

Prozessmodelle zum Drei-Rollen-Schubbiegen von Rohrprofilen

Vom Department Maschinenbau
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität Siegen

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Sebastian Kersten

geb. am 13.02.1984 in Siegen

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel

Prof. Dr.-Ing. A. Erman Tekkaya

Tag der mündlichen Prüfung: 30.04.2013

Forschungsberichte des Lehrstuhls für Umformtechnik

Band 2

Sebastian Kersten

**Prozessmodelle zum Drei-Rollen-Schubbiegen
von Rohrprofilen**

Shaker Verlag
Aachen 2013

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.: Siegen, Univ., Diss., 2013

Copyright Shaker Verlag 2013

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1969-8

ISSN 2191-0030

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

Vorwort

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

Professor Dr.-Ing. Bernd Engel, Lehrstuhlinhaber des UTS, betreute mich bei meiner Arbeit. Ihm gilt besonderer Dank für die konstruktive Unterstützung, die eingeräumten wissenschaftlichen Freiräume und die Möglichkeit der experimentellen Umsetzung meiner Ideen, sowie die Erstellung des Erstgutachtens.

Professor Dr.-Ing. A. Erman Tekkaya danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens.

Für die gute Zusammenarbeit bedanke ich mich bei den Mitarbeitern, Kollegen und Studenten des Lehrstuhls sowie den Mitgliedern anderer Lehrstühle und Institute. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Markus Hinkel, Herrn M.Sc. Peter Kopfer und Herrn Dipl.-Ing. Christian Mathes, die mich bei der Arbeit mit hilfreichen fachlichen Diskussionen und Anregungen unterstützt haben.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meiner Freundin Justyna und bei meinen Eltern, die großes Verständnis für die Arbeit gezeigt und mich während der Arbeit aber auch während meiner gesamten Ausbildung wesentlich unterstützt haben.

Kurzzusammenfassung

Das Drei-Rollen-Schubbiegen (DRSB) ist neben dem Drei-Rollen-Biegen eines der industriell am häufigsten angewendeten Freiformbiegeverfahren zur Herstellung gebogener Profile (insbes. Rohre) mit großen Radien und Radienverläufen. Die Gestaltgebung erfolgt kinematisch. Der Vorteil gegenüber formgebundenen Biegeverfahren ist die hohe Fertigungsflexibilität, woraus ein großes Teilespektrum bei gleichen Biegewerkzeugen resultiert.

Das DRSB wird von einer Vielzahl an Prozesseinflüssen bestimmt. Dazu zählen unter anderem Maschinennachgiebigkeiten und Halbzeugschwankungen der Werkstoffeigenschaften sowie der Querschnittsgeometrie. Das bestehende analytische Modell zur Berechnung der Maschinenparameter ist zu ungenau. Aus diesem Grund werden die Maschineneinstellungen zum DRSB i.d.R. empirisch bestimmt. Dazu wird häufig eine Vielzahl an Biegeversuchen benötigt.

In dieser Arbeit werden zwei Prozessmodelle zum DRSB von Rohrprofilen vorgestellt, die im Vergleich zu dem bestehenden analytischen Modell eine verbesserte Vorhersagegenauigkeit bieten. Damit soll der Aufwand beim Einrichten der Biegemaschine reduziert werden. Prozessmodell 1 ist die erweiterte analytische Beschreibung des DRSBs. Prozessmodell 2 basiert auf einem Standardversuch zum DRSB. Dabei wird anhand zweier Biegeversuche die Beziehung zwischen Umformrollenposition und resultierendem Biegeradius für das zu biegende Rohr charakterisiert. Mit beiden Prozessmodellen werden die Maschinenparameter bestimmt, um endkonturnahe Biegegeometrien mit geringen Restabweichungen zur Soll-Biegekontur herzustellen.

Für den Fall, dass die Restabweichungen dennoch zu groß sind, können Korrekturmodelle verwendet werden, die ebenfalls in dieser Arbeit vorgestellt werden. Mit Hilfe weiterer Biegeversuche werden damit die Restabweichungen anhand der Messdaten der resultierenden Biegeradien bzw. Biegewinkel iterativ auf eine maximal zulässige Konturabweichung reduziert. In Kombination mit den entwickelten Prozessmodellen wird somit eine Methodik zur Prozessauslegung des DRSBs gezeigt, die die Herstellung einer Soll-Biegekontur bei minimalem Einstellaufwand gewährleistet.

