweglichen mechanischen Teile beinhaltet, hat die Bewegung keinen Einfluss auf das Messergebnis; anders sieht dies jedoch bei der Auswertung des empfangenen Lichts auf der CCD-Zeile des Triangulationssensors aus. Wenn sich während der Bewegung des Sensors dessen Abstand zur Kontur verändert, wird ein größerer Bereich auf der CCD-Zeile ausgeleuchtet. Der Distanzwert ergibt sich dann aus dem arithmetischen Mittelwert des Bereichs, wobei die Lichtintensität berücksichtigt wird. Dies führt dazu, dass bei Konturen mit konstanter Krümmung der gemessene Distanzwert davon abhängt, ob die Kontur sich während der Vorschubbewegung des Sensors diesem annähert oder sich von diesem entfernt. Im ersten Fall ist der gemessene Distanzwert größer als die mittlere Distanz, im zweiten Fall ist er kleiner. Dieses Phänomen wird in Bild 7.14, bei dem eine 500-mm-Radienlehre als Messobjekt diente, deutlich. Der Sensor ist mit drei

verschiedenen Geschwindigkeiten an der Radienlehre entlangefahren, wobei die aufgenommenen Distanzwerte in den ersten 150 mm Sensorweg mit zunehmender Geschwindigkeit verkürzt und von 150 - 300 mm Sensorweg vergrößert sind.

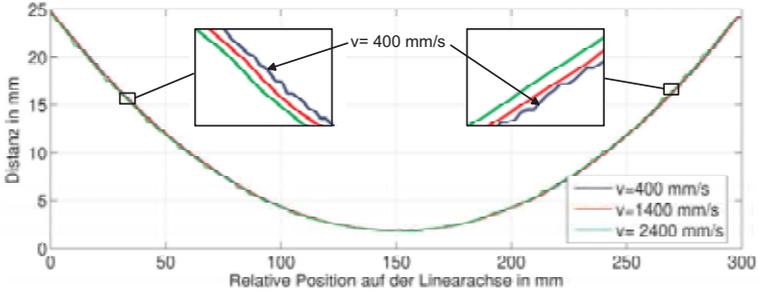


Abbildung 7.14: Aufgenommene Konturen einer 500-mm-Radienlehre mit einem bewegten Lasertriangulationssensor DLS2000 (LMI)

Der durch die Bewegung entstehende Fehler lässt sich für eine bekannte Kontur mittels der Vorschubgeschwindigkeit und der Scanrate des Triangulationssensors ausrechnen, indem man von der Distanz bei stillstehendem Sensor das arithmetische Mittel der Distanz des durchlaufenen Konturbereichs abzieht, Bild 7.15.

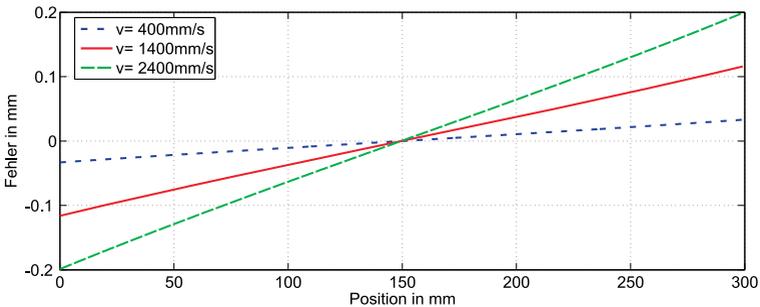


Abbildung 7.15: Fehler bei der Distanzmessung mit bewegtem Lasertriangulationssensor und einem Radius von 500 mm

Wird eine Kreiskontur sowohl im abnehmenden wie auch zunehmenden Bereich aufgenommen, hebt sich der Fehler nahezu auf und die Kontur scheint um den Punkt, der dem Sensor

am nächsten ist, rotiert. Für die Konturen in Bild 7.14 ergeben sich beispielsweise die Radien entsprechend Tabelle 7.3 (Beschreibung der Radienbestimmung erfolgt in Abschnitt 7.4.4).

Sensorvorschubgeschwindigkeit	400 mm/s	1400 mm/s	2400 mm/s
Radius	498,9 mm	499,1 mm	499,1 mm

Tabelle 7.3: Ermittelter Radius der 500-mm-Radienlehre (500,39 mm)

Wird jedoch nur der ab- bzw. zunehmende Bereich einer Kreiskontur oder eine Freiformkontur aufgenommen, ergibt sich ein Fehler, der berücksichtigt werden sollte. Eine genaue Korrektur des Fehlers kann nicht vorgenommen werden, da dies nur möglich ist, wenn die Originalkontur genau bekannt ist. Aus diesem Grund kann die Korrektur nur näherungsweise erfolgen. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich die Kontur zwischen dem neu aufgenommenen und dem vorhergehenden Distanzwert mit konstanter Steigung verändert hat. Der korrigierte Distanzwert entspricht dann dem Mittelwert des vorhergehenden und dem neuen Distanzwert.

7.4.4 Auswertung der aufgenommenen Stützpunkte

Nach erfolgter Aufnahme der Stützpunktkurve gilt es im Folgenden die Auswertung der Daten zu betrachten. Entsprechend den Zielen des Krümmungssensors sollen neben reinen Konturaufnahmen auch konstante Radien sowie Radienverläufe detektierbar sein. Die Bestimmung des konstanten Radius erfolgt mittels nichtlinearer Regression, wobei die Nonlinear-Least-Square-Methode nach Levenberg-Marquardt [123, 124] zum Einsatz kommt. Sie erhält als Eingabe die ungefilterten Stützpunkte, aus denen jedoch Ausreißer entfernt wurden, und das Modell $f(x)$, siehe 7.4.

$$f(x) = y_{center} - \sqrt{r^2 - (x - x_{center})^2} \quad (7.4)$$

Das Modell repräsentiert die Kreisfunktion, wobei der Mittelpunkt im Punkt (x_{center}, y_{center}) liegt und der Radius r beträgt. Der Levenberg-Marquardt-Algorithmus variiert die freien Variablen x_{center} , y_{center} und r so lange, bis der quadratische Fehler zwischen dem dadurch definierten Kreis und der Stützpunktkurve minimal ist.

Soll ein Radienverlauf bestimmt werden, der sich analytisch beschreiben lässt, kann dies durch Angabe des entsprechenden Modells ebenfalls mit der Levenberg-Marquardt-Methode erfolgen. Andernfalls können *Smoothing-Splines* verwendet werden. Bei ihnen wird ein Spline

s bestimmt, der im Hinblick auf die Stützpunkte den Ausdruck 7.5 minimiert [127], wobei der Grad der Glättung durch den Parameter p kontrolliert werden kann. Ein niedriger Parameter p gewichtet Krümmungsänderungen mehr als ein höherer Parameter p , sodass die Glättung mit fallendem p zunimmt.

$$p \sum (y_i - s(x_i))^2 + (1 - p) \int \left(\frac{d^2 s}{dx^2} \right)^2 dx \quad (7.5)$$

Werden statt des Radienverlaufs nur die Stützpunkte ganz oder in Teilen benötigt, sollten diese vor der Bearbeitung noch geglättet werden. Aufgrund der relativ großen Radien und langsamen Übergänge müssen hier keine aufwendigen Verfahren wie der Savitzky-Golay-Filter verwendet werden, sondern ein einfacher Tiefpassfilter wie Neighbourhood-Averaging reicht aus [123, 127, 128].

7.4.5 Genauigkeit

Die Leistungsfähigkeit des Krümmungssensors wurde anhand von Radienlehren, deren realer Radius mittels einer 3D-Koordinatenmessmaschine PRISMO VAST 5 HTG von Zeiss vermessen wurde, und verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten des Triangulationssensors verifiziert. Erwartungsgemäß ist der Krümmungssensor bei niedrigen Geschwindigkeiten am genauesten.

Real. Radius	Geschw.	Mittelwert	Stdabw. σ	σ -Fehler
199,90	100,0	199,73	0,32	0,16 %
3909,11	100,0	3842,48	2,95	0,08 %
4921,60	100,0	5004	8,52	0,17 %
Mit Kalibrierfaktor				
3909,11	100,0	3911,70	3,00	0,08 %
4921,60	100,0	4919,24	8,37	0,17 %

Tabelle 7.4: Messergebnisse des Krümmungssensors bei niedriger Geschwindigkeit

In der Tabelle 7.4 sind Messergebnisse für die Radienlehren 199,9 mm, 3909 mm und 4921 mm zusammengefasst. Aus den durchgeführten Messreihen wurden die Mittelwerte, die Standardabweichung und der prozentuale Fehler der Standardabweichung zum realen Radius berechnet. Es zeigt sich, dass die Standardabweichungen sehr gering sind, aber die Mittelwerte

bei den Radien 3909 mm und 4921 mm jedoch weit von den realen Werten abweichen. Aus diesem Grund wurde ein Kalibrierfeld ermittelt, das abhängig vom Radius und der Sensorvorschubgeschwindigkeit eine Korrektur des ermittelten Radius vornimmt. In der Tabelle sind ebenfalls die kalibrierten Ergebnisse für die Radien 3909 mm und 4921 mm aufgeführt.

Geschwindigkeit des Lasersensors in mm/s	Profilmvorschub ($v_C = 20,0 \text{ mm/s}$)	Profilmvorschub ($v_C = 50,0 \text{ mm/s}$)	Profilmvorschub ($v_C = 117 \text{ mm/s}$)
500	12,0	30,0	70,0
1000	6,0	15,0	35,0
1500	4,0	10,0	23,4
2000	3,0	7,5	17,5

Tabelle 7.5: Profilmvorschub während eines Laufes des Krümmungssensors über eine Messlänge von 300 mm

Da der Krümmungssensor die Biegelinie des Profils während des Biegeprozesses aufnehmen soll, muss dies möglichst schnell erfolgen, sodass der Profilmvorschub während der Messung möglichst gering ist, siehe Tabelle 7.5. Ansonsten kann es zu einer Überlagerung der unterschiedlichen Profileigenschaften führen. Mit der 3909-mm-Radienlehre wurde das Verhalten des Krümmungssensors bei unterschiedlichen Sensorvorschubgeschwindigkeiten ermittelt, Bild 7.16. Es zeigt sich, dass mit steigender Vorschubgeschwindigkeit die Standardabweichung ebenfalls zunimmt. Dieses Verhalten ist erwartungsgemäß, da mit zunehmender Geschwindigkeit die Anzahl der Stützpunkte abnimmt und der Schleppfehler der Linearachse zunimmt.

7.4.6 Elastische Querschnittsdeformation bei dünnwandigen Profilen

Der Krümmungssensor kann bei einem breiten Spektrum an Profilquerschnitten eingesetzt werden, weil sein optisches Messverfahren nicht das Aufrechterhalten eines Kontaktes zum Profil notwendig macht, wie es bei einem taktilen Messverfahren notwendig ist. Da der Krümmungssensor in der Umformzone die Außenkontur des Profils vermisst, können bei dünnwandigen Profilen auftretende Querschnittsdeformationen die Messung verfälschen. Die Auswahl der Zielkrümmung erfolgt jedoch mit der Vorgabe, dass keine bleibende Querschnittsdeformation auftritt bzw. Maßnahmen gegen die Querschnittsdeformation, wie z.B. eine Sandbefüllung, eingesetzt werden [24]. Letztere erhöhen jedoch den Aufwand des Biegens erheblich, sodass sie mög-

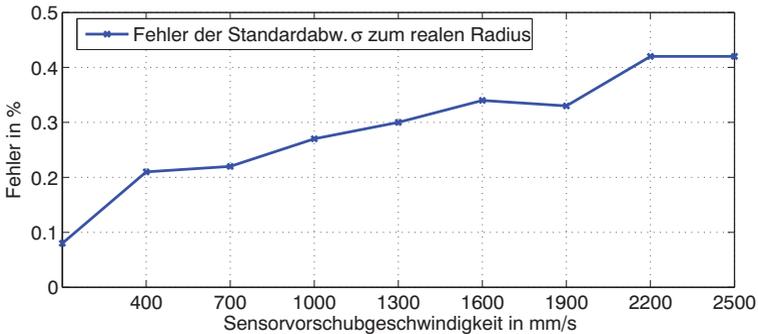


Abbildung 7.16: Zunehmende Standardabweichung bei steigender Sensorvorschubgeschwindigkeit bei der 3909-mm-Radienlehre

lichst vermieden werden. Um das Verhalten von dünnwandigen Profilen zu untersuchen, wurden ein Vierkantprofil $20 \times 40 \times 2$ mm und ein T-Profil $25 \times 25 \times 3$ mm jeweils aus dem Werkstoff EN-AW 6060 mit verschiedenen Rollenzustellungen in der Drei-Rollen-Biegemaschine gebogen und bei jeder Rollenzustellung die Profilaußenkontur mit dem Krümmungssensor aufgenommen. In Bild 7.17 werden die Messergebnisse für das Vierkantprofil dargestellt. Bei den aufgenommenen Profilkonturen zeigt sich, dass im Bereich der am größten auftretenden Zugspannungen eine elastische Querschnittsdeformation bei dem Profil auftritt, die mit Abnahme der Spannungen wieder zurückgeht. Bei dem eingespannten Profil konnte der Wandeinfall mittels Fühlerlehren ebenfalls an denselben Stellen gemessen werden. Dieser Wandeinfall ist problematisch, da die elastische Querschnittsdeformation die korrekte Bestimmung der belasteten Profilkrümmung k_2 verhindert. Eine Prozessregelung, die die belastete Profilkrümmung verwendet, würde demnach einen fehlerhaften Wert erhalten und entsprechend die Rollenzustellung fehlerhaft korrigieren. Bei den alternativen Messverfahren zur Krümmungsmessung würde dasselbe Problem auftreten, sodass dies nicht im Aufbau des entwickelten Krümmungssensors begründet ist. Dieses Phänomen ist jedoch bei dem Einsatz des Krümmungssensors zu beachten, wobei eine automatische Detektion bei der Verarbeitung der Stützpunkte integriert werden könnte.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich der vorgestellte Krümmungssensor auf Basis einer Linearachse und eines damit am Messobjekt vorbeibewegten Lasertriangulationssensors durch eine große Flexibilität auszeichnet. Zum einen erfolgt die Messung optisch, sodass eine Beschädigung der Profiloberfläche nicht eintritt. Des Weiteren kann der Verfahrensweg und das

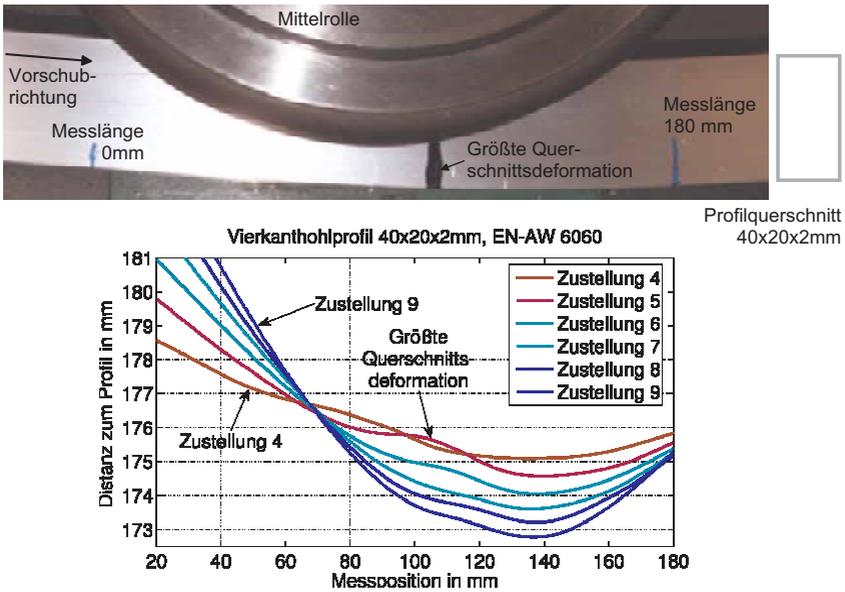


Abbildung 7.17: Elastische Querschnittsdeformation bei Hohlprofilen

Geschwindigkeitsprofil frei in den technischen Grenzen ($l \leq 500 \text{ mm}, v \leq 3000 \text{ mm/s}, a \leq 50 \text{ m/s}^2$) eingestellt werden und somit Einfluss auf die Anzahl der Messungen pro Sekunde und die Messgenauigkeit genommen werden. Ein Messung liefert eine ausreichende Anzahl an Stützpunkten, sodass selbst bei lokal begrenzten Oberflächenbeschädigungen eine Messung möglich ist.

