

Ein Beitrag zur Herstellung definierter Freiformbiegegeometrien bei Rohren und Profilen

Vom Fachbereich Maschinenbau
der Universität Siegen
zur Erlangung des akademischen Grades
DOKTOR – INGENIEUR
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation
von
Dipl.-Wirt.-Ing. Christian Gerlach
aus Kreuztal

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dietrich Bauer

Tag der mündlichen Prüfung: 01.03.2010

Forschungsberichte des Lehrstuhls für Umformtechnik

Band 1

Christian Gerlach

**Ein Beitrag zur Herstellung definierter
Freiformbiegegeometrien bei Rohren und Profilen**

Shaker Verlag
Aachen 2010

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., 2010

Copyright Shaker Verlag 2010

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9484-7

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 Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (FWSI) der Universität Siegen durchgeführt habe. Die Ausarbeitung erfolgte teilweise am Institut und teilweise neben meiner Tätigkeit bei der Tracto-Technik GmbH & CoKG in Lennestadt.

Professor Dr.-Ing. B. Engel 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. D. Bauer danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens.

Für die Zusammenarbeit bedanke ich mich bei den Mitarbeitern, Kollegen und Studenten des Instituts, den Mitarbeitern der Werkstatt und Mitgliedern anderer Institute, die mich bei der Arbeit mit hilfreichen fachlichen Diskussionen und Denkanregungen unterstützt haben.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meiner Familie, die großes Verständnis für die Arbeit gezeigt hat und mich während der gesamten Zeit wesentlich unterstützt hat.

Kreuztal den 26.10.2009

Christian Gerlach

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich diese Arbeit selbstständig und nur unter Zuhilfenahme der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Ich habe noch keinen Promotionsversuch unternommen.

Kreuztal den 26.10.2009

Christian Gerlach

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	3
2.1	Biegeumformung von Blechen, Drähten und anderen Profilen	3
2.2	Rotationszugbiegen mit Dorn	4
2.2.1	Werkzeuge beim Rotationszugbiegen mit Dorn.....	4
2.2.2	Verfahren Rotationszugbiegen mit Dorn.....	5
2.2.3	Grenzen des Rotationszugbiegens.....	6
2.2.4	Definitionen des Biegeteils.....	7
2.3	Dreirollenbiegen	8
2.3.1	Werkzeuge beim Dreirollenbiegen.....	9
2.3.2	Verfahren Dreirollenbiegen.....	10
2.3.3	Grenzen des Dreirollenbiegens.....	11
2.3.4	Integration auf einer Rotationszugbiegemaschine.....	12
2.3.5	Definition der Biegelinie	12
2.4	Rückfederung von Biegeteilen	14
2.4.1	Charakterisierung des elastischen Umformverhaltens	15
2.4.2	Charakterisierung des elastisch-plastischen Umformverhaltens	16
2.5	Rückfederungsvorhersage bei Blechen und Rohren	18
2.5.1	Grundlagen für das Rohr	19
2.5.2	Berechnung des Biegemoments am Rohr.....	20
2.5.3	Berechnung des Radius nach der Rückfederung	21
3	Motivation, Zielsetzung, Vorgehensweise	25
3.1	Motivation	25
3.2	Zielsetzung	26
3.3	Vorgehensweise	26
4	Modellbildung: Auslegung der Werkzeugzustellung	29
4.1	Vorüberlegungen	29
4.2	Modell 1 (Geometrie)	31
4.2.1	Arbeitsdiagramm	34
4.2.2	Einstellvorschrift	35
4.3	Modell 2 (Rückfederung)	38
4.3.1	Vereinfachte Rückfederungskompensierung.....	40
4.3.2	Iterative Rückfederungskompensierung	41
4.4	Modell 3 (Biegelinie)	41
4.4.1	Phase I bei geringen Krümmungen	41
4.4.2	Phase I bei großen Krümmungen	45
4.4.3	Phase II: Biegelinie unter Belastung (Entlastungslinie).....	48
4.4.4	Phase II: Berechnung der Werkzeugposition	51
4.4.5	Übergangsbereich: Phase I - II	52
4.4.6	Phase III.....	56