Abstract

The Three-Roll-Pushbending (TRPB) is one of the most commonly used freeform-bending procedures to produce bent profiles (especially tubes) with large radii and/or radii-distributions. The TRPB is a kinematical bending procedure and offers great flexibility. This results in various parts using the same bending tools.

Unfortunately, a lot of different influence factors like the machine deflection or batch variations of the material properties and the profile cross section, for example, have to be considered in the TRPB process. These influences are not described satisfactorily using analytical or numerical models, so far. The prediction of the machine parameters to bend a desired radius is very difficult. Thus, the machine parameters often are determined empirically accepting high financial and material effort.

In order to enhance the setup procedure and the efficiency of the TRPB of tube profiles, two different process models have been developed offering an improved accuracy compared to existing methods. Model 1 is the advanced analytical process layout based on an existing analytical model of the TRPB. Model 2 is the process layout based on a bending test. The bending test allows the characterization of the specific process using two bent profiles. Both models are used to determine the machine parameters to bend near-net-shape bending contours with minimal deviations to the desired part.

In case that an even higher accuracy is needed, correction models can be applied which are introduced, too. Using the measurement results of the bending contour (radii, bending angles) as input data for the calculation, the deviations can be reduced iteratively until an acceptable deviation is reached. Combining the process models and the correction-value models, a method for the process layout of the TRPB is shown, ensuring the production of the desired bending contour with minimal effort.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Forschung	3
2.1	Profilbiegen	3
2.1.1	Freiformbiegen	5
2.1.2	Drei-Rollen-Schubbiegen.....	9
2.2	Charakterisierung von Halbzeugen zum Freiformbiegen	13
2.3	Berechnungsgrundlagen für das Drei-Rollen-Schubbiegen	16
2.3.1	Geometrische Beziehungen.....	16
2.3.2	Kinematiken beim Drei-Rollen-Schubbiegen.....	18
2.3.3	Berechnung der Spannungen und Dehnungen beim Biegen	23
2.3.4	Berechnung des Biegemoments	25
2.3.5	Berechnung des Radius nach der Rückfederung.....	26
2.3.6	Kompensation der Rückfederung	27
2.3.7	Biegeisometrie	28
2.4	Arbeitsdiagramm für das Drei-Rollen-Schubbiegen	32
2.5	Schlussfolgerungen aus dem Stand der Forschung	36
3	Motivation, Zielsetzung und Vorgehensweise	39
4	Versuchseinrichtungen und Halbzeuge	41
4.1	Versuchsanlagen	41
4.1.1	Zugprüfanlage.....	41
4.1.2	CNC-Biegemaschine.....	41
4.2	Messtechnik	42
4.2.1	Portable Koordinatenmessmaschine.....	42
4.2.2	Optisches Rohrmesssystem.....	43
4.2.3	Induktive Wegaufnehmer.....	44
4.3	Versuchsaufbauten, Werkzeuge und Halbzeuge	44
4.3.1	Halbzeuge und Probengeometrien.....	44
4.3.2	Zugversuch und Werkstoffkennwerte.....	45
4.3.3	Werkzeuge zum Drei-Rollen-Schubbiegen	48
4.4	FE-Simulation	49
5	Validierung des bestehenden analytischen Modells	53
5.1	Bestimmung der hauptsächlichen Prozesseinflüsse	53
5.2	Experimentelle Untersuchungen	57
5.3	Untersuchung des Einflusses der Maschinennachgiebigkeit	59
5.3.1	Messung der Achsauffederungen unter Last.....	59
5.3.2	FE-Simulation.....	61
5.4	Validierung der plastomechanischen Berechnung (Einfluss der Halbzeugeigenschaften)	65