7.5 Messung des Biegemoments

Neben der belasteten Profilkrümmung k_2 lässt das Biegemoment M_B , das im Wesentlichen für die plastische Umformung verantwortlich ist, Rückschluss auf die aktuellen Profileigenschaften zu. Bei Drei-Rollen-Biegemaschinen wird eine entsprechende Messung des Biegemoments standardmäßig nicht vorgenommen, sodass bei der eingesetzten Biegemaschine Erweiterungen notwendig waren. Es wird jedoch nicht direkt das Biegemoment M_B gemessen, sondern die Hauptkraft F_B an der Mittelrolle aufgenommen. Da die Mittelrolle bei der Kinematik der

ROUND0 R2S speziell nicht verfährt, wurde sie schwenkbar gelagert, siehe Abschnitt 7.2, und eine Quarz-Messunterlagscheibe 9071A der Firma Kistler in den Kraftfluss integriert, Bild 7.18. Die Messunterlagscheibe erlaubt die eindimensionale Kraftmessung bis 400 kN, wobei der Sensor

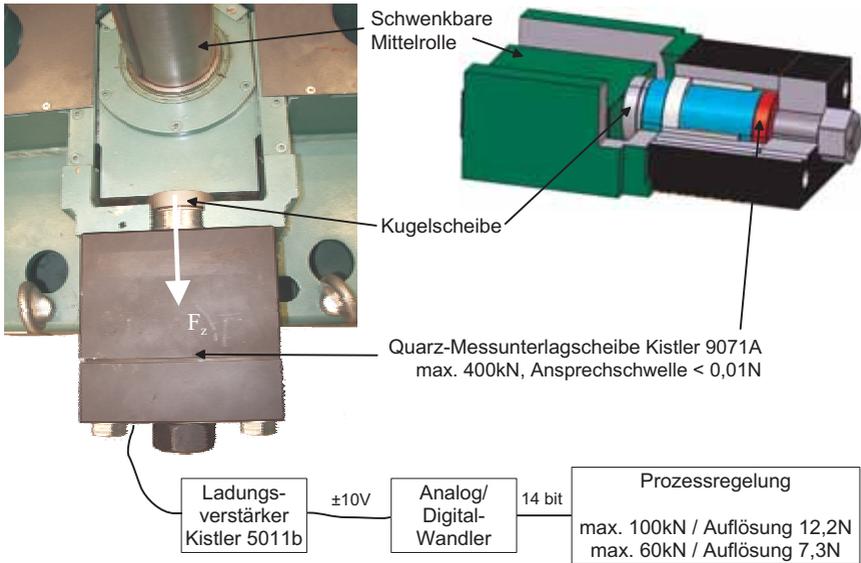


Abbildung 7.18: Vorrichtung zur eindimensionalen Bestimmung der Biegekraft an der Mittelrolle

mit einer Vorspannung von 25 kN eingebaut ist. Mit einer Steifigkeit von $26 \text{ kN}/\mu\text{m}$ beträgt selbst bei einer vollen Belastung der Mittelrollenversatz nur $15 \mu\text{m}$. Da die ROUND0 R2S speziell in ihrer Konfiguration maximal 100 kN auf die Mittelrolle aufbringen kann, kann der Mittelrollenversatz durch die Kraftmessung vernachlässigt werden. Die vom Sensor erzeugte Ladung wird durch einen Ladungsverstärker in einem Spannungswert im Bereich von $\pm 10 \text{ V}$ konvertiert und über einen 14 bit Analog-Digital-Wandler dem Steuerungs-PC und somit der Prozessregelung zugeführt. Die Auflösung der Kraftmessung kann durch den Skalierungsfaktor im Ladungsverstärker beeinflusst werden und liegt beispielsweise bei einem maximalen Kraftmessbereich von 60 kN bei 7,3 N. Bevor die aufgenommene Kraft in das Biegemoment M_B umgerechnet werden kann, muss sie korrigiert werden. Dies begründet sich darin, dass der Kontaktwinkel β_2 zwischen dem Profil und der Mittelrolle, siehe Bild 7.19, mit ansteigender Rollenzustellung d_Z zunimmt und sich in einem Bereich von ca. $0^\circ - 10^\circ$ bewegt. Des Weiteren

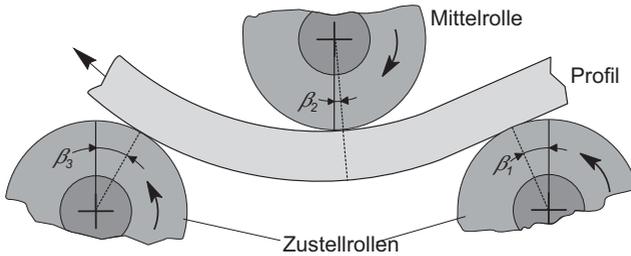


Abbildung 7.19: Kontaktwinkel zwischen dem Profil und den Rollen

erhöht sich mit ansteigendem Kontaktwinkel β_2 die Normalkraft, die auf die Führungsfläche der Mittelrolle wirkt, sodass die Reibung an der Mittelrollenführung zunimmt. Zur Bestimmung der Korrekturwerte wurde eine Kalibrierung der Kraftmessung durchgeführt, indem auf die Welle der Mittelrolle Vergleichskräfte bei den Kontaktwinkeln 0° , $2,5^\circ$, $5,0^\circ$, $7,5^\circ$ und 10° aufgebracht wurden. Der zur Berechnung des Biegemoments notwendige Hebelarm zwischen den Zustellrollen und der Biegerolle wird unter Verwendung der Kontaktpunkte zwischen dem Profil und den Rollen berechnet, die von dem Prozesssimulationssystem PROFI für die aktuelle Rollenzustellung d_z ermittelt werden, siehe Abschnitt 5.4.

7.6 Experimentelle Untersuchung

Die Untersuchung der Testumgebung Trobec am realen Biegeprozess wurde unter Verwendung von zwei verschiedenen Profilen durchgeführt. Zum einen wurde ein Vierkantprofil $20 \times 30 \times 2$ mm aus dem Baustahl S235JR und zum anderen ein Vierkantprofil $20 \times 40 \times 2$ mm aus der Aluminiumlegierung EN-AW 6060 eingesetzt. Das Bild 7.20 zeigt den Radienverlauf entlang der Profillängsachse für ein gebogenes Vierkantprofil $20 \times 40 \times 2$ mm (EN-AW 6060), das unter Verwendung einer für den Zielradius 1000 mm von PROFI berechneten Rollenzustellung unregelmäßig gebogen wurde. Das gebogene Profil hat einen mittleren entlasteten Profilradius $1/k_{3m}$ von 1044 mm und seine Schwankungsbreite beträgt 38 mm. Dementsprechend war die von PROFI berechnete Rollenzustellung im Mittel um 4,4 % fehlerhaft. Das Ergebnis einer geregelten Biegung kann dem Bild 7.21 entnommen werden. Da aufgrund der elastischen Querschnittsdeformation im Bereich des belasteten Profilradius, siehe Abschnitt 7.4.6, eine Messung des belasteten Profilradius $1/k_2$ nicht vorgenommen werden kann, erfolgte die Regelung aus-

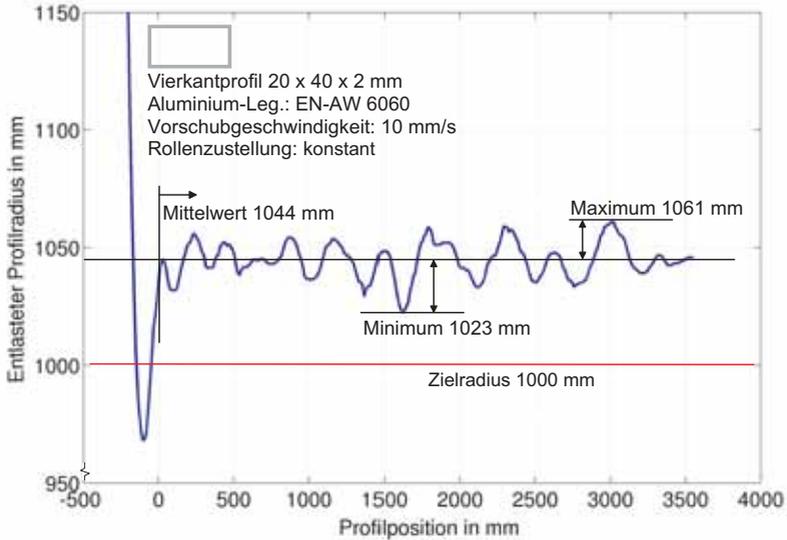


Abbildung 7.20: Radienverlauf eines mit konstanter Rollenzustellung gebogenen Vierkantprofils

schließlich unter Verwendung des entlasteten Profilradius $1/k_3$. Dies wurde realisiert, indem der Regler TRB statt des gemessenen Ist-Biegemoments M_{Bm} und der gemessenen Ist-Krümmung unter Last k_{2m} die jeweiligen Referenzwerte von der Prozesssimulation PROFI-V2 erhielt, siehe Bild 6.4. Die Radienabweichung Δk_{3a} wurde über einen Profillängenbereich l_p von 35 mm gemittelt, wobei dafür fünf Messungen des entlasteten Profilradius verwendet wurden. Der erste Korrekturschritt der Regelung führt direkt zu einer guten Annäherung an den Zielradius von 1000 mm. Ab einer Profilposition von ca. 700 mm ergibt sich für den restlichen Radienverlauf ein Mittelwert von 998 mm. Die geringe Abweichung mit dem ersten Korrekturschritt begründet sich unter anderem darin, dass der entlastete Profilradius im Bereich von 0 mm - 300 mm nur um 4 mm schwankt und somit die Dämpfung der gemittelten Radienabweichung Δk_{3a} minimal ist.

Das Vierkantprofil 20 x 30 x 2 mm aus dem Baustahl S235JR wurde eingesetzt, um die Regler HARDT und TRB zu testen. Bei diesem Profil treten keine ausgeprägten elastischen Querschnittsdeformationen im Bereich des belasteten Profilradius auf, sodass mit ihm die Regler vollständig getestet werden konnten. Die verwendeten Profile wurden im Vorhinein entlang

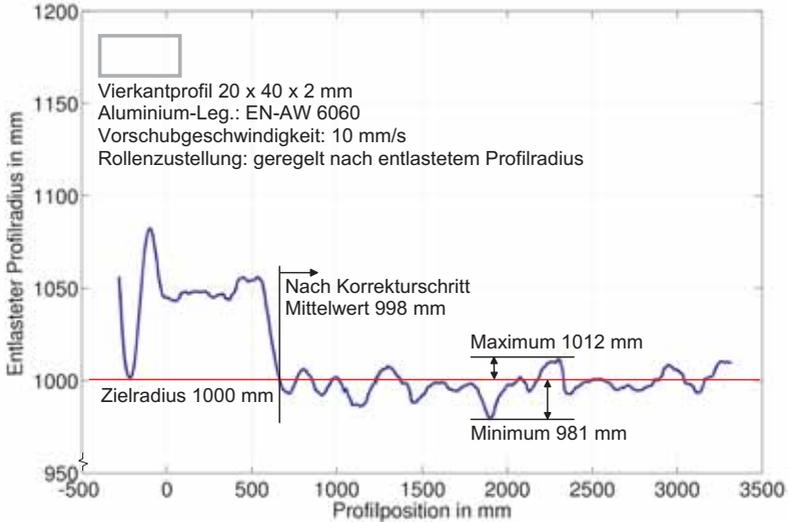


Abbildung 7.21: Radienverlauf eines gebogenen Vierkantprofils mit Korrektur der Rollenzustellung auf Basis der Messung des entlasteten Profilradius

der Profillängsachse im Abstand von 300 mm jeweils über eine Länge von 300 mm lokal erhitzt. Dadurch wurden die Schwankungen bei den Profileigenschaften insbesondere bei den Werkstoffkennwerten erhöht. Dies war notwendig, da das Profil im Ausgangszustand nur geringe Schwankungen zeigte und somit die Regler nur geringe Wirkung hätten zeigen können. Als Referenz zeigt das Bild 7.22 den Radienverlauf eines gebogenen Profils, das entsprechend behandelt wurde, wobei die verwendete Rollenzustellung von PROFI-V2 für den Zielradius 1000 mm berechnet wurde und während der Biegung unverändert blieb. Das Bild 7.23 zeigt das Ergebnis einer Biegung unter Verwendung des Reglers nach Hardt, siehe Abschnitt 2.4.2, der ausschließlich das Ist-Biegemoment M_{Bm} und die Ist-Krümmung unter Last k_{2m} zur Regelung einsetzt. Die gebogene Länge ist mit ca. 1550 mm kürzer als bei den vorherigen Biegungen, da zur Überprüfung der künstlich induzierten Schwankungen bei den Profileigenschaften die Profilstange geteilt wurde und ein Stück mit konstanter Rollenzustellung gebogen wurde. Dem Radienverlauf kann entnommen werden, dass der Regler nach Hardt die Schwankungen durch Berücksichtigung der Prozessgrößen aus der Umformzone erheblich reduzieren kann. Während im unregulierten Fall eine Schwankungsbreite von 145 mm auftritt, liegt sie hier bei 49 mm.

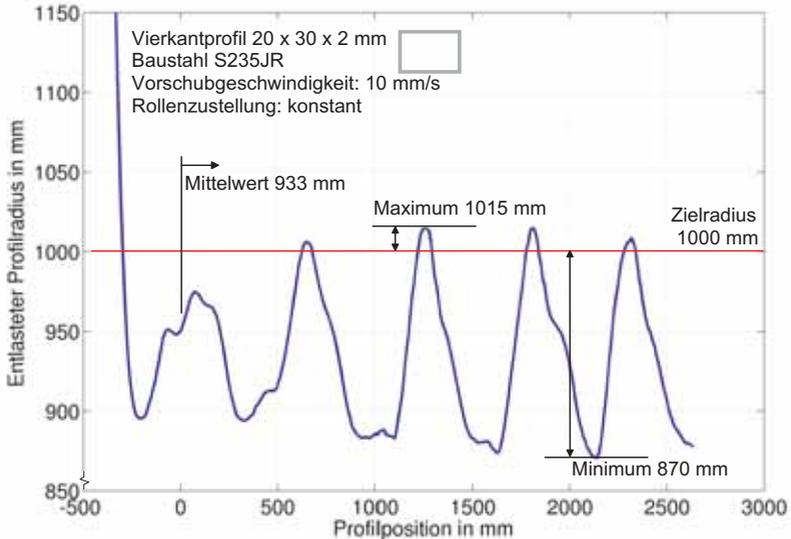


Abbildung 7.22: Radienverlauf eines mit konstanter Rollenzustellung gebogenen Vierkantprofils

Insgesamt ergibt sich für das gebogene Profil ein Mittelwert beim entlasteten Profilradius von 1015 mm. Das Bild 7.24 zeigt den Radienverlauf eines mit dem Regler TRB gebogenen Profils. Auch der Regler TRB kann die Schwankungsbreite stark reduzieren. Sie liegt bei ihm ebenfalls bei 49 mm, wobei der mittlere entlastete Radius jedoch mit 994 mm näher am Zielradius von 1000 mm liegt. Im Falle der Biegung wurde der entlastete Profilradius nach dem Standard-sicherheitsabstand d_s von 50 mm mit einem Profillängenbereich l_p von 100 mm gemittelt. In diesem Bereich veränderte sich der entlastete Profilradius von 990 mm auf 1016 mm und betrug im Mittel 999 mm. Dies führte dazu, dass die Korrektur auf Basis der Messung des entlasteten Profilradius entsprechend den Gleichungen 6.3 bis 6.5 verschwindend gering bei 0,1 mm lag. Beim zweiten Korrekturschritt auf Basis des entlasteten Profilradius betrug der entlastete Profilradius im Mittel jedoch 992 mm, sodass eine aufbereitete Radienabweichung von -4,5 mm bestimmt wurde. Diese führt zu einer Verringerung der Rollenzustellung, sodass der sinkende entlastete Profilradius an der Stelle des 2. Korrekturschritts „abgefangen“ wird.