5	Verwendete Versuchseinrichtungen und Hilfsmittel	59
5.1	Versuchsanlagen	59
5.1.1	ZN250.....	59
5.1.2	TUBOTRON 120	60
5.2	Eingesetzte Messtechnik.....	61
5.2.1	Einfache Messmittel	61
5.2.2	Koordinatenmessmaschine	61
5.2.3	Vialux Autogrid.....	61
5.3	Versuchsaufbauten	62
5.3.1	Zugversuch.....	62
5.3.1.1	Werkstoffkennwerte	62
5.3.1.2	E-Modul, Rückfederungsmodul	62
5.3.2	Biegeversuch	63
5.3.3	Dreirollenbiegeversuch.....	65
5.4	FE-Simulation	67
6	Experimentelle Untersuchungen.....	69
6.1	Charakterisierung der Werkstoffe	69
6.2	Dehnungsverteilung über den Biegequerschnitt	70
6.2.1	Formänderungsanalyse	71
6.2.2	Wanddickenanalyse	76
6.2.3	Zusammenfassung	76
6.3	Phase I (Modell 3)	77
6.3.1	Versuchsergebnisse	77
6.3.2	Modell	80
6.3.3	Simulation	80
6.3.4	Vergleich	82
6.3.5	Zusammenfassung	84
6.4	Phase II (Modell 3).....	87
6.4.1	Versuch.....	87
6.4.2	Simulation	92
6.4.3	Vergleich	95
6.4.4	Zusammenfassung	98
6.5	Anwendungsbeispiel: Phase II mit Rohr D = 40 mm.....	100
6.5.1	Versuch.....	100
6.5.2	Vergleich	103
6.5.3	Zusammenfassung	106
7	Einstellvorschrift	107
7.1	Vorgehensweise bei konstanten Radien	107
7.2	Vorgehensweise bei Krümmungsverläufen	110
8	Zusammenfassung und Ausblick	113
9	Literaturverzeichnis.....	115
10	Anhang	123

Nomenklatur

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

Schreibweisen

- [1], [2] Quellenverweise werden in eckigen Klammern durch die Angabe der laufenden Nummer im Text angegeben. Die laufende Nummer wird im Literaturverzeichnis der entsprechenden Literaturquelle zugeordnet.
- [G 1] Gleichungen werden mit G und der laufenden Nummerierung gekennzeichnet.
- Namen* Die kursive Schriftform kennzeichnet die jeweiligen Namen.

Abkürzungen

<u>Zeichen</u>	<u>Bedeutung</u>
Abb.	Abbildung
Alu	Aluminium
B1-3	Bereich 1-3
bzw.	beziehungsweise
BN	Biegenullpunkt, Mittelpunkt der Drehachse des Biegetisches
CNC	Computerized Numerical Control
DGL	Differenzialgleichung
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DMS	Dehnungsmessstreifen
ex	exponentielles Werkstoffmodell
FEM	Finite Elemente Methode
li	lineares Werkstoffmodell
Nr.	Nummer
PI-III	Phase I-III
PC	Personalcomputer
R1-6	Versuche Rechteckprofil 1-6
St	Stahl
vgl.	vergleiche
V	Kennzeichen für variablen Radius
V1, V2, V3	Versuch 1-3
W1-W7	Werkstoffe 1-7