5.4.1	Berechnung des Biegemoments	66
5.4.2	Berechnung der Rückdehnung	70
5.5	Validierung des geometrischen Modells (Einfluss der Position der Umformrolle)	71
5.6	Schlussfolgerungen.....	75
6	Prozessmodell 1: Erweiterte analytische Beschreibung	77
6.1	Kompensation der Maschinennachgiebigkeit.....	77
6.2	Berücksichtigung der Abhängigkeit vom Eingriffswinkel	79
6.2.1	Berechnung der Umformgrade in Rohrlängsrichtung	80
6.2.2	Berechnung der resultierenden Radien	81
6.3	Gesamtmodell zur Bestimmung der Maschinenparameter	83
6.4	Validierung des Gesamtmodells	84
7	Prozessmodell 2: Standardversuch zum Drei-Rollen-Schubbiegen	87
7.1	Definition des Standardversuchs	87
7.2	Validierung des Standardversuchs.....	90
8	Korrekturmodelle	93
8.1	Korrektur des Biegeradius	93
8.1.1	Allgemeingültiges Korrekturmodell.....	93
8.1.2	Korrektur für Prozessmodell 1	95
8.1.3	Korrektur für Prozessmodell 2	95
8.2	Korrektur des Biegewinkels	96
8.3	Validierung der Korrekturmodelle	97
9	Methodik zur Prozessauslegung	103
10	Validierung mittels Demonstratorgeometrien.....	107
10.1	Zwei-Radien-Geometrie.....	108
10.2	Radienverlauf	111
11	Zusammenfassung.....	115
12	Literaturverzeichnis.....	117
13	Anhang	125

Nomenklatur

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

Schreibweisen

CARL MUSTERMANN GMBH	Personen-, Firmen- und Verbandsnamen werden im Text durch Großbuchstaben hervorgehoben.
<i>Namen</i>	Die kursive Schriftform kennzeichnet die jeweiligen Namen.
ADELHOF (1993); ADELHOF et al. (1992)	Quellenverweise erfolgen durch die Angabe des Nachnamens des erstgenannten Autors bzw. Herausgebers in Großbuchstaben gefolgt von der Angabe des Erscheinungsjahres in runden Klammern. Gibt es mehrere Bücher des gleichen Autors in einem Jahr wird ein freigewählter Suffix hinzugefügt. Die Mitarbeit weiterer Autoren wird durch den Zusatz „et al.“ ausgedrückt. Sind nur zwei Autoren beteiligt, werden diese mit dem Zeichen „&“ getrennt. Sind die Autoren/Herausgeber namentlich unbekannt, steht die veröffentlichende Körperschaft oder Zeitschrift als Ersatz.
[G 1]	Gleichungen werden mit G und der laufenden Nummerierung gekennzeichnet.

Formelzeichen

<u>Zeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bezeichnung</u>
\vec{v}	[mm]	Vektor zur Berechnung der Maschinenparameter aus der Biegetabelle
\vec{n}	[-]	Normalenvektor auf eine Biegeebene
Δl	[mm]	Längenänderung einer Faser

ΔR	[mm]	absolute Radienabweichung
ΔR_{rel}	[%]	relative Radienabweichung
ΔV_g	[mm]	Anteil der Länge V_g
$\Delta \beta_{rel}$	[%]	relative Biegewinkelabweichung
ΔB	[-]	absolute Abweichung zwischen B und B_{gem}
a	[mm]	Aufmaß einer Rolle
a_k	[-]	Konstante beim allgemeingültigen Korrekturmodell
A_g	[%]	Gleichmaßdehnung
A_r	[mm ²]	Rohrquerschnitt
$A_{r,el}$	[mm ²]	elastisch verformter Anteil des Rohrquerschnitts
$A_{r,pl}$	[mm ²]	elastisch-plastisch verformter Anteil des Rohrquerschnitts
A_s	[N/mm ²]	Ansatzkonstante zur Fließkurvenapproximation nach <i>Swift</i>
a_φ	[-]	Faktor der Exponentialfunktion zur Approximation von $\varphi_{t,a}$
b	[mm]	Bogenlänge bezogen auf die neutrale Faser
B	[-]	Biegefaktor
B_{gem}	[-]	resultierender Biegefaktor
b_r	[mm]	Breite des infinitesimalen Flächenabschnitts am Rohrquerschnitt
B_s	[-]	Ansatzkonstante zur Fließkurvenapproximation nach <i>Swift</i>
B_V	[-]	Biegefaktor beim Standardversuch
b_δ	[mm]	Bogenlänge zwischen Biegerolle und Umformrolle
c_{br}	[kN/mm]	Achssteifigkeit der Biegerolle
C_s	[-]	Ansatzkonstante zur Fließkurvenapproximation nach <i>Swift</i>
c_{sr}	[kN/mm]	Achssteifigkeit der Stützrolle(n)
c_{ur}	[kN/mm]	Achssteifigkeit der Umformrolle
d_0	[mm]	Rohraußendurchmesser
e	[-]	Eulersche Zahl