Ein Vergleich der Radienverläufe der beiden geregelten Biegungen (Hardt und TRB) zeigt, dass die Messung des entlasteten Profilradius beim zweiten Profil nur zu einer geringen Ver-

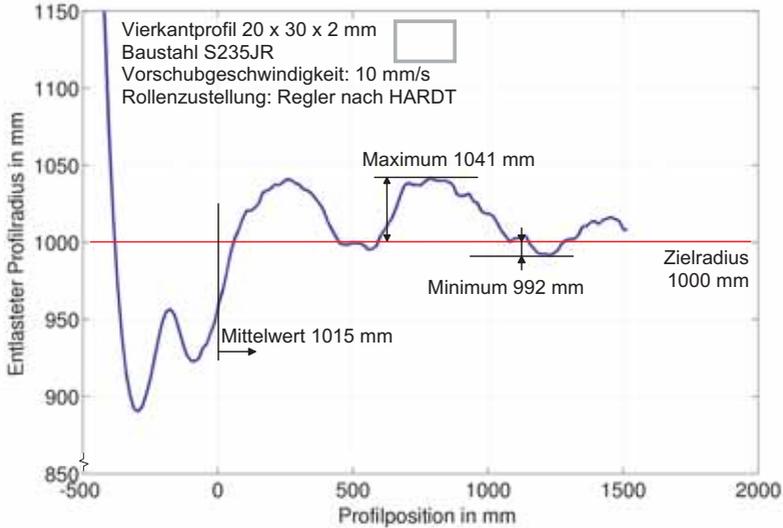


Abbildung 7.23: Radienverlauf eines mit dem Regler HARDT gebogenen Vierkantprofils

besserung führt. Wäre das Profil der ersten Biegung mit dem Regler TRB gebogen worden, hätte der erste Korrekturschritt auf Basis des entlasteten Profilradius $1/k_{3m}$ eine aufbereitete Radienabweichung von 7 mm berechnet. Dies hätte zu einer Erhöhung der Rollenzustellung und somit zu einer Verringerung des entlasteten Profilradius geführt.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass mit der Testumgebung Trobec Prozessregelungen sowohl am virtuellen wie auch am realen Biegeprozess untersucht werden können. Ein neuer Regler wird als Erstes am virtuellen Biegeprozess untersucht. Wenn er dort seine Leistungsfähigkeit bewiesen hat, erfolgt der Wechsel an den realen Biegeprozess, wobei die Testumgebung jedoch nicht verlassen werden muss. Der Übergang vom virtuellen zum realen Biegeprozess machte bei den untersuchten Reglern nur eine Erhöhung der Nachlaufzeit T_{VR} der I-Reglerkomponente beim Regler nach Hardt und der PI-Reglerkomponente beim Regler TRB notwendig. Dies führt zu einer Dämpfung bei der Änderung der Rollenzustellung d_Z bzw. des belasteten Profilradius $1/k_2$. Dies ist notwendig, da im virtuellen Biegeprozess die Massenträgheit des Profils nicht berücksichtigt wird. Bei großen Korrekturen erhalten die beiden Enden der Profilstange jedoch einen Impuls, der beispielsweise die Messung des Ist-Biegemoments M_{Bm} bzw. des belasteten

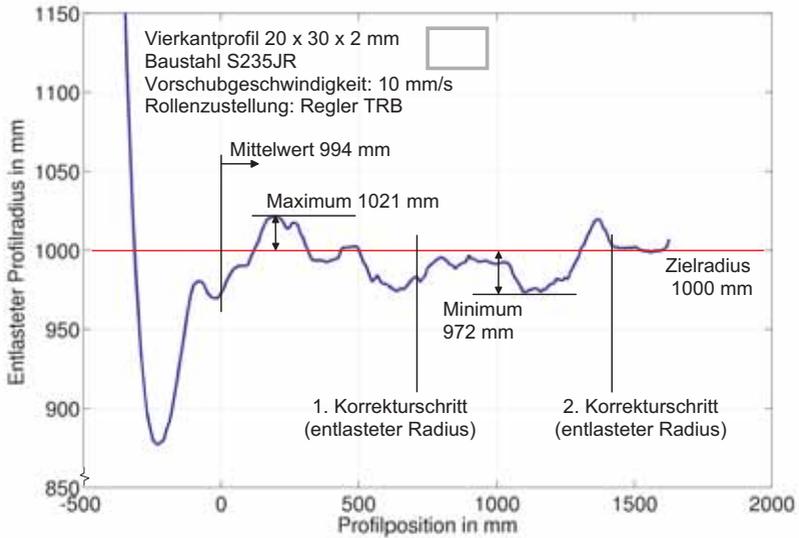


Abbildung 7.24: Radienverlauf eines mit dem Regler TRB gebogenen Vierkantprofils

Profilradius $1/k_2$ beeinflusst. Der Impuls kann durch eine Verringerung der Geschwindigkeit der Rollenzustellung verändert werden. Bei der verwendeten Drei-Rollen-Biegemaschine führt jedoch eine geringe Geschwindigkeit bei der Rollenzustellung zu einer großen Überschwingweite bei der Positionsregelung der Eingangs- und Ausgangsrolle, wodurch der entlastete Profilradius ebenfalls negativ beeinflusst wird.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Das Drei-Rollen-Biegen gehört zu den Profilbiegeverfahren mit kinematischer Gestalterzeugung, d.h. die Position der Außenrollen zu der Mittelrolle bestimmt die sich ausbildende Profilkrümmung. Mit einem Rollensatz können Profile mit verschiedenen Radien entlang der Profillängsachse gefertigt werden. Aus diesem Grund sind die Investitionskosten für die Fertigung eines gebogenen Profils im Vergleich zu Profilbiegeverfahren mit formgebenden Werkzeugen gering, und das Drei-Rollen-Biegen eignet sich somit gut zur Fertigung kleiner Losgrößen. Die gewonnene Flexibilität beim Drei-Rollen-Biegen bringt jedoch den Nachteil mit sich, dass das Profil während des Biegeprozesses unzureichend geführt wird. Die entstandene Profilkrümmung kann erst nach dem Verlassen der Umformzone und erfolgter elastischer Rückfederung hinter der Ausgangsrolle gemessen werden. Wurde für die Biegung eine falsche Rollenzustellung verwendet oder entsprach die Profilbeschreibung (Werkstoffkennwerte, Profilquerschnitt u.a.) des gebogenen Profils nicht der, die zur Berechnung der Rollenzustellung verwendet wurde, entspricht der gefertigte nicht dem geforderten Profiltradius. Es können Abweichungen von über 10 % auftreten. Da zusätzlich beim Halbzeug ungewollte Schwankungen sowohl beim Profilquerschnitt als auch bei den Werkstoffeigenschaften auftreten, ist für eine effiziente Fertigung der Einsatz einer Prozessregelung notwendig. Betrachtet man die auf dem Markt erhältlichen Drei-Rollen-Biegemaschinen, so sind Prozessregelungen nur bei sehr wenigen integriert oder stehen als Option zur Verfügung. Dies liegt unter anderem an den damit verbundenen zusätzlichen Kosten bei der Maschinenentwicklung aufgrund der notwendigen Ressourcen an zusätzlichem Personal und Material. Des Weiteren führen die notwendigen Sensoren und Aktoren zu einer nicht unerheblichen Erhöhung der Investitionskosten für eine entsprechende Drei-Rollen-

Biegemaschine.

Die vorliegende Arbeit hat sich der Problematik angenommen und die Testumgebung Trobec (**Three-Roll-Bending Control**) zur Untersuchung von Prozessregelungen beim Drei-Rollen-Biegen entwickelt. Die Testumgebung ermöglicht die Untersuchung von Prozessregelungen auf Basis eines virtuellen und eines realen Biegeprozesses unter Angabe von Beschreibungen des Profihalbzeugs, der Profizielkontur und der Maschinenkinematik und -geometrie. Der virtuelle Biegeprozess bildet den Drei-Rollen-Biegeprozess unter Einsatz des Prozesssimulationssystems PROFI-V2 ab, wobei erforderliche Prozessgrößen wie z.B. die Biegelinie des Profils in der Umformzone und der belastete und entlastete Profiltradius berechnet werden. Der virtuelle und der reale Biegeprozess sind in einen Regelkreis eingebunden, bei dem Sensoren Prozessgrößen aufnehmen und diese nach einer Messgrößenaufbereitung an einen Regler übergeben werden. Der Regler bestimmt als Stellgröße die Rollenzustellung, die schließlich durch Ansteuerung von Aktoren zur Positionierung der Rollen im Biegeprozess umgesetzt wird. Die Testumgebung Trobec ermöglicht eine einfache Integration von neuen Reglern in den Regelkreis, wobei als Basis der PID-Standardregler und der Neuro-Fuzzy-Regler NEFCON [94] zur Verfügung steht, aber auch davon unabhängige Regler erstellt werden können. Die Testumgebung Trobec ist so gestaltet, dass vor dem Biegen eine Auswahl getroffen wird, ob der reale oder der virtuelle Biegeprozess verwendet werden soll. Wird der reale Biegeprozess gewählt, erfolgt das Biegen durch Ansteuerung einer Drei-Rollen-Biegemaschine ROUND0 R2S speziell der Firma ROUND0 und das Auslesen aller erforderlichen Sensoren. Wird der virtuelle Biegeprozess ausgewählt, bestimmt dieser für die vorgegebenen Rollenzustellungen die zugehörigen Prozessgrößen. Zur Nachbildung der natürlichen Schwankungen bei den Werkstoffeigenschaften und der Profilquerschnittsgeometrie kann die vom virtuellen Biegeprozess verwendete Halbzeugbeschreibung gezielt entlang der Profillängsachse verändert werden. Dies kann durch direkte Angabe von Abweichungen, bspw. Erhöhung der Streckgrenze um 30 MPa, an beliebigen Positionen auf der Profillängsachse erfolgen, oder es können zur Abbildung von periodischen Schwankungen Sinusfunktionen definiert werden. Beide Beschreibungsarten können bei einem Profil gleichzeitig und beliebig oft eingesetzt werden, die endgültige Profihalbzeugbeschreibung ergibt sich aus Überlagerung der Ausgangsbeschreibung und den definierten Schwankungen. Für die Untersuchung von Prozessregelungen ist die definierte Beschreibung der Schwankungen bei den Halbzeugeigenschaften sehr vorteilhaft, da mit ihnen ein Regler gezielt getestet werden kann. Es können z.B. auf den Eingangsgrößen Sprungfunktionen definiert werden, deren Sprungantwort Rückschlüsse auf

das Reglerverhalten zulassen. Dies kann deterministisch erfolgen, sodass auf diese Weise auch verschiedene Regler einfach und direkt miteinander verglichen werden können. Zur Untersuchung der Testumgebung Trobec wurden zwei bekannte Regler für das Drei-Rollen-Biegen nach Yang [26] und Hardt [85] implementiert. Daneben wurde ein auf ihnen aufbauender, erweiterter Regler TRB entwickelt und in die Testumgebung Trobec implementiert. Die verschiedenen Regler wurden mittels des virtuellen Biegeprozesses miteinander verglichen, wobei der Regler nach Yang aufgrund der fehlenden Messung des Biegemoments die schlechteste Regelgüte besitzt. Der Regler TRB ist dem Regler nach Hardt gegenüber im Vorteil, wenn die Profilbeschreibung fehlerhaft ist. Durch die Messung der entlasteten Profilkrümmung k_3 kann dieser Fehler erkannt und vom Regler TRB korrigiert werden.

Für den Aufbau der Testumgebung Trobec wurden verschiedene Softwarebibliotheken erstellt. Die Bibliothek Closed-Loop Control Framework CLCF bildet die Regelungsumgebung ab. Des Weiteren wurde das halbanalytische Prozesssimulationssystem PROFI [24] zu PROFI-V2 erweitert, sodass zur Berechnung der Rollenzustellung ein segmentiertes Profil verwendet wird und die Maschinenkinematiken mit Zustellung über die Mittelrolle und mittels rotatorischer Zustellung der Außenrollen unterstützt werden. Der entwickelte Algorithmus zur Berechnung der Rollenzustellung wurde mittels Vergleichsbiegungen und mittels FEA validiert, wobei die Abweichungen bei den Vergleichsbiegungen unter 5 % und im Mittel bei 2,1 % lagen. Der virtuelle Biegeprozess wird durch die Softwarebibliothek Process-Data-Generator PDG realisiert, die zur Generierung der Prozessgrößen das Prozesssimulationssystem PROFI-V2 einsetzt. Mit der Entwicklung der Testumgebung Trobec wurden auch die Schwankungen von Profileigenschaften bei verschiedenen Profilgeometrien und -werkstoffen experimentell untersucht. Mit diesen Untersuchungen wurde ermittelt, wie groß die Schwankungen in einem Profil sind und wie deren Verlauf entlang der Profillängsachse ist. Bei großen Schwankungen, die auch innerhalb eines kurzen Profilschnitts von ca. 500 mm auftreten, ist der Einsatz einer Prozessregelung unter Verwendung von Prozessgrößen aus der Umformzone notwendig. Der Verlauf der Schwankungen wurde auch dahingehend untersucht, ob darin Regelmäßigkeiten wie z.B. periodische Schwankungen zu erkennen sind. Im positiven Fall sollten diese von einer Prozessregelung berücksichtigt werden. Bei den untersuchten Profilen konnten jedoch keine Regelmäßigkeiten bei den Schwankungen ermittelt werden. Zur Untersuchung der Testumgebung Trobec am realen Biegeprozess wurde ein Versuchsstand auf Basis einer Drei-Rollen-Biegemaschine ROUND0 R2S speziell der Firma ROUND0 aufgebaut. Dabei wurde zur Messung der belasteten Profilkrümmung k_2 ein

laserbasierter Krümmungssensor entwickelt. Des Weiteren wurden ein Profileinzugssensor und eine Vorrichtung zur Messung der Kraft an der Mittelrolle in die Drei-Rollen-Biegemaschine integriert. Die Untersuchungen am virtuellen und am realen Biegeprozess haben gezeigt, dass die Testumgebung Trobec die Untersuchung von Prozessregelungen unterstützt und beschleunigt. Neue Prozessregelungen können direkt in die Testumgebung integriert werden und mittels des virtuellen Biegeprozesses und definierter Schwankungen bei den Profileigenschaften mit anderen Prozessregelungen verglichen werden. Verschiedene Parametrisierungen der Prozessregelungen können durch die Testumgebung Trobec automatisiert untersucht und somit optimiert werden. Des Weiteren kann nach den Voruntersuchungen am virtuellen Biegeprozess direkt auf den realen Biegeprozess gewechselt werden und dort das Verhalten der Prozessregelung weiter untersucht werden. Dieses Vorgehen reduziert die notwendigen Ressourcen bei dem Aufbau von Prozessregelungen für das Drei-Rollen-Biegen erheblich, da die notwendigen Maschinenzeiten durch die wesentlich geringere Anzahl an Testbiegungen stark reduziert werden.