Formelzeichen

<u>Zeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bezeichnung</u>
a	[-]	Faktor für Krümmungsverlauf
A	[mm ²]	Querschnittsfläche
A(x _A , y _A)	[mm, mm]	Punkt A
A _{el}	[mm ²]	elastische Querschnittsfläche
A _g	[-]	Gleichmaßdehnung
A _L	[-]	Faktor für lineare Approximation
A _N	[-]	Faktor für exponentielle Approximation nach Nadai
a _{pI}	[-]	Faktor für Krümmungsverlauf in der Phase I
a _{pII}	[-]	Faktor für Krümmungsverlauf in der Phase II
A _{pl}	[mm ²]	plastische Querschnittsfläche
A _S	[-]	Faktor für exponentielle Approximation nach Swift/Krupkowski
A _V	[-]	Faktor für Spline-Funktion
b	[-]	Faktor für Krümmungsverlauf
b _{pI}	[-]	Faktor für Krümmungsverlauf in der Phase I
b _{pII}	[-]	Faktor für Krümmungsverlauf in der Phase II
b _B	[mm]	Breite der Blechquerschnittsfläche
b _R	[mm]	Breite der Rohrquerschnittsfläche
B(x _B , y _B)	[mm, mm]	Punkt B
BF	[-]	Biegefaktor
B _L	[-]	Faktor für lineare Approximation
bo	[mm]	Bogenlänge
B _S	[-]	Faktor für exponentielle Approximation nach Swift/Krupkowski
B _V	[-]	Faktor für Spline-Funktion
C(x _C , y _C)	[mm, mm]	Punkt C
C _L	[-]	Faktor für lineare Approximation
c _{pI}	[-]	Faktor für Krümmungsverlauf in der Phase I
c _{pII}	[-]	Faktor für Krümmungsverlauf in der Phase II
C _S	[-]	Faktor für exponentielle Approximation nach Swift/Krupkowski
C _V	[-]	Faktor für Spline-Funktion
D	[mm]	Durchmesser
D(x _D , y _D)	[mm, mm]	Punkt D
D _a	[mm]	Außendurchmesser des Rohrs
D _{BS}	[mm]	Rollendurchmesser Innenkontur der Biegeschablone

d_{PI}	[-]	Faktor für Krümmungsverlauf in der Phase I
d_{PII}	[-]	Faktor für Krümmungsverlauf in der Phase II
$D_{Rolle\ a}$	[mm]	Rollendurchmesser Außenkontur
$D_{Rolle\ i}$	[mm]	Rollendurchmesser Innenkontur
D_{SR}	[mm]	Rollendurchmesser Innenkontur der Stützrolle
D_{UR}	[mm]	Rollendurchmesser Innenkontur der Umformrolle
D_V	[-]	Faktor für Spline-Funktion
e	[-]	Eulersche Zahl
E	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul
$E(x_E, y_E)$	[mm, mm]	Punkt E
EBF	[-]	Faktor Einspannbedingung
F	[N]	Ersatzkraft, Querkraft
h	[mm]	Höhe des Profils
k, k_1, k_2	[1/mm]	Krümmung
k_f	[N/mm ²]	Fließspannung
k_{fel}	[N/mm ²]	Spannung im elastischen Bereich
k_{fN}	[N/mm ²]	Fließspannung nach Nadai
k_{fpl}	[N/mm ²]	Fließspannung im plastischen Bereich
k_{fS}	[N/mm ²]	Fließspannung nach Swift/Krupkowski
k_{Last}	[1/mm]	Krümmung unter Last
L	[mm]	Stablänge
l	[mm]	Länge
l_0	[mm]	Ausgangslänge
L_s	[mm]	Verfahrweg der Spannachse
$M(x_M, y_M)$	[mm, mm]	Mittelpunkt M des Kreises
M_B	[Nm]	Biegemoment
$M_{B\ el}$	[Nm]	elastisches Biegemoment
$M_{B\ el\ a}$	[Nm]	elastisches Biegemoment des Außenrohrs
$M_{B\ el\ i}$	[Nm]	elastisches Biegemoment des Innenrohrs
$M_{B\ Gesamt}$	[Nm]	Gesamtbiegemoment
$M_{B\ max}$	[Nm]	maximales Biegemoment
$M_{B\ pl}$	[Nm]	plastisches Biegemoment
M_R	[Nm]	Rückstellmoment
n	[-]	Verfestigungsexponent
PLF	[-]	Faktor plastifizierte Länge

