

Methode zur adaptiven Rückfederungs- kompensation und -korrektur von Blechbiege- bauteilen in mehrstufigen Biegeprozessen

DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

M.Sc. Peter Kopfer

geb. am 6. August 1985 in Siegen

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität Siegen
Siegen 2016

Gutachter:

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

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Scharf

Tag der mündlichen Prüfung: 20.04.2016

Forschungsberichte des Lehrstuhls für Umformtechnik

Band 7

Peter Kopfer

**Methode zur adaptiven Rückfederungskompensation
und -korrektur von Blechbiegebauteilen
in mehrstufigen Biegeprozessen**

Shaker Verlag
Aachen 2016

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., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4588-8

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

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Umformtechnik (UTS) der Universität Siegen.

Professor Dr.-Ing. Bernd Engel gilt mein besonderer Dank für die Betreuung der Arbeit, die konstruktive Unterstützung, die Möglichkeit zur experimentellen Umsetzung meiner Ideen sowie die Erstellung des Erstgutachtens. Ausdrücklich bedanken möchte ich mich auch für die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre und die eingeräumten wissenschaftlichen Freiräume.

Professor Dr.-Ing. Peter Scharf danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit, die Übernahme des Zweitgutachtens sowie die vielen hilfreichen Anregungen und Hinweise.

Für die gute Zusammenarbeit bedanke ich mich bei den Mitarbeitern, Kollegen und Studenten des Lehrstuhls sowie den Mitgliedern anderer Lehrstühle und Institute, die mich bei der Arbeit mit hilfreichen fachlichen Diskussionen und Anregungen unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt an dieser Stelle Dr. Sebastian Kersten.

Ich danke auch meiner Familie, speziell meinen Eltern, die mich nicht nur auf meinem Ausbildungsweg stets unterstützt und gefördert haben und so maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Schließlich möchte ich bei meiner Verlobten Raffaella bedanken für ihr großes Verständnis bei der Entstehung dieser Arbeit.

Dillenburg, den 20.04.2016

Peter Kopfer

Kurzzusammenfassung

In Zukunft ist aufgrund der erwarteten Individualisierung der Produkte mit einer zunehmenden Variantenvielfalt sowie einer damit einhergehenden Abnahme der Losgrößen bei Fertigungsprozessen zu rechnen. Daneben gewinnt auch die Ressourceneffizienz der Produkte und Prozesse zunehmend an Bedeutung. Weiterhin wird anderen Prozessen und Systemen sowie Kunden und Geschäftspartnern in einer mehr und mehr vernetzten Welt zunehmend die Möglichkeit gegeben werden, unmittelbar auf Fertigungsabläufe Einfluss zu nehmen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, bedarf es u. a. flexibler und dennoch robuster Fertigungssysteme und -prozesse. Nach einhelliger Meinung müssen dafür adaptive bzw. lernende Systeme zum Einsatz kommen, welche eine schnelle und möglichst selbstständige Anpassung der Prozessparameter ermöglichen. Um eine Variantenfertigung mit geringen Rüstzeiten durchführen zu können, sollte dafür aber nicht nur die Regelung des Prozesses adaptiv sein, sondern auch das Werkzeug bzw. der Umformprozess selbst.

In dieser Arbeit wird eine Kompensations- und Korrekturmethode eines adaptiven Blechbiegeprozesses im Folgeverbund vorgestellt, welche sowohl eine Kompensation der Rückfederung als auch eine Korrektur der Biegewinkel bei ununterbrochener Hubfolge (Dauerhub) ermöglicht. Biegen zählt in der industriellen Blechverarbeitung zu den meist angewendeten Verfahren. Es ist im Vergleich zu anderen Umformverfahren durch eine besonders ausgeprägte elastische Rückfederung gekennzeichnet. Die Umsetzung der Kompensations- und Korrekturmethode erfolgt für ein mehrstufiges Stanz-Biegewerkzeug im Folgeverbund. Dieses Demonstrationswerkzeug verfügt über eine unabhängig von der Pressenbewegung steuerbare Biegeachse und über integrierte Wegaufnehmer zur prozessbegleitenden Messung der Biege- und Rückfederungswinkel. Das Werkzeug wird durch die adaptive Prozessmethode in die Lage versetzt, sich innerhalb weniger Teile selbstständig auf ein neues Blech bzw. schwankende Blecheigenschaften einzustellen und im weiteren Prozessablauf stetig prozessgesteuert anzupassen. Darüber hinaus erlaubt die im Werkzeug integrierte Biegeachse eine Korrektur im Dauerhub. Über eine Kopplung des Werkzeugs mit der Steuerung der zum Einsatz kommenden Servopresse kann diese zudem gestoppt werden, um weitere Korrekturen oder die Behebung einer eventuellen Störung zu ermöglichen. Auf diese Weise soll der Prozess das Umformsystem steuern und nicht, wie sonst üblich, umgekehrt. Außerdem kann so eine Vermeidung und nicht nur eine Verringerung von Ausschuss realisiert werden.

Abstract

In the future, the expected increase of individualised products will cause manufacturing processes to deal with a growing rate of variant diversity and thus a decreasing size of production runs. Beyond that, the resource efficiency of products and processes will become increasingly important. Furthermore, in a networking world, other processes and systems as well as customers and associated partners will be more and more enabled to exert immediate influence on the manufacturing process. To meet these requirements, flexible and yet robust manufacturing processes and systems have to be applied. Therefore, adaptive or learning systems