Die Testumgebung Trobec stellt eine flexible Basis zur Untersuchung von Prozessregelungen dar, wobei aber noch Potenzial für Erweiterungen vorhanden ist. Momentan werden im virtuellen Biegeprozess auftretende Querschnittsdeformationen aufgrund der Modellannahmen nicht erkannt und berücksichtigt, sodass bei großen Querschnittsdeformationen die Berechnungsergebnisse wegen Abweichungen bei der realen und der berechneten Momenten-Krümmungsbeziehung ebenfalls große Abweichungen zeigen. Dies wurde in der Arbeit nicht thematisiert, da bei großen Querschnittsdeformationen der Profilquerschnitt nicht fertigungsgerecht ausgelegt oder der Zielradius zu klein dimensioniert wurde und somit die Fertigungsgrenzen des Verfahrens überschritten wurden. Zur weiteren Absicherung der Untersuchungsergebnisse der Testumgebung Trobec kann eine FE-Analyse in die Testumgebung integriert werden, wobei die Generierung des FE-Modells für das zu untersuchende Profil automatisiert erfolgen muss. Des Weiteren wird in Trobec nur ein einmaliger Profildurchlauf abgebildet, d.h. die Zielkontur muss in einem Profildurchlauf gebogen werden. Ist die dafür notwendige Umformkraft größer als die durch die Reibpaarung Profil/Rolle übertragbare Reibungskraft, tritt Schlupf ein und die Rollen können das Profil nicht mehr transportieren. In diesem Fall muss das Profil in mehreren Stufen umgeformt werden, wobei sich die Werkstoffkennwerte aufgrund der Werkstoffverfestigung jedoch ändern. Die Änderung der Werkstoffkennwerte wird in der Testumgebung Trobec momentan nicht nachgehalten, sodass nur ein einstufiger Biegeprozess betrachtet werden kann. Der virtuelle Biegeprozess bietet jedoch mit den definierbaren Schwankungen bei den Profileigen-

schaften eine schnell zu realisierende Möglichkeit, durch Hinzufügen weiterer „Schwankungen“ während des Biegeprozesses an unterschiedlichen Profilpositionen die Vorgeschichte festzuhalten.

Literaturverzeichnis

- [1] Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN 8580: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. 2003-09. 9 2003
- [2] RATHMANN, T.: Untersuchung der chargenabhängigen Schwankungen im Umformverhalten von Warmband gleicher Güte / Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen, Technische Universität Darmstadt. 1997. – Forschungsbericht. <http://www.ptu.tu-darmstadt.de/content/forschung/blech/warmband/warmband.html>, 8.3.2008; Abschlussbericht: Wirtschaftsverband Stahlverformung e. V., Goldene Pforte 1, D-58093 Hagen
- [3] HOSFORD, W. F. ; CADDELL, R. M.: *Metal Forming - Mechanics and Metallurgy*. Prentice-Hall, 1983. – ISBN 0–13–577214–1
- [4] GROCHE, P. ; SCHNEIDER, R.: Umformtechnik für die Produkte von morgen. In: *7th Colloquium on Forming Technology: Anforderungen – Innovationen – Perspektiven*. Bamberg : Meisenbach, 2000. – ISBN 3–87525–131–8, S. 1–8
- [5] CHATTI, S.: *Production of profiles for lightweight structures*. 1. Books on Demand GmbH, 2005. – ISBN 3–8334–4929–2
- [6] N.N.: *Audi R8*. Autosieger.de - Das Automagazin. April 2007. – <http://www.autosieger.de/Autokatalog641.html>, 19.4.2007
- [7] WEISSNER, R. ; FRIEBE, E.: Karosseriekonzepte der Zukunft unter besonderer Berücksichtigung des Leichtbaus. In: *7th Colloquium on Forming Technology: Anforderungen – Innovationen – Perspektiven*. Bamberg : Meisenbach, 2000, S. 155–159
- [8] SIEGERT, K.: *Konzept für den Einsatz von Al-Strangpressprofilen und Al-Blechformteilen im PKW-Karosseriebau*. VDI, 1994 (VDI Report 1142)

- [9] KLAUS, A. ; CHATTI, S. ; KLEINER, M.: Advanced Manufacturing of Curved Profiles for Hydroforming. In: *Light Metal Age* 59 (2001), Nr. 3,4, S. 66–69
- [10] ARNET, A.: *Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung*. Bamberg, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 1999
- [11] Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN 8582: Fertigungsverfahren Umformen*. 2003-09. 9 2003
- [12] Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN 8586: Fertigungsverfahren Biegeumformen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. 2003-09. 9 2003
- [13] SPRENGER, A.: *Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpressprofilen*, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 1999
- [14] ZORN, H.: *Mehrstempelpresse zur Profillumformung und deren Automatisierung auf der Grundlage einer elastisch-plastischen Berechnung der Profilbiegung*, Rostock, Dissertation, 1970
- [15] SPÄTH, W.: Automatisches Profilbiegen. In: *Werkstatt und Betrieb* 122 (1989), Nr. 5, S. 375–378
- [16] KHODAYARI, G.: *Untersuchungen zum elastisch-plastischen Biegen von Stahlrohrprofilen*, Universität-Gesamthochschule Siegen, Dissertation, 1994
- [17] ADELHOF, A.: *Komponenten einer flexiblen Fertigung beim Profilbiegen*, Universität Dortmund, Dissertation, 1993
- [18] TOZAWA, Y. ; ISHIKAWA, T. ; MIHARA, Y.: Edgewise bending of flat bar by new bend-rolling process. In: *Annals of the CIRP*. Berne : Hallwag Ltd., 1984, S. 175–178
- [19] KUHN, D.: Im Fluss profiliert. Fließformbiegelösung setzt neuen Standard bei der Profilerzeugung. In: *MM – Maschinenmarkt. Das IndustrieMagazin* (2005), Nr. 42, S. 38–39. – ISSN 0341–5775
- [20] LOKSIN, A. Z.: Zur Bestimmung der Abhängigkeit zwischen den Technologischen Parametern bei der Biegeumformung von Bandeisen durch Streckwalzen zwischen symmetrischen Kegelrollen. In: *Trudy Leningradskogo Korabletroitelnogo Intituta* (1970), Nr. 75, S. 95–102

- [21] PRELLER, H.: Kennzeichnende Merkmale für die Anwendung von Kaltprofilen. In: *5. Verformungskundliches Kolloquium des Instituts für Bildsame Formgebung der RWTH-Aachen, 17 / 18.4.1969*, 1969, S. 3–8
- [22] LEPILIN, A. T. [u. a.]: Experimentelle Untersuchungen des Biegens von Profilen auf einer Zweirollen-Rundbiegemaschine. In: *Kuznecno-stampovocnoe proizvodstvo* 20 (1978), Nr. 11, S. 33–34
- [23] LAPSKER, R. D. [u. a.]: Zweirollen-Rundbiegemaschine mit numerischer Programmsteuerung zum Biegen von Leichtprofilen. In: *Kuznecno-stampovocnoe proizvodstvo* 20 (1980), Nr. 5, S. 17–18
- [24] CHATTI, S.: *Optimierung der Fertigungsgenauigkeit beim Profilbiegen*. Aachen, Universität Dortmund, Dissertation, 1998
- [25] KAJRUP, G. ; KLEIN, W.: Profiltrundbiegen – Anwendung und Entwicklung. In: *Blech Rohre Profile* 32 (1985), Nr. 8, S. 419–423
- [26] YANG, M. ; SHIMA, S. ; WATANABE, T.: Model-based Control for Three-Roll Bending Process of Channel Bar. In: *Journal of Engineering for Industry* 112 (1990), Nr. 11, S. 346–351
- [27] MURATA, M. ; AOKI, Y.: Analysis of circular tube bending by MOS bending method. In: ALTAN, T. (Hrsg.): *Advanced Technology of Plasticity* Bd. 1, 1996, S. 505–508
- [28] NEUGEBAUER, R. ; DROSSEL, W. G. ; LORENZ, U. ; LUETZ, N.: HexaBend – a new concept for 3D-free-form bending of tubes and profiles to preform hydroforming parts and endform space-frame-components. In: *ICTP, 7th Interna. Conf. on Technology of Plasticity – Advanced Technology of Plasticity 2002* Bd. 2, 2002, S. 1465–1470
- [29] VOLLERTSEN, F. ; SPRENGER, A. ; KRAUSE, J. ; ARNET, H.: Extrusion, channel, and profil bending: a review. In: *Journal of Materials Processing Technology* 87 (1999), S. 1–27. – ISSN 0924–0136
- [30] GEIGER, M. ; KRAUS, J. ; VOLLERTSEN, F.: Werkstoffeigenschaften von Profilen nach dem Laserstrahlbiegen. In: *Bänder Bleche Rohre* 35 (1994), Nr. 12, S. 18–21

- [31] GEIGER, M. ; VOLLERTSEN, F.: *Biegen mittels laserinduzierter Spannungen*. 1. Aachen : Verlag Mainz–Wissenschaftsverlag, 1995
- [32] MERKLEIN, M.: *Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften*, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2001
- [33] ARENDES, D.: *Direkte Fertigung gerundeter Aluminiumprofile beim Strangpressen*. Aachen, Universität Dortmund, Dissertation, 1999
- [34] ARENDES, D. ; CHATTI, S. ; KLEINER, M.: Forming of Aluminium Extrusions for Structural Elements. In: *Advanced Technology of Plasticity, Proc. 6th Int'l Conf. Technology of Plasticity - ICTP 1999*. Berlin : Springer-Verlag, 1999, S. 2337–2342
- [35] N.N.: *Verfahrensprinzip für kinematische Gestalterzeugung*. WWW-Seite im Internet. 2005. – <http://www.iwu.fraunhofer.de/german/angebot/projekte/hexabend/-verfahren.htm>, 16.2.2007
- [36] ARENDES, D. ; KLEINER, M. ; KALZ, S. ; KOPP, R.: Strangpressen gerundeter Aluminiumprofile. In: *Aluminium* 76 (2000), Nr. 3, S. 141–148
- [37] KLAUS, A. ; ARENDES, D. ; CHATTI, S. ; KLEINER, M.: Direct Rounding of Profiles During Extrusion. In: *ET 2000 – Proc. 7th International Aluminium Extrusion Technology Seminar, Chicago*. Washington : Aluminum Association and Aluminum Extruders Council, 16.05. - 19.05. 2000, S. 421–438
- [38] CHATTI, S. ; v. FINCKENSTEIN, E. ; KLEINER, M.: Verfahrenskombination steigert Flexibilität beim Biegen von Profilen. In: *Maschinenmarkt* 11 (1999), Nr. 3, S. 26–30
- [39] CHATTI, S. ; HELLER, B. ; RIDANE, N. ; KLEINER, M.: Anpassungsfähig — Prozesskette zur Herstellung von Leichtbaustrukturen aus Tailor Rolled Blanks. In: *Maschinenmarkt* 15 (2003), Nr. 7
- [40] ROBERTS, C. S.: *Magnesium and its Alloys*. Wiley, New York, 1960
- [41] RAYNOR, G. V.: *The Physical Metallurgy of Magnesium and its Alloys*. Pergamon Press, London, 1959

- [42] MERKEL, M. ; THOMAS, K.-H.: *Taschenbuch der Werkstoffe*. Sechste. München : Fachbuchverlag Leipzig, 2003. – ISBN 3–446–22084–4
- [43] DRÖDER, K. G.: *Untersuchungen zum Umformen von Feinblechen aus Magnesiumknetlegierungen*, Universität Hannover, Dissertation, 1999
- [44] Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN EN 10162: Kaltprofile aus Stahl – Technische Lieferbedingungen*. 2003-12. Dezember 2003
- [45] Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN 4000-4: Sachmerkmal-Leisten für Halbzeug*. 1984-06. Juni 1984
- [46] LANGE, K. (Hrsg.): *Lehrbuch der Umformtechnik – Massivumformung*. Bd. 2. Berlin : Springer, 1974. – ISBN 3–540–06191–7
- [47] Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN EN 755-1: Aluminium und Aluminiumlegierungen: Stranggepresste Stangen, Rohre und Profile – Teil 1: Technische Lieferbedingungen*. 1997-04. April 1997
- [48] Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN EN 10034: I- und H-Profile aus Baustahl – Grenzabmaße und Formtoleranzen*. 1994-03. März 1994
- [49] Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN EN 12167: Kupfer und Kupferlegierungen – Profile und Rechteckstangen zur allgemeinen Verwendung*. 1998-04. 4 1998
- [50] N.N. (Hrsg.): *Stahlschlüssel Taschenbuch*. 20. Stahlschlüssel Wegst, 2004. – ISBN 3–922 599–19–2
- [51] Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN EN 755-9: Aluminium und Aluminiumlegierungen: Stranggepresste Stangen, Rohre und Profile - Teil 9: Profile, Grenzabmaße und Formtoleranzen*. 2001-07. Juli 2001
- [52] Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN 59051: Stabstahl – Warmgewalzter scharfkantiger T-Stahl – Maße, Masse, Toleranzen*. 2004-04. 4 2004
- [53] Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN EN 10048: Warmgewalzter Bandstahl – Grenzabmaße und Formtoleranzen*. 1996-10. 10 1996

- [54] WELO, T. ; PAULSEN, F. ; BROBAK, T. J.: The behaviour of thin-walled, aluminium alloy profiles in rotary draw bending – A comparison between numerical and experimental results. In: *Journal of Material Processing Technology* 45 (1994), Nr. 1-4, S. 173–180
- [55] WELO, T. ; PAULSEN, F.: Local flange buckling and its relation to elastic springback in forming of aluminium extrusions. In: *Journal of Materials Processing Technology* 60 (1996), Nr. 1-4, S. 149–154
- [56] PAULSEN, F. ; WELO, T.: Application of numerical simulation in the bending of aluminium-alloy profiles. In: *Journal of Materials Processing Technology* 58 (1996), Nr. 2-3, S. 274–285
- [57] CLAUSEN, A. H. ; HOPPERSTAD, O. S. ; LANGSETH, M.: Stretch bending of aluminium extrusions for car bumpers. In: *Journal of Materials Processing Technology* (2000), Nr. 102, S. 241–248
- [58] CLAUSEN, A. H. ; HOPPERSTAD, O. S. ; LANGSETH, M.: Sensitivity of model parameters in stretch bending of aluminium alloys. In: *International Journal of Mechanical Sciences* 43 (2001), Nr. 2, S. 427–453
- [59] KYRIAKIDES, S. ; CORONA, E. ; MILLER, J. E.: Effect of yield surface evolution on bending induced cross sectional deformation of thin-walled sections. In: *International Journal of Plasticity* 20 (2004), Nr. 4-5, S. 607–618
- [60] CRITCHLEY, K. L. ; BLOUNT, G. N.: Process analysis software for the prediction of elongation with respect to the draw bending of small diameter thin walled tubing. In: *Journal of Material Processing Technology* 167 (2005), August, Nr. 1, S. 41–46
- [61] GU, R. ; YANG, H. ; ZHAN, M. ; LI, H.: Springback of thin-walled tube NC precision bending and its numerical simulation. In: *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 16 (2006), June, Nr. 2, S. 631–638
- [62] YANG, H. ; GU, R. ; ZHAN, M. ; LI, H.: Effect of frictions on cross section quality of thin-walled tube NC bending. In: *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 16 (2006), August, Nr. 4, S. 878–886