$P_0(x_0, y_0)$	[mm, mm]	Ausgangspunkt der Umformrolle
$P_1(x_1, y_1)$	[mm, mm]	Position 1 Umformrolle
$P_2(x_2, y_2)$	[mm, mm]	Position 2 Umformrolle
$P_U(x_U, y_U)$	[mm, mm]	Ausgangsposition P_U
$P_V(x_V, y_V)$	[mm, mm]	Ausgangsposition P_V
R	[mm]	Radius
R_1, R_2	[mm]	Hilfsradien
R'	[mm]	Ersatzradius
r_a	[mm]	Außenradius des Rohrs
$R_{Entlast}$	[mm]	Radius nach Entlastung
R_{ES}	[mm]	ideeller Radius an der Einspannstelle
RF	[-]	Rückfederungsfaktor
r_i	[mm]	Innenradius des Rohrs
R_{Innen}	[mm]	Radius an der Innenseite des Profils
R_{Last}	[mm]	Radius unter Last
R_m	[N/mm ²]	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	[N/mm ²]	Streckgrenze (0,2%-Dehnung)
R_{Soll}	[mm]	Sollradius
R_{th}	[mm]	theoretischer Biegeradius
S	[mm]	Wanddicke beim Rohr oder Profil
s, s_0, s_1, s_2	[mm]	Vorschub
T	[s]	Zeitintervall
v_C	[m/s]	Schallgeschwindigkeit im Werkstoff
WF	[-]	Wanddickenfaktor
W_y	[mm ³]	Widerstandsmoment um die Biegeachse y
x	[mm]	Raumrichtung im kartesischen Koordinatensystem
x_l	[mm]	abgewickelte Länge des Profils
x_{RU}	[mm]	Abstand Rollenmittelpunkt zu P_U
x_{BN}	[mm]	Abstand Rollenmittelpunkt zu BN
x_{pl}	[mm]	Länge des Balkens, der einen plastifizierten Anteil enthält
x_{UR}	[mm]	x -Position des Umformrollenmittelpunktes
x_{Zu}	[mm]	Zustellung der Umformrolle in Raumrichtung x
y	[mm]	Raumrichtung im kartesischen Koordinatensystem
y_{RU}	[mm]	Abstand Rollenmittelpunkt zu P_U
y_{BN}	[mm]	Abstand Rollenmittelpunkt zu BN

y_e	[mm]	Übergang von elastischer zu plastischer Umformung
y_M	[mm]	Zustellung y_{Zu} im Modell 3
y_{UR}	[mm]	y-Position des Umformrollenmittelpunktes
y_V	[mm]	Zustellung y_{Zu} im Versuch
y_{Zu}	[mm]	Zustellung der Umformrolle in Raumrichtung y
z	[mm]	Raumrichtung im kartesischen Koordinatensystem
α (alpha)	[°]	Winkel
β (beta)	[°]	Winkel der Biegeachse
β_1, β_2	[°]	Hilfswinkel
ΔR_1	[mm]	Differenz zwischen den Radien R_{Last} und R_{Soll}
ΔR_2	[mm]	Differenz zwischen den Radien R_{Soll} und $R_{Entlast}(R_{Soll})$
ε	[-]	technische Dehnung
ε_d	[-]	Dehnung durch Druckbeanspruchung
ε_{el}	[-]	Dehnung bei der Streckgrenze $R_{p0,2}$
$\varepsilon_{Entlast}$	[-]	Dehnung nach Entlastung
ε_{Last}	[-]	Dehnung unter Last
$\varepsilon_{Rück}$	[-]	Rückdehnung
ε_z	[-]	Dehnung durch Zugbeanspruchung
π	[-]	Kreiszahl Pi
ρ	[g/cm ³]	Dichte
σ	[N/mm ²]	technische Spannung
σ_{ael}	[N/mm ²]	imaginäre elastische Randspannung im Außenbogen
σ_d	[N/mm ²]	Druckspannung
σ_f	[N/mm ²]	Spannung bei Fließbeginn
σ_p	[N/mm ²]	Spannung im plastischen Bereich
σ_z	[N/mm ²]	Zugspannung
φ (phi)	[-]	logarithmischer Umformgrad
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$	[-]	logarithmischer Umformgrad der Hauptumformrichtungen
φ_g	[-]	logarithmischer Umformgrad der Gleichmaßdehnung
φ_v	[-]	Vergleichsumformgrad