E	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul
e_{BM}	[mm]	gemessene Auffederung der Biegemaschine
e_{br}	[mm]	Nachgiebigkeit der Biegerolle
e_{tot}	[mm]	Gesamtauffederung an der Umformrolle
e_{ur}	[mm]	Nachgiebigkeit der Umformrolle
F_{gem}	[kN]	gemessene Kraft am Hydraulikzylinder der äußeren Spannbacke
F_{quer}	[kN]	Querkraft an der Umformrolle
F_S	[kN]	Kraft am Hydraulikzylinder der Umformrolle
\bar{F}_{br}	[kN]	Kraft an der Biegerolle
\bar{F}_{sr}	[kN]	Kraft an den Stützrollen
F_{ur}	[kN]	Kraft an der Umformrolle
h_{ur}	[mm]	Hebelarm der Kraft an der Umformrolle
j	[-]	Laufvariable / Anzahl an Rohrschenkeln bei der Biegeisometrie
k	[-]	Laufvariable / Anzahl der Bögen bei der Biegeisometrie
k_f	[N/mm ²]	Fließspannung
KF	[-]	Korrekturparameter
L	[mm]	relative Zustellung der Umformrolle parallel zum Biegearm
l	[mm]	absolute Zustellung der Umformrolle parallel zum Biegearm
L'	[mm]	kompensierte Zustellung der Umformrolle
l_0	[mm]	Ausgangslänge einer Faser / Länge der neutralen Faser
L_{korr}	[mm]	korrigierte Zustellung der Umformrolle
L_V	[mm]	Zustellung der Umformrolle beim Standardversuch
m	[-]	Index zur Bezeichnung einer Endposition
M_b	[Nm]	Biegemoment
$M_{b,el}$	[Nm]	Elastischer Anteil des Biegemoments
$M_{b,gem}$	[Nm]	gemessenes Biegemoment

$M_{b,ges}$	[Nm]	Gesamtbiegemoment
$M_{b,pl}$	[Nm]	elastisch-plastischer Anteil des Biegemoments
m_g	[-]	Geradensteigung beim Standardversuch
$m_{g,korr}$	[-]	korrigierte Geradensteigung beim Standardversuch
$M_{Rück}$	[Nm]	Rückstellmoment bei der Rückfederung
n	[-]	Anzahl der Iterationen
n_v	[-]	Verfestigungsexponent
R	[mm]	Biegeradius
r_a	[mm]	Außenradius des Rohres
R_{an}	[mm]	analytisch berechneter Biegeradius
R_{br}	[mm]	Nennradius der Biegerolle
$R_{Entlast}$	[mm]	Biegeradius nach der Entlastung
R_{gem}	[mm]	resultierender / gemessener Biegeradius (Mittelwert)
$R_{gem,1}$	[mm]	erster Messwert für den resultierenden Biegeradius
$R_{gem,2}$	[mm]	zweiter Messwert für den resultierenden Biegeradius
$R_{gem,3}$	[mm]	dritter Messwert für den resultierenden Biegeradius
$R_{gem,V}$	[mm]	resultierender Biegeradius beim Standardversuch
R_{Last}	[mm]	Biegeradius unter Last
$R_{Last,V}$	[mm]	Last-Biegeradius beim Standardversuch
R_m	[N/mm ²]	Zugfestigkeit
R_{min}	[mm]	minimaler Biegeradius
R_{mittel}	[mm]	mittlerer Biegeradius über den Bogen
$R_{p0,2}$	[N/mm ²]	0,2%-Dehngrenze
R_{sp}	[mm]	Nennradius der Stützrolle
R_{ur}	[mm]	Nennradius der Umformrolle
s_0	[mm]	Wanddicke des Rohres