- [63] PAULSEN, F. ; WELO, T.: Cross-sectional deformations of rectangular hollow sections in bending: Part II – analytical models. In: *International Journal of Mechanical Sciences* 43 (2001), Nr. 1, S. 131–152
- [64] PAULSEN, F. ; WELO, T.: Cross-sectional deformations of rectangular hollow sections in bending: Part I – experiments. In: *International Journal of Mechanical Sciences* 43 (2001), Nr. 1, S. 109–129
- [65] PAULSEN, F. ; WELO, T. ; SØVIK, O. P.: A design method for rectangular hollow sections in bending. In: *Journal of Material Processing Technology* 113 (2001), 6, Nr. 1-3, S. 699–704
- [66] CORONA, E.: A simple analysis for bend-stretch forming of aluminium extrusions. In: *International Journal of Mechanical Sciences* 46 (2004), Nr. 3, S. 433–448
- [67] KRUX, R. ; CHATTI, S. ; v. FINCKENSTEIN, E. ; KLEINER, M.: Finite-Elemente Simulation optimiert das Biegen von Profilen. In: *Maschinenmarkt* 105 (1999), Nr. 37, S. 24–29
- [68] LEE, H. ; TYNE, C. J. V. ; FIELD, D.: Finite element bending analysis of oval tubes using rotary draw bender for hydroforming applications. In: *Journal of Material Processing Technology* 168 (2005), Nr. 2, S. 327–335
- [69] SHIRAIISHI, M. ; NIKAWA, M. ; KUBOTA, T. ; GOTO, Y.: Prediction of curvatures of parts extruded through rotary die using fuzzy inference. In: *Journal of Material Processing Technology* 187-188 (2007), Nr. 12, S. 702–705
- [70] LIPPMANN, H.: Ebenes Hochkantbiegen eines schmalen Balkens unter Berücksichtigung der Verfestigung. In: *Ingenieur-Archiv* 27 (1959), S. 153–168
- [71] HÄNERT, M.: Umformen von Profilen mit Rechteckquerschnitt. In: *Seewirtschaft* 5 (1973), Nr. 6, S. 450–451
- [72] WIEBECK, E. ; METSCHKOW, B.: Iterationsverfahren zur Berechnung der elastisch-plastischen Biegung von Profilen. In: *Fertigungstechnik und Betrieb* 26 (1976), Nr. 4, S. 218–221

- [73] VDOVIN, S. I.: Berechnung der Rückfederung des Werkstoffs beim Biegen von Profilen mit Hilfe einer EDV-Anlage. In: *Kuznecno-stampovocnoe prizvodstvo* 22 (1980), Nr. 7, S. 22–24
- [74] ADAMS, B. ; MAMOUTOV, A.: Steuerdatengenerierung für Drei-Walzen-Profilbiegemaschinen mit Hybridmethode aus FE- und Finite Differenz-Prozesssimulation. In: *Blech, Rohre, Profile* 49 (2002), Nr. 2, S. 32–34
- [75] ADAMS, B. ; MAMOUTOV, A.: Steuerdatengenerierung für Drei-Walzen-Profilbiegemaschinen mit Hybridmethode aus FE- und Finite Differenz-Prozesssimulation. In: *UTF-Science* 3 (2002), Nr. 2, S. 13–16
- [76] TRÖSTER, F.: *Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure*. München : Oldenbourg, 2001 (Oldenbourg-Lehrbücher für Ingenieure). – ISBN 3–486–25044–2
- [77] UNBEHAUEN, H.: *Regelungstechnik I*. 14. Vieweg Verlag, 2007
- [78] UNBEHAUEN, H.: *Regelungstechnik II*. 9. Vieweg Verlag, 2007
- [79] MICHELS, K. ; KLAWONN, F. ; KRUSE, R. ; NÜRNBERGER, A.: *Fuzzy-Regelung : Grundlagen, Entwurf, Analyse*. Berlin : Springer, 2002. – ISBN 3–540–43548–4
- [80] GROSSE, N. (Hrsg.) ; SCHORN, W. (Hrsg.): *Taschenbuch der praktischen Regelungstechnik*. Fachbuchverlag Leipzig, 2006. – ISBN 978–3–446–40302–4
- [81] RAU, M.: *Nichtlineare modellbasierte prädiktive Regelung auf Basis lernfähiger Zustandsraummodelle*, Technische Universität München, Dissertation, 2003
- [82] BOTHE, H.-H.: *Neuro-Fuzzy-Methoden*. 1. Berlin : Springer, 1998. – ISBN 3–540–57966–
- [83] N.N.: Kompetenz beim Rohr auf Biegen und Messen. In: *BLECH Inform* (2005), Nr. 1, S. 27–30
- [84] FOSTER, G. B. *Springback Compensated Continuous Roll Forming Machines*. U.S. Patent No. 3,955,389. May 1976
- [85] HARDT, D. E. ; ROBERTS, M. A. ; STELSON, K. A.: Closed-Loop Shape Control of a Roll-Bending Process. In: *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control* 114 (1982), Nr. 4, S. 317–322

- [86] FUNKE, P. ; PALKOWSKI, H.: Mechanische Kennwerte von Kaltprofilen. In: *Bänder Bleche Rohre* (1983), Nr. 5, S. 119–122
- [87] FUNKE, P. ; PALKOWSKI, H.: Einfluss der Fertigung auf die Profilkennwerte. In: *Bänder Bleche Rohre* (1983), Nr. 9, S. 242–244
- [88] Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN EN 10002-1: Metallische Werkstoffe – Zugversuch Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur*. 2001-12. 12 2001
- [89] FUNKE, P. ; GEBHARDT, J. ; PALKOWSKI, H.: Das Bohrlochverfahren zur Eigenspannungsermittlung an Profilen und Rohren. In: *Blech Rohre Profile 32* (1985), Nr. 4, S. 197–201
- [90] STROUSTRUP, B.: *The C++ Programming Language*. Dritte. Boston : Addison-Wesley, 1997. – ISBN 0–201–88954–4
- [91] REENSKAUG, T.: THING-MODEL-VIEW-EDITOR – an Example from a planning-system. / Xerox PARC. 1979. – Forschungsbericht. <http://heim.ifi.uio.no/trygver/mvc/index.html>, 11.10.2007
- [92] BUSCHMANN, F. ; MEUNIER, R. ; ROHNERT, H. ; SOMMERLAD, P. ; STAL, M.: *Pattern-Oriented Software Architecture: A System of Patterns*. John Wiley & Sons Ltd., 1996. – ISBN 978–0471958697
- [93] HELLER, B.: *Halbanalytische Prozess-Simulation des Freibiegens von Fein- und Grobblechen*, Universität Dortmund, Dissertation, 2002
- [94] NAUCK, D. ; KLAWONN, F. ; KRUSE, R.: Combining Neural Networks and Fuzzy Controllers. In: KLEMENT, E. P. (Hrsg.) ; SLANY, W. (Hrsg.): *Fuzzy Logic in Artificial Intelligence: Proc. of the 8th Austrian Artificial Intelligence Conference FLAI'93*. Berlin, Heidelberg : Springer, 1993, S. 35–46
- [95] NAUCK, D. ; KRUSE, R. ; STELLMACH, R.: New Learning Algorithms for the Neuro-Fuzzy Environment NEFCON-I. In: *Proc. o. f. 3rd German GI-Workshop Fuzzy-Neuro-Systeme*. Darmstadt, November 1995
- [96] DIRKSEN, U. ; CHATTI, S. ; KLEINER, M.: Closed-loop Control System for the Three-roll-bending Process Based on Methods of Computational Intelligence. In: *Proc. of the 8th Int. Conf. on Technology of Plasticity*, 2005

- [97] WEINRICH, A.: Konstruktion eines Einzugsensors für die Drei-Walzen-Biegemaschine Roundo R2S Spezial / Institut für Umformtechnik und Leichtbau, Universität Dortmund. 2007. – Studienarbeit
- [98] HOFFMANN, J. (Hrsg.): *Taschenbuch der Messtechnik*. Dritte. München : Fachbuchverlag Leipzig, 2002. – ISBN 3-446-21977-3
- [99] LUDOWIG, G.: *Rechnerintegriertes Fertigungssystem für das Walzrunden von Blechen*. Düsseldorf, Universität Dortmund, Dissertation, 1985
- [100] LIEWALD, M.: *Prozessführung numerisch gesteuerter Umformprozesse mittels algorithmischer und wissensbasierte Regler*, Universität Dortmund, Dissertation, August 1991
- [101] KLAUS, A.: *Verbesserung der Fertigungsgenauigkeit und der Prozesssicherheit des Rundens beim Strangpressen*. Aachen, Universität Dortmund, Dissertation, 2002
- [102] TRACTO-TECHNIK. *Tuboscan MC/CC – 3D Koordinaten-Messsysteme für Rohre*. <http://rohrbiegen.tracto-technik.de/index.cfm?uid=1A243EDB30050CE99432758F3B1AD243>, 11.10.2007
- [103] MÜLLER, A.: Fließformbiegen setzt Standards. In: *Blech InForm* (2006), Nr. 2, S. 22–25. – ISSN 1616–3362
- [104] KLINGELNBERG GMBH, Hückeswagen. *Klingelberg Fließformbiegen - Der Beginn einer Standard-Technologie für Profilliegen*. http://www.klingelberg.info/de/produkte/pdf/p2d_200.pdf, 11.10.2007
- [105] WARNEMÜNDE, R. *3D-Messsystem zur Geometrieprüfung von Rohr- und Schlauchleitungen (OptoInspect3D_Tube)*. http://www.iff.fhg.de/de/iffdbde/Produkt_detail.php?ProduktId=5, 11.10.2007
- [106] GOM. *ATOS III*. <http://www.gom.com/DE/messsysteme/atos/system/varianten/-atos.iii.html>, 11.10.2007
- [107] v. FINCKENSTEIN, E. ; KLEINER, M. ; LIEWALD, M.: Kurvenmessung: Methoden und Mittel zum Konturerfassen an Biegeteilen. In: *Maschinenmarkt* (1991), Nr. 9751, S. 34–39
- [108] *DynaVision Single Point DLS2000 Sensor User Manual*. 2.0. LMI Technologies Inc., Delta, Canada, 2000

- [109] SCHNELL, G. (Hrsg.): *Sensoren in der Automatisierungstechnik*. Vieweg, 1991. – ISBN 3–528–13370–8
- [110] BAUMGARTNER, F.: *Lasertriangulationssensor*. Dokument im Internet. 2002. – http://www.ntb.ch/Pubs/sensordemo/pdf/NTB_24_LTS.pdf, 28.9.2006
- [111] EISLER, W. (Hrsg.): *Praktischer Einsatz von berührungslos arbeitenden Sensoren*. Zweite. Renningen-Malmsheim : expert verlag, 1996 (Sensorik 5). – ISBN 3–8169–1167–6
- [112] NIEBUHR, J. ; LINDNER, G.: *Physikalische Messtechnik mit Sensoren*. 5. München : Oldenbourg Industrier Verlag, 2001. – ISBN 978–3486270075
- [113] DONGES, A. ; NOLL, R.: *Lasermesstechnik, Grundlagen und Anwendung*. Hütthig Buch Verlag, Heidelberg, 1993
- [114] MAAS, C. ; FINGER, L.: *Betrachtung der physikalisch-optischen Gegebenheiten und Einflüsse bei Distanzmessungen mit Triangulationssensoren und deren Berücksichtigung beim LASER-TWIN-SENSOR*. http://www.finger-kg.de/lieferprogramm/micrometer/tastende_laser/aufsatz_twin-theorie/index.html. 2006. – 29.9.2006
- [115] ETSCHBERGER, K. (Hrsg.): *Controller-Area-Network : Grundlagen, Protokolle, Bausteine, Anwendungen*. Dritte, aktualisierte Auflage. München : Hanser, 2002. – ISBN 3–446–21776–2
- [116] SCHNELL, G. (Hrsg.): *Bussysteme in der Automatisierungs- und Prozesstechnik*. Vierte, vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Braunschweig : vieweg, 10 2000 (Praxis der Automatisierungstechnik). – ISBN 3–528–36569–2
- [117] N.N. (Hrsg.): *CANopen DSP-402 : Device Profile Drives and Motion Control*. V2.0. Erlangen : CAN in Automation e. V., 7 2002
- [118] N.N. (Hrsg.): *CANopen DS-301 : Application Layer and Communication Profile*. V4.02. Erlangen : CAN in Automation e. V., 2 2002
- [119] N.N. (Hrsg.): *CANopen DSP-404 : Device Profile Measuring Device and Closed-loop Controllers*. V1.2. Erlangen : CAN in Automation e. V., 5 2002

- [120] N.N. (Hrsg.): *CANopen DS-406 : Device Profile Encoder*. V3.0. Erlangen : CAN in Automation e. V., 5 2002
- [121] MAHNKEN, R.: *Einsatz der optischen 3D-Messtechnik in der Fertigung von Triebwerksbauteilen - Potenzialabschätzung zur Prüfzeitreduktion* -. http://mb-s1.upb.de/LTM/EMM/Themen%20und%20Inhalte/Optische%20Methoden/-Photogrammetrie/3D-Objektvermessung_Tombers.pdf#search=%223d-%20objektvermessung%20Lasertriangulationssensor%22. 2006. – 28.9.2006
- [122] DÜCKER, F.: *Konzeption und Realisierung eines eingebetteten Systems zur Handdetektion mittels optischer Sensoren in einem sicherheitsbezogenen Umfeld*, Fachhochschule Bonn-Rhein-Sieg, Diplomarbeit, 2004. – http://www.inf.fh-bonn-rhein-sieg.de/data/-informatik_/fb_informatik/personen/reinert/duecker.pdf#search=%22Handdetektion-%20Lasertriangulationssensor%22, 28.9.2006
- [123] PRESS, W. H. ; TEUKOLSKY, S. A. ; VETTERLING, W. T. ; FLANNERY, B. P.: *Numerical Recipes in C++*. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2002. – ISBN 0–521–75033–4
- [124] MARQUARDT, D. W.: An Algorithm for Least Squares Estimation of Nonlinear Parameters. In: *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics* 11 (1963), S. 431–441
- [125] LEDVIJ, M.: Curve Fitting Made Easy. In: *The Industrial Physicist* 9 (2003), April/May, Nr. 2, S. 24–27
- [126] BRONSTEIN, I. N. ; SEMENDJAJEW, K. A.: *Taschenbuch der Mathematik*. 24. Thun : Verlag Harri Deutsch, 1989. – ISBN 3–87144–492–8
- [127] The MathWorks, Inc.: *Curve Fitting Toolbox 1 - User's Guide*. 2007. – Matlab Toolbox
- [128] GONZALEZ, R. C. ; WOODS, R. E.: *Digital Image Processing*. 1. Reading, MA : Addison-Wesley, 1992. – ISBN 0–201–50803–6
- [129] DIRKSEN, U. ; CHATTI, S. ; KLEINER, M.: Online-Measurement of Process Data during Three-Roll-Bending. In: *Proc. of the 8th Int. Research/Expert Conf. Trends in the Development of Machinery and Associated Technology (TMT'04)*, 2004. – ISBN 9958–617–21–8, S. 139–142

- [130] DIRKSEN, U. ; CHATTI, S. ; KLEINER, M.: Measuring of the Curvature Distribution of Bent Profiles. In: *Steel Grips, Journal of Steel and Related Materials* 1 (2004), Nr. 3, S. 375–380
- [131] KARBASIAN, H.: *Analyse der Eigenschaftsschwankungen bei Profilen*. 2004. – Experimentelle Studienarbeit, Lehrstuhl für Umformtechnik, Universität Dortmund, Betreuer: S. Chatti, U. Dirksen

Anhang A

Daten der untersuchten Profilhalbzeuge

A.1 Kurze Proben der Profilhalbzeuge

Die Tabelle A.1 gibt eine Übersicht der ermittelten Daten der untersuchten Profilhalbzeuge. Eine Aufstellung der Einzeldaten kann der Studienarbeit [131] entnommen werden.

Eigenschaft	U (s)	V (s)	L (b)	V (w)	T (ww)	F (k)
E-Modul in GPa	78	71	74	202	179	185
Dehngrenze $R_{p0,2}$ in MPa	192	242	181	397	266	321
Hauptspannungswinkel in $^\circ$	-128	-121	-98	-126	-127	-131
Vergleichsspannung in MPa	18,3	14,9	18,8	282,1	140,2	184,9
Nennprofildicke in mm	2	2	1	2	3	5
Max. Winkelabweichung in mm	0,4	0,7	1,2	0,3	1,4	1,4
Max. Verwindung in $^\circ$	0,09	0,05	2,3	0,15	0,7	1,3

Tabelle A.1: Aufstellung der Ergebnisse der untersuchten Profileigenschaften (E-Modul bis Vergleichsspannung sind Mittelwerte; U= U-Profil; V= Vierkanthohlprofil; L= L-Profil; T= T-Profil; F= Flachprofil; b= gebogen; k= kaltgezogen; s= stranggepresst; w= walzprofiliert, ww= warmgewalzt)

A.2 Positionen der entnommenen Flachzugproben

Im Bild A.1 werden die Positionen der den Profilgeometrien entnommenen Zugproben dargestellt.

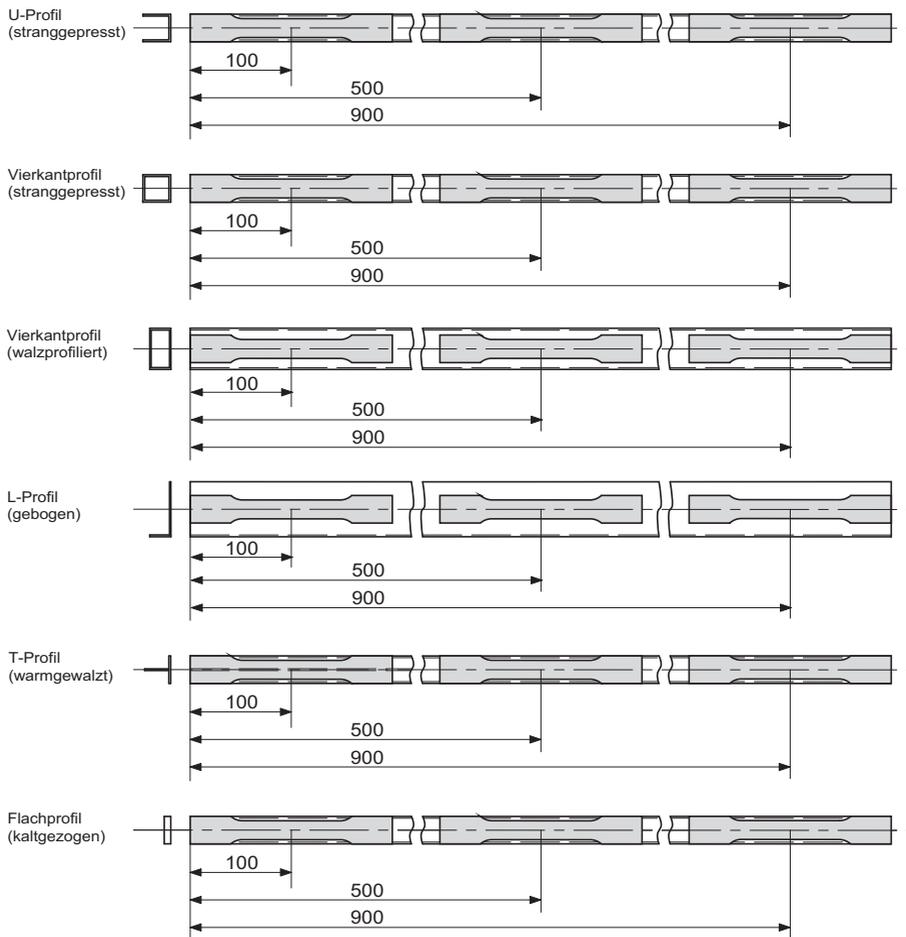


Abbildung A.1: Positionen der entnommenen Flachzugproben in den untersuchten Profilen

A.3 Messorte der Eigenspannungsmessungen

Im Bild A.2 werden die Orte für die Eigenspannungsmessungen bei den untersuchten Profilgeometrien dargestellt.

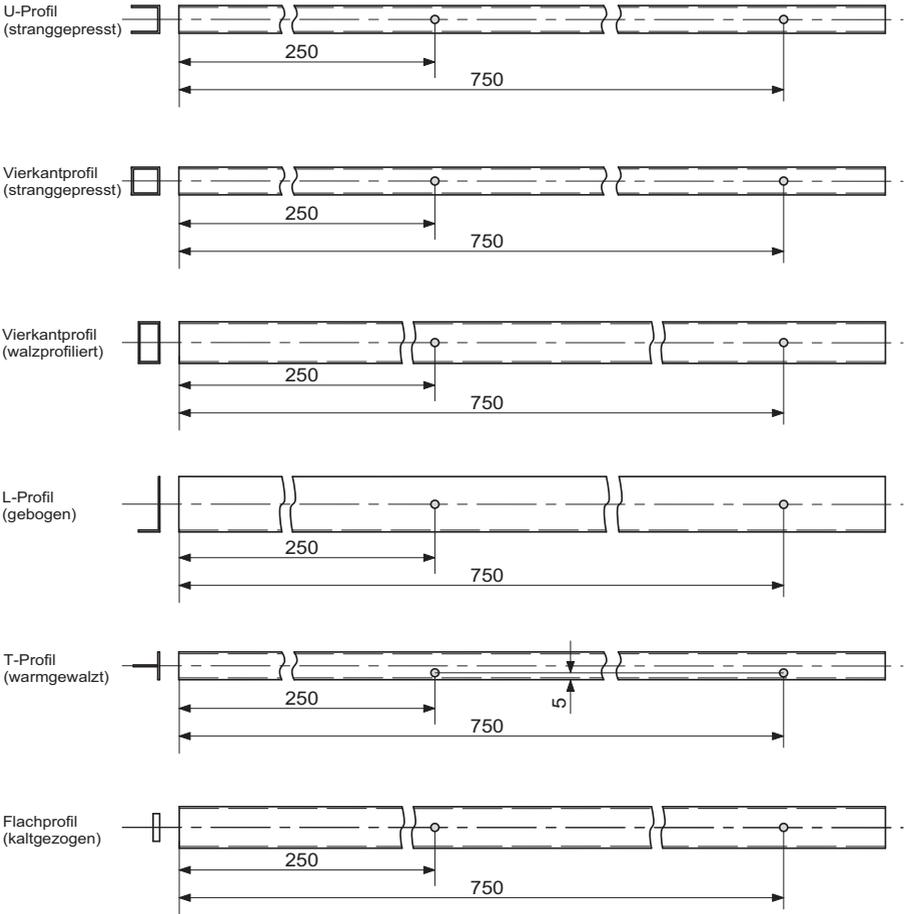


Abbildung A.2: Messorte der Eigenspannungen bei den untersuchten Profilen

A.4 Messorte zur Bestimmung der Profildicke/Wandstärke

Im Bild A.3 werden die Positionen zur Bestimmung der Profildicke bzw. der Wandstärke bei den untersuchten Profilgeometrien dargestellt.

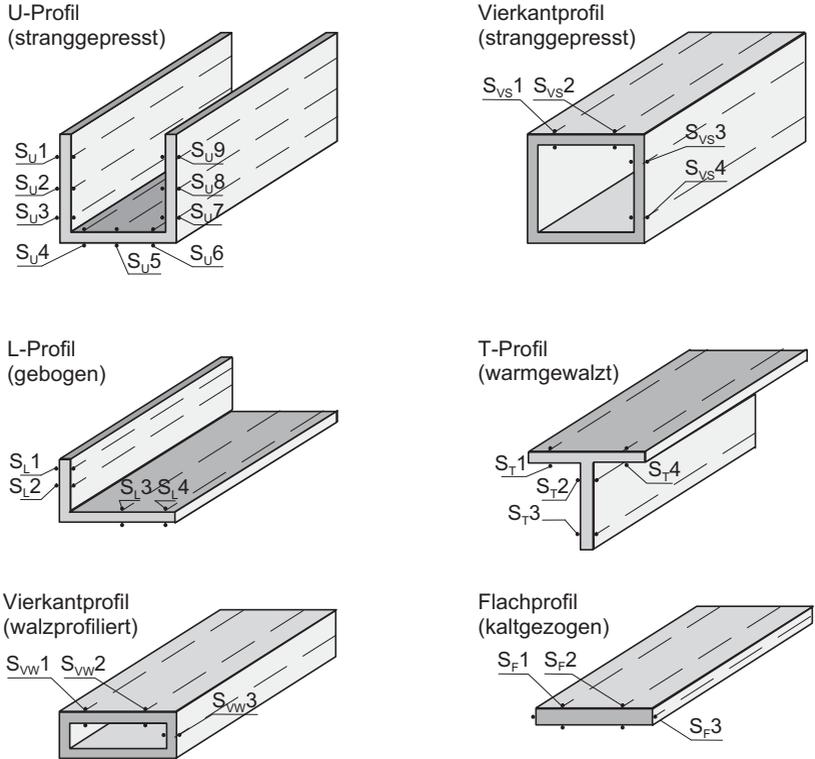
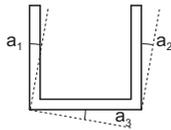


Abbildung A.3: Messpositionen zur Bestimmung der Profildicke bzw. Wandstärke bei den untersuchten Profilen

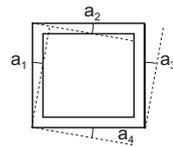
A.5 Messorte zur Bestimmung der Verwindung

Im Bild A.4 werden die Positionen zur Bestimmung der Verwindung bei den untersuchten Profilgeometrien dargestellt.

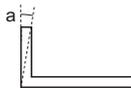
U-Profil
(stranggepresst)



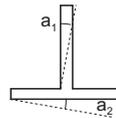
Vierkantprofil
(stranggepresst)



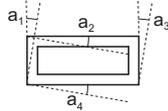
L-Profil
(gebogen)



T-Profil
(warmgewalzt)



Vierkantprofil
(walzprofiliert)



Flachprofil
(kaltgezogen)



Abbildung A.4: Positionen zur Bestimmung der Verwindung bei den untersuchten Profilen

Anhang B

Trobec-Testumgebung

B.1 Benutzungsoberfläche

Die Programmversion der Trobec-Testumgebung mit Benutzungsoberfläche dient insbesondere dem Explorieren des Verhaltens von Prozessregelungen. Hierzu ist es wichtig, dass die verschiedenen Einstellungen schnell und intuitiv modifiziert werden können und Prozessgrößen auch direkt visualisiert werden können. Das Bild B.1 zeigt das Dialogfenster, mit dem eine Profilbiegung vorgenommen werden kann. In ihm wird ausgewählt, ob der Biegeprozess real oder virtuell durchgeführt werden soll. Zur Beobachtung von Prozessgrößen können diese in Diagrammfenstern visualisiert werden, wobei die gemessenen Größen als blaue und die Referenzgrößen als rote Kurve ausgegeben werden. Das Bild B.2 zeigt das Dialogfenster, in dem die Halbzeugbeschreibung vorgenommen werden kann.

B.2 Datendatei

Die Daten eines Projekts werden in der Trobec-Testumgebung in einer ASCII-Datei beschrieben, wobei im Folgenden beispielhaft die Inhalte eine Datendatei gezeigt werden.

```
MODULE_START

HEADER_SECTION_START
NAME      "TRBC_BASE"
```

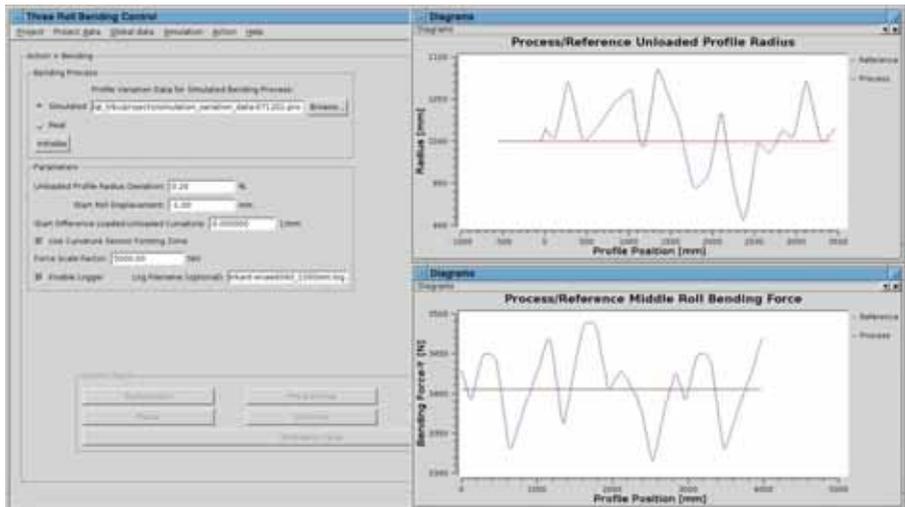


Abbildung B.1: Benutzungsoberfläche QT-TRBC mit visualisierten Prozessgrößen

```

PARENT_MODULE "THREE_ROLL_BENDING_CONTROL"
VERSION "1.0"
AUTHOR "Uwe Dirksen"
DATE "Tue Sept 11 12:52:17 MET 2007"
COMMENT "Example input file for the TRBC-Framework"
HEADER_SECTION_END

DATA_SECTION_START
STATIC_DATA_START

BENDING_CURVE_DATA_START
BENDING_CURVE_SEGMENT_START
ARC_START
  ARC_RADIUS_MM 1000.0
  ARC_LENGTH_MM 3000.0
  # clockwise or counterclockwise
  CURVATURE_DIRECTION CLOCKWISE
ARC_END
BENDING_CURVE_SEGMENT_END
BENDING_CURVE_DATA_END