s_{aS}	[mm]	Setzbewegung an der äußeren Spannbacke
s_{BA}	[mm]	Setzbewegung an der Biegeachse
t_φ	[-]	Exponent der Exponentialfunktion zur Approximation von $\varphi_{t,a}$
V	[mm]	Rohrvorschub der Transporteinheit
V_A	[mm]	Anfahrweg beim Rohrvorschub
V_g	[mm]	Vorschubweg zwischen zwei Bögen einer Biegeisometrie
V_{korr}	[mm]	korrigierter Rohrvorschub der Transporteinheit
w	[-]	Laufvariable / Anzahl der Rotationen bei der Biegeisometrie
W	[-]	Wanddickenfaktor
W_z	[mm ³]	Axiales Widerstandsmoment des Rohrquerschnitts
x_0	[mm]	Ausgangsposition der Umformrolle in x-Richtung
$x_{0,max}$	[mm]	maximal zulässiger Wert für x_0
$x_{0,min}$	[mm]	minimal zulässiger Wert für x_0
x_{0el}	[mm]	Länge des elastischen Anteils des Biegebalkens
x_b	[mm]	Biegeposition der Umformrolle in x-Richtung
x_{lb}	[mm]	Länge des Biegebalkens
x_R	[mm]	Abstand zwischen Rohranfang und y-Achse
y	[mm]	Abstand senkrecht zur neutralen Faser
y_0	[mm]	Ausgangsposition der Umformrolle in y-Richtung
y_b	[mm]	Biegeposition der Umformrolle in y-Richtung
y_b	[mm]	y-Achsenabstand beim Standardversuch
$y_{b,korr}$	[mm]	korrigierter y-Achsenabstand beim Standardversuch
y_e	[mm]	Grenze der elastischen Verformung senkrecht zur neutralen Faser
α	[°]	Biegearmwinkel
α'	[°]	kompensierter Biegearmwinkel
α_{korr}	[°]	korrigierter Biegearmwinkel

α_V	[°]	Biegearmwinkel beim Standardversuch
β	[°]	Biegewinkel
β_{gem}	[°]	resultierender Biegewinkel
δ	[°]	Eingriffswinkel
δ_0	[°]	minimal möglicher Eingriffswinkel
δ_{erf}	[°]	erforderlicher Eingriffswinkel
ε	[-]	Dehnung
$\varepsilon_{Entlast}$	[-]	bleibende Dehnung nach der Entlastung
ε_R	[-]	Rückdehnung an der Randfaser des Rohres
ε_l	[-]	Dehnung in Rohrlängsrichtung
$\varepsilon_{l,a}$	[%]	Dehnung an der Außenfaser in Rohrlängsrichtung
θ	[°]	Rotationswinkel zwischen zwei Biegeebenen
μ	[-]	Reibungskoeffizient
σ	[N/mm ²]	Normalspannung
σ_R	[N/mm ²]	imaginäre elastische Randspannung
σ_l	[N/mm ²]	Tangentialspannung in Rohrlängsrichtung
$\sigma_{l,el}$	[N/mm ²]	Tangentialspannung im elastischen Bereich
$\sigma_{l,pl}$	[N/mm ²]	Tangentialspannung im plastischen Bereich
φ	[-]	Logarithmischer Umformgrad / wahre Dehnung
$\varphi_{l,a}$	[-]	Umformgrad an der Außenfaser in Rohrlängsrichtung

Abkürzungen

<u>Zeichen</u>	<u>Bedeutung</u>
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
CNC	Computerized Numerical Control

DMS	Dehnmessstreifen
DRSB	Drei-Rollen-Schubbiegen
E-Modul	Elastizitätsmodul
FEM	Finite Elemente Methode
FE-Simulation	Finite Elemente Simulation
FFB	Freiformbiegen
insbes.	insbesondere
KNN	Künstliches Neuronales Netz
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
Prozessmodell 1	erweiterte analytische Beschreibung des DRSB
Prozessmodell 2	Prozessmodell des DRSBs auf Basis eines Standardversuchs
TSSB	Torque Superposed Spatial Bending
UTS	Lehrstuhl für Umformtechnik der Universität Siegen