```

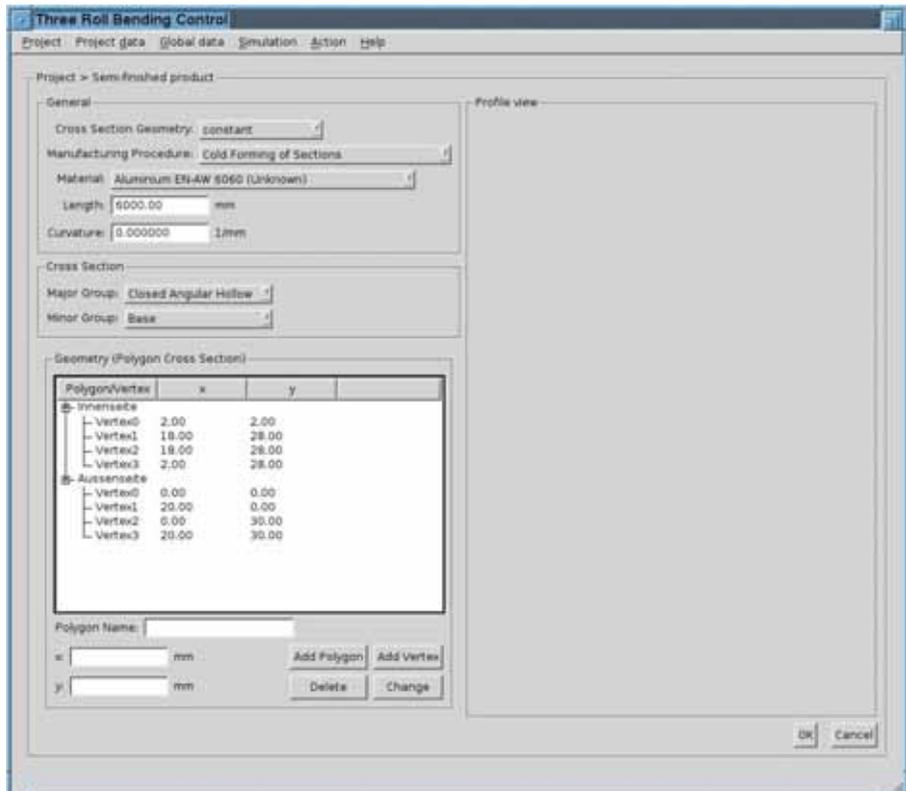


Abbildung B.2: Benutzungsoberfläche QT-Trobec mit Dialogfenster zur Halbzeugbeschreibung

```
SEMI_FINISHED_PRODUCT_DATA_START
MANUFACTURING_PROCEDURE BAR_EXTRUSION
PROFILE_LENGTH_MM 100000.0
INITIAL_PROFILE_CURVATURE 0.0

CROSS_SECTION_START
# vertices are defined in counter-clockwise order
# unit for the polygon vertices is millimeters (mm)
POLYGON_2D_LIST_MM_START
POLYGON_2D_MM_START
POLYGON_IDENTIFIER "Aussenseite"
0.00 0.00
```

```
20.00 0.00
20.00 40.00
0.00 40.00
POLYGON_2D_MM_END

POLYGON_2D_MM_START
POLYGON_IDENTIFIER "Innenseite"
2.00 2.00
18.00 2.00
18.00 38.00
2.00 38.00
POLYGON_2D_MM_END
POLYGON_2D_LIST_MM_END
CROSS_SECTION_END

MATERIAL_DATA_START
IDENTIFIER "Aluminium EN-AW 6060 (AlMgSi0.5)"
BATCH_IDENTIFIER "Unknown"
ELASTIC_MODULUS_DATA_MPA 66954.0
ELASTIC_LIMIT_DATA_MPA 218.6

FLOW_CURVE_START
NADAI_FLOW_CURVE_START
FLOW_CURVE_CONSTANT_MPA 282.0
HARDENING_EXPONENT 0.04112
NADAI_FLOW_CURVE_END
FLOW_CURVE_END
MATERIAL_DATA_END
SEMI_FINISHED_PRODUCT_DATA_END

MACHINE_DATA_START
IDENTIFIER "ROUND0 R-2-S SPEZIAL"

MACHINE_CONFIGURATION_START
MACHINE_KINEMATICS OUTER_ROLLS_MOVE
ARM_LENGTH_MM 310.0
MIDDLE_ROLL_DISTANCE_MM 247.0
MACHINE_CONFIGURATION_END
```

```

IDENTIFIER_INITIAL_ROLL "R_FLAT_I(085.0)_0(110.0)"
INSIDE_RADIUS_INITIAL_ROLL__MM 85.0
OUTSIDE_RADIUS_INITIAL_ROLL__MM 110.0
MIN_POSITION_INITIAL_ROLL__MM 475.0
MAX_POSITION_INITIAL_ROLL__MM 755.0

IDENTIFIER_MIDDLE_ROLL "R_FLAT_I(085.0)_0(110.0)"
INSIDE_RADIUS_MIDDLE_ROLL__MM 85.0
OUTSIDE_RADIUS_MIDDLE_ROLL__MM 110.0
MIN_POSITION_MIDDLE_ROLL__MM 0.0
MAX_POSITION_MIDDLE_ROLL__MM 0.0

IDENTIFIER_MIDDLE_ROLL "R_FLAT_I(085.0)_0(110.0)"
INSIDE_RADIUS_EXIT_ROLL__MM 85.0
OUTSIDE_RADIUS_EXIT_ROLL__MM 110.0
MIN_POSITION_EXIT_ROLL__MM 475.0
MAX_POSITION_EXIT_ROLL__MM 755.0

MIN_VELOCITY_CYLINDER_INITIAL_ROLL__MM_S 1.0
MAX_VELOCITY_CYLINDER_INITIAL_ROLL__MM_S 25.0
MIN_VELOCITY_CYLINDER_EXIT_ROLL__MM_S 1.0
MAX_VELOCITY_CYLINDER_EXIT_ROLL__MM_S 25.0

ROLL_POWERED INITIAL_ROLL
ROLL_POWERED MIDDLE_ROLL
ROLL_POWERED EXIT_ROLL

MIN_ROLL_SPEED__MM_S 0.0
MAX_ROLL_SPEED__MM_S 116.67
MACHINE_DATA_END

CONTROL_DATA_START
PROFI_PROCESS_SIMULATION_NROF_LAYERS_FOR_CROSS_SECTION 399
PROFI_BENDING_MOMENT_CALCULATION_METHOD PROFI_WIEBECK
ROLL_SPEED__MM_S 20.0
VELOCITY_CYLINDERS_FOR_INITIAL_EXIT_ROLLS__MM_S 20.0
LENGTH_ARM_CURVATURE_SENSOR_UNLOADED_PROFILE__MM 1370.0
CONTROL_DATA_END

```

```
CONTROLLER_DATA_SECTION_START
CONTROLLER_DATA_SECTION_END
```

```
STATIC_DATA_END
DATA_SECTION_END
MODULE_END
```

```
MODULE_START
HEADER_SECTION_START
  NAME      "TRBC_SIMULATED_PROCESS"
  PARENT_MODULE  "THREE_ROLL_BENDING_CONTROL"
  VERSION  "1.0"
  AUTHOR   "Uwe Dirksen"
  DATE    "Mon Mar 21 20:58:17 CET 2005"
HEADER_SECTION_END
```

```
DATA_SECTION_START
STATIC_DATA_START
  PROFI_CONTROL_PARAMETER_DATA_START
    BENDING_MOMENT_CALCULATION_METHOD WIEBECK
    RUN_MODE SINGLE_RUN
    NROF_CROSS_SECTION_LAYERS 399
  PROFI_CONTROL_PARAMETER_DATA_END

  TRBC_CONTROL_PARAMETER_DATA_START
    NOISE_AMPLITUDE_IN_FORMING_ZONE_MM 0.0
  TRBC_CONTROL_PARAMETER_DATA_END
STATIC_DATA_END
```

```
VARIATION_DATA_START
  MATERIAL_VARIATION_START

  MATERIAL_PARAMETER_VARIATION_ITEM_START
    CHANGING_PARAMETER ELASTIC_LIMIT_ITEM
    FUNCTION REPEATING_MULTI_LINEAR_INTERPOLATION
    X_OFFSET_MM 0.0
    MEASURING_POINTS_START
      0.0      0.0
      499.9    0.0
```

```

    500.0      21.86
  10000.0    21.86
    MEASURING_POINTS_END
  FUNCTION_END
MATERIAL_PARAMETER_VARIATION_ITEM_END

MATERIAL_PARAMETER_VARIATION_ITEM_START
CHANGING_PARAMETER MATERIAL_CONSTANT_ITEM
FUNCTION REPEATING_MULTI_LINEAR_INTERPOLATION
  X_OFFSET_MM 0.0
  MEASURING_POINTS_START
    0.0      0.0
    499.9   0.0
    500.0   28.2
  10000.0  28.2
    MEASURING_POINTS_END
  FUNCTION_END
MATERIAL_PARAMETER_VARIATION_ITEM_END

MATERIAL_PARAMETER_VARIATION_ITEM_START
CHANGING_PARAMETER HARDENING_EXPONENT_ITEM
FUNCTION REPEATING_MULTI_LINEAR_INTERPOLATION
  X_OFFSET_MM 0.0
  MEASURING_POINTS_START
    0.0      0.0
    499.9   0.0
    500.0   0.004112
  10000.0  0.004112
    MEASURING_POINTS_END
  FUNCTION_END
MATERIAL_PARAMETER_VARIATION_ITEM_END
MATERIAL_VARIATION_END

WORKPIECE_GEOMETRY_VARIATION_START

LOCATION_VARIATION_ITEM_START
  POLYGON 1
  LINE 1
  COLUMN 2

```

```

FUNCTION REPEATING_MULTI_LINEAR_INTERPOLATION
  X_OFFSET__MM 0.0
  MEASURING_POINTS_START
    0.0 0.0
    499.9 0.0
    500.0 -0.1
    10000.0 -0.1
  MEASURING_POINTS_END
FUNCTION_END
LOCATION_VARIATION_ITEM_END

```

```

LOCATION_VARIATION_ITEM_START
# bottom side
POLYGON 1
LINE 2
COLUMN 2
FUNCTION REPEATING_MULTI_LINEAR_INTERPOLATION
  X_OFFSET__MM 0.0
  MEASURING_POINTS_START
    0.0 0.0
    499.9 0.0
    500.0 -0.1
    10000.0 -0.1
  MEASURING_POINTS_END
FUNCTION_END
LOCATION_VARIATION_ITEM_END

```

```

LOCATION_VARIATION_ITEM_START
# top side
POLYGON 1
LINE 3
COLUMN 2
FUNCTION REPEATING_MULTI_LINEAR_INTERPOLATION
  X_OFFSET__MM 0.0
  MEASURING_POINTS_START
    0.0 0.0
    499.9 0.0
    500.0 0.1
    10000.0 0.1

```

```

    MEASURING_POINTS_END
  FUNCTION_END
LOCATION_VARIATION_ITEM_END

LOCATION_VARIATION_ITEM_START
# top side
POLYGON 1
LINE 4
COLUMN 2
FUNCTION REPEATING_MULTI_LINEAR_INTERPOLATION
  X_OFFSET_MM 0.0
  MEASURING_POINTS_START
    0.0 0.0
    499.9 0.0
    500.0 0.1
    10000.0 0.1
  MEASURING_POINTS_END
  FUNCTION_END
LOCATION_VARIATION_ITEM_END

WORKPIECE_GEOMETRY_VARIATION_END
VARIATION_DATA_END

DATA_SECTION_END
MODULE_END

```

B.3 Ausgabedaten

Bei der Untersuchung einer Prozessregelung werden von der Trobec-Testumgebung die Daten in einer Ausgabedatei dokumentiert. Dabei wird für jeden Regelungsschritt ein Datensatz geschrieben, wobei der folgende Ausschnitt beispielhaft die Daten eines Datensatzes zeigt, der unter Verwendung des virtuellen Biegeprozesses erzeugt wurde.

```

TIME: 10.01.2008 9:32:58.907 SLOT: CLCF_CONTROL_INPUT INFO
    Roll displacement= 35.9268 mm
TIME: 10.01.2008 9:32:58.907 SLOT: CLCF_CONTROL_INPUT INFO
    Profile position= 6913.42 mm

```

TIME: 10.01.2008 9:32:58.907 SLOT: CLCF_CONTROL_INPUT INFO

Bending force at middle roll= (582.661 N, 7140.57 N, 0 N)

TIME: 10.01.2008 9:32:58.907 SLOT: CLCF_CONTROL_INPUT INFO

Bending moment M2 at middle roll= 1.03972e+06 Nmm

TIME: 10.01.2008 9:32:58.908 SLOT: CLCF_CONTROL_INPUT INFO

Bending line of the forming zone: (366 points on 663.876 mm)= (-331.828, 20.5547)

(-329.939, 19.8956) (-328.05, 19.2403) (-326.159, 18.5887) (-324.267, 17.9407)
 (-322.373, 17.2965) (-320.479, 16.6559) (-318.583, 16.0192) (-316.686, 15.3861)
 (-314.787, 14.7568) (-312.888, 14.1313) (-310.987, 13.5095) (-309.085, 12.8916)
 (-307.181, 12.2774) (-305.277, 11.667) (-303.371, 11.0605) (-301.464, 10.4578)
 (-299.556, 9.85891) (-297.646, 9.26388) (-295.736, 8.67272) (-293.824, 8.08542)
 (-291.911, 7.50201) (-289.996, 6.92249) (-288.081, 6.34688) (-286.165, 5.77518)
 (-284.247, 5.2074) (-283.048, 4.85454) (-281.848, 4.50322) (-280.648, 4.15344)
 (-279.447, 3.8052) (-278.247, 3.45852) (-277.045, 3.11338) (-275.843, 2.7698)
 (-274.641, 2.42777) (-273.438, 2.0873) (-272.235, 1.74839) (-271.031, 1.41105)
 (-269.827, 1.07527) (-268.623, 0.741063) (-267.418, 0.408426) (-266.213, 0.0773626)
 (-265.007, -0.252124) (-263.801, -0.580031) (-262.594, -0.906357) (-261.387, -1.2311)
 (-260.179, -1.55425) (-258.971, -1.87581) (-257.763, -2.19579) (-256.554, -2.51416)
 (-255.345, -2.83094) (-254.135, -3.14612) (-252.925, -3.45969) (-251.715, -3.77166)
 (-250.504, -4.08202) (-249.293, -4.39077) (-248.081, -4.69791) (-246.869, -5.00343)
 (-245.657, -5.30733) (-244.444, -5.60961) (-243.23, -5.91027) (-242.017, -6.2093)
 (-240.803, -6.5067) (-239.588, -6.80247) (-238.373, -7.0966) (-237.158, -7.3891)
 (-235.942, -7.67996) (-234.726, -7.96917) (-233.51, -8.25674) (-232.293, -8.54266)
 (-231.076, -8.82694) (-229.858, -9.10956) (-228.64, -9.39052) (-227.421, -9.66983)
 (-226.203, -9.94747) (-224.984, -10.2235) (-223.764, -10.4978) (-222.544, -10.7704)
 (-221.324, -11.0414) (-220.103, -11.3107) (-218.149, -11.7381) (-216.195, -12.1612)
 (-214.239, -12.58) (-212.282, -12.9944) (-210.325, -13.4045) (-208.367, -13.8103)
 (-206.407, -14.2117) (-204.447, -14.6088) (-202.486, -15.0015) (-200.524, -15.3898)
 (-198.561, -15.7737) (-196.598, -16.1531) (-194.633, -16.5282) (-192.668, -16.8988)
 (-190.701, -17.265) (-188.734, -17.6268) (-186.767, -17.984) (-184.798, -18.3368)
 (-182.829, -18.6852) (-180.858, -19.029) (-178.887, -19.3683) (-176.916, -19.7031)
 (-174.943, -20.0334) (-172.97, -20.3591) (-170.996, -20.6803) (-169.021, -20.997)
 (-167.045, -21.309) (-165.069, -21.6165) (-163.092, -21.9194) (-161.115, -22.2177)
 (-159.136, -22.5114) (-157.157, -22.8005) (-155.178, -23.0849) (-153.197, -23.3647)
 (-151.216, -23.6399) (-149.235, -23.9104) (-147.252, -24.1762) (-145.27, -24.4373)
 (-143.286, -24.6938) (-141.302, -24.9455) (-139.317, -25.1925) (-137.332, -25.4348)
 (-135.346, -25.6724) (-133.36, -25.9052) (-131.373, -26.1333) (-129.385, -26.3566)
 (-127.397, -26.5751) (-125.409, -26.7889) (-123.42, -26.9978) (-121.43, -27.2019)
 (-119.44, -27.4013) (-117.45, -27.5958) (-115.459, -27.7854) (-113.467, -27.9702)

(-111.475, -28.1502) (-109.483, -28.3253) (-107.49, -28.4955) (-105.497, -28.6608)
 (-103.504, -28.8213) (-101.51, -28.9768) (-99.5152, -29.1274) (-97.5206, -29.2731)
 (-95.5255, -29.4139) (-93.5301, -29.5497) (-91.5344, -29.6805) (-89.5384, -29.8064)
 (-87.542, -29.9273) (-85.5454, -30.0432) (-83.5485, -30.1542) (-81.5513, -30.2601)
 (-79.5538, -30.361) (-77.5561, -30.4569) (-75.5582, -30.5478) (-73.5601, -30.6336)
 (-71.5617, -30.7144) (-69.5631, -30.7901) (-67.5644, -30.8607) (-65.5654, -30.9262)
 (-63.5664, -30.9867) (-61.5671, -31.0421) (-59.5678, -31.0923) (-57.5683, -31.1374)
 (-55.5687, -31.1775) (-53.569, -31.2123) (-51.5692, -31.242) (-49.5693, -31.2666)
 (-47.5694, -31.286) (-45.5695, -31.3003) (-43.5695, -31.3093) (-41.5695, -31.3132)
 (-39.5695, -31.3118) (-37.5695, -31.3053) (-35.5696, -31.2935) (-33.5696, -31.2765)
 (-31.5698, -31.2543) (-29.57, -31.2268) (-27.5702, -31.1941) (-25.5706, -31.1561)
 (-23.5711, -31.1128) (-21.5716, -31.0642) (-19.5724, -31.0104) (-17.5732, -30.9513)
 (-15.5743, -30.8868) (-13.5755, -30.8171) (-11.5769, -30.742) (-9.57852, -30.6616)
 (-7.58036, -30.5758) (-5.58244, -30.4847) (-3.58477, -30.3883) (-1.58736, -30.2865)
 (0.409763, -30.1793) (2.40659, -30.0667) (4.40311, -29.9488) (7.39728, -29.7618)
 (8.39516, -29.6968) (10.3907, -29.5629) (12.3859, -29.4242) (14.3807, -29.281)
 (16.3753, -29.1338) (18.3696, -28.9829) (20.3636, -28.8287) (22.3574, -28.6713)
 (24.351, -28.511) (26.3444, -28.348) (28.3375, -28.1824) (30.3304, -28.0144)
 (32.3231, -27.844) (34.3157, -27.6715) (36.3081, -27.4969) (38.3002, -27.3202)
 (40.2922, -27.1416) (42.2841, -26.9612) (44.2758, -26.7789) (46.2673, -26.5949)
 (48.2586, -26.4093) (50.2499, -26.222) (52.2409, -26.0331) (54.2318, -25.8427)
 (56.2226, -25.6507) (58.2132, -25.4573) (60.2037, -25.2625) (62.1941, -25.0663)
 (64.1843, -24.8687) (66.1744, -24.6698) (68.1643, -24.4696) (70.1541, -24.2681)
 (72.1438, -24.0653) (74.1334, -23.8613) (76.1228, -23.656) (78.1122, -23.4496)
 (80.1014, -23.242) (82.0904, -23.0333) (84.0794, -22.8234) (86.0682, -22.6124)
 (88.057, -22.4003) (90.0456, -22.1871) (92.034, -21.9728) (94.0224, -21.7575)
 (96.0107, -21.5411) (97.9988, -21.3237) (99.9869, -21.1053) (101.975, -20.8859)
 (103.963, -20.6654) (105.95, -20.444) (107.938, -20.2217) (109.925, -19.9983)
 (111.913, -19.7741) (113.9, -19.5489) (115.887, -19.3227) (117.874, -19.0957)
 (119.861, -18.8677) (121.848, -18.6388) (123.835, -18.4091) (125.822, -18.1784)
 (127.808, -17.9469) (129.795, -17.7145) (131.781, -17.4813) (133.767, -17.2472)
 (135.753, -17.0123) (137.739, -16.7765) (139.725, -16.54) (141.711, -16.3026)
 (143.697, -16.0644) (145.683, -15.8254) (147.668, -15.5857) (149.654, -15.3452)
 (151.639, -15.1039) (153.624, -14.8618) (155.61, -14.619) (157.595, -14.3755)
 (159.58, -14.1312) (161.565, -13.8863) (163.55, -13.6406) (165.534, -13.3942)
 (167.519, -13.1471) (169.504, -12.8993) (171.488, -12.6509) (173.473, -12.4018)
 (175.457, -12.152) (177.441, -11.9016) (179.425, -11.6505) (181.409, -11.3988)
 (183.393, -11.1465) (185.377, -10.8936) (187.361, -10.6401) (189.345, -10.386)
 (191.329, -10.1313) (193.312, -9.87601) (195.296, -9.62017) (197.279, -9.36377)

(199.263, -9.10682) (201.246, -8.84934) (203.23, -8.59132) (205.213, -8.33278)
(207.196, -8.07373) (209.179, -7.81417) (211.162, -7.55412) (213.145, -7.29358)
(215.128, -7.03257) (217.111, -6.77109) (219.093, -6.50915) (221.076, -6.24676)
(223.059, -5.98393) (225.041, -5.72067) (227.024, -5.45698) (229.006, -5.19288)
(230.989, -4.92838) (232.971, -4.66348) (234.954, -4.39819) (236.936, -4.13253)
(238.918, -3.86649) (240.9, -3.6001) (242.882, -3.33336) (244.864, -3.06627)
(246.847, -2.79885) (248.829, -2.53111) (250.81, -2.26305) (252.792, -1.99469)
(254.774, -1.72603) (256.756, -1.45708) (258.738, -1.18785) (260.72, -0.918354)
(262.701, -0.648596) (264.683, -0.378585) (266.665, -0.108331) (268.646, 0.162156)
(269.885, 0.331326) (271.123, 0.500581) (272.362, 0.66992) (273.6, 0.839339)
(274.839, 1.00884) (276.077, 1.17841) (277.316, 1.34806) (278.554, 1.51779) (279.792,
1.68758) (281.031, 1.85744) (282.269, 2.02737) (283.508, 2.19736) (284.746, 2.36742)
(285.984, 2.53753) (287.223, 2.7077) (288.461, 2.87792) (289.699, 3.0482) (290.938,
3.21853) (292.176, 3.3889) (293.414, 3.55933) (294.653, 3.72979) (295.891, 3.9003)
(297.129, 4.07085) (298.368, 4.24144) (300.349, 4.51445) (302.33, 4.78754) (304.312,
5.0607) (306.293, 5.33393) (308.274, 5.60721) (310.255, 5.88054) (312.236, 6.15392)
(314.218, 6.42739) (316.199, 6.70093) (318.18, 6.97456) (320.161, 7.24826) (322.142,
7.52204) (324.124, 7.79591) (326.105, 8.06985) (328.086, 8.34387) (330.067, 8.61797)
(332.048, 8.89215)

TIME: 10.01.2008 9:32:58.908 SLOT: CLCF_CONTROL_INPUT INFO
Loaded radius fit data: radius= 827.671 mm standard deviation= 0.032243
asymptotic standard error= 0.958984% nrof samples= 70 x range= 137.767 mm

TIME: 10.01.2008 9:32:58.908 SLOT: CLCF_CONTROL_INPUT INFO
Unloaded profile radius 991.699 mm

TIME: 10.01.2008 9:32:58.908 SLOT: CLCF_CONTROL_INPUT INFO
Distance between machine origin and curvature sensor 554.161 mm

TIME: 10.01.2008 9:32:58.976 SLOT: CLCF_CONTROL_TASK INFO
Reference roll displacement= 35.9268 mm

TIME: 10.01.2008 9:32:58.976 SLOT: CLCF_CONTROL_TASK INFO
Reference profile position= 6913.42 mm

TIME: 10.01.2008 9:32:58.976 SLOT: CLCF_CONTROL_TASK INFO
Reference bending force at middle roll= (588.132 N, 7222.57 N, 0 N)

TIME: 10.01.2008 9:32:58.976 SLOT: CLCF_CONTROL_TASK INFO
Reference bending moment M2 at middle roll in Nmm= (1.05166e+06 Nmm)

TIME: 10.01.2008 9:32:58.976 SLOT: CLCF_CONTROL_TASK INFO
Reference bending line of the forming zone: (0 points on 0 mm)=

TIME: 10.01.2008 9:32:58.976 SLOT: CLCF_CONTROL_TASK INFO
Reference unloaded profile radius 1000 mm

TIME: 10.01.2008 9:32:58.976 SLOT: CLCF_CONTROL_TASK INFO

```
Reference computed loaded profile radius 727.026 mm
TIME: 10.01.2008 9:32:58.976 SLOT: CLCF_CONTROL_TASK      INFO
Reference fitted loaded profile radius 827.935 mm
TIME: 10.01.2008 9:32:58.976 SLOT: CLCF_CONTROLLER      INFO
Error signal at profile position= 6913.42 mm
TIME: 10.01.2008 9:32:58.976 SLOT: CLCF_CONTROLLER      INFO
Error signal of roll displacement= 0 mm
TIME: 10.01.2008 9:32:58.976 SLOT: CLCF_CONTROLLER      INFO
Error signal of bending force at middle roll= (-5.47117 N, -82.0028 N, 0 N)
TIME: 10.01.2008 9:32:58.976 SLOT: CLCF_CONTROLLER      INFO
Error signal of bending moment M2 at middle roll= -11943.2 Nmm
TIME: 10.01.2008 9:32:58.976 SLOT: CLCF_CONTROLLER      INFO
Error signal of loaded radius in mm= -0.263598 mm
TIME: 10.01.2008 9:32:58.976 SLOT: CLCF_CONTROLLER      INFO
Error (difference) expected/measured loaded radius in mm= 878.518 mm
TIME: 10.01.2008 9:32:58.976 SLOT: CLCF_CONTROLLER      INFO
Error signal of unloaded radius in mm= -8.30078 mm (at profile position= 6359.26 mm)
TIME: 10.01.2008 9:32:58.976 SLOT: CLCF_CONTROL_OUTPUT  INFO
Roll speed= 1.2 m/min
TIME: 10.01.2008 9:32:58.976 SLOT: CLCF_CONTROL_OUTPUT  INFO
Control data - roll displacement= 35.9268 mm
TIME: 10.01.2008 9:32:59.006 SLOT: CLCF_CLOCK
DEBUG Clock cycle started (waiting time was 27012 microseconds)
```


Aus der Dortmunder Umformtechnik sind im Shaker Verlag bisher erschienen:

- A. Adelhof: Komponenten einer flexiblen Fertigung beim Profilrunden.
ISBN 3-86111-601-4
- G. Reil: Prozeßregelung numerisch gesteuerter Umformmaschinen mit Fuzzy Logic. ISBN 3-86111-862-9
- F. Maevus: Rechnerintegrierte Blechteilefertigung am Beispiel des Gesenkbiegens. ISBN 3-8265-0104-7
- R. Warstat: Optimierung der Produktqualität und Steigerung der Flexibilität beim CNC-Schwenkbiegen. ISBN 3-8265-1170-0
- H. Sulaiman: Erweiterung der Einsetzbarkeit von Gesenkbiegepressen durch die Entwicklung von Sonderwerkzeugen. ISBN 3-8265-1443-2
- Ch. Smatloch: Entwicklung eines numerisch einstellbaren Werkzeugsystems für das Tief- und Streckziehen. ISBN 3-8265-1465-3
- T. Straßmann: Prozeßführung für das Walzrunden auf der Basis Neuronaler Netze. ISBN 3-8265-1966-3
- L. Keßler: Simulation der Umformung organisch beschichteter Feinbleche und Verbundwerkstoffe mit der FEM. ISBN 3-8265-2256-7
- E. Szücs: Einsatz der Prozeßsimulation bei der Entwicklung eines neuen Umformverfahrens - der Hochdruckblechumformung. ISBN 3-8265-3119-1
- S. Chatti: Optimierung der Fertigungsgenauigkeit beim Profilbiegen.
ISBN 3-8265-3534-0
- F. Haase: Eigenspannungen an dünnwandigen Bauteilen und Schichtverbunden. ISBN 3-8265-4312-2
- N. Austerhoff: Integrierte Produkt- und Prozeßgestaltung für die Herstellung von Blechbiegeteilen. ISBN 3-8265-6613-0
- D. Arendes: Direkte Fertigung gerundeter Aluminiumprofile beim Strangpressen. ISBN 3-8265-6442-1
- R. Kolleck: Finite-Element-Simulation wirkmedienbasierter Blechumformverfahren als Teil einer virtuellen Fertigung. ISBN 3-8265-6566-5
- T. Weidner: Untersuchungen zu Verfahren und Werkzeugsystemen der wirkmedienbasierten Blechumformung. ISBN 3-8265-6602-5
- W. Homberg: Untersuchungen zur Hochdruckblechumformung und deren Verfahrenskomponenten. ISBN 3-8265-8684-0

M. Rohleder: Simulation rückfederungsbedingter Formabweichungen im Produktentstehungsprozess von Blechformteilen. ISBN 3-8265-9977-2

V. Hellinger: Untersuchungen zur Methodik der Berechnung und Herstellung von leichten Stützkernverbunden. ISBN 3-8322-0104-1

A. Klaus: Verbesserung der Fertigungsgenauigkeit und der Prozesssicherheit des Rundens beim Strangpressen. ISBN 3-8322-0208-0

B. Heller: Halbanalytische Prozess-Simulation des Freibiegens von Fein- und Grobblechen. ISBN 3-8322-0923-9

A. Wellendorf: Untersuchungen zum konventionellen und wirkmedienbasierten Umformen von komplexen Feinstblechbauteilen. ISBN 3-8322-2435-1

C. Klimmek: Statistisch unterstützte Methodenplanung für die Hochdruck-Blechumformung. ISBN 3-8322-2994-9

R. Krux: Herstellung eigenschaftsoptimierter Bauteile mit der Hochdruck-Blechumformung und Analyse der induzierten Eigenspannungen. ISBN 3-8322-3551-5

S. Jadhav: Basic Investigations of the Incremental Sheet Metal Forming Process on a CNC Milling Machine. ISBN 3-8322-3732-1

C. Beerwald: Grundlagen der Prozessauslegung und -gestaltung bei der elektromagnetischen Umformung. ISBN 3-8322-4421-2

A. Brosius: Verfahren zur Ermittlung dehnratenabhängiger Fließkurven mittels elektromagnetischer Rohrumformung und iterativer Finite-Element-Analysen. ISBN 3-8322-4835-8

R. Ewers: Prozessauslegung und Optimierung des CNC-gesteuerten Formdrückens. ISBN 3-8322-5177-4

T. Langhammer: Untersuchungen zu neuen Konzepten für PKW-Kraftstoffbehälter. ISBN 3-8322-5300-9

M. Schikorra: Modellierung und simulationsgestützte Analyse des Verbundstrangpressens. ISBN 3-8322-5506-0

M. Schomäcker: Verbundstrangpressen von Aluminiumprofilen mit endlosen metallischen Verstärkungselementen. ISBN 978-3-8322-6039-2

N. Ridane: FEM-gestützte Prozessregelung des Freibiegens. ISBN 978-3-8322-7253-1

R. Shankar: Surface Reconstruction and Tool Path Strategies for Incremental Sheet Metal Forming. ISBN 978-3-8322-7314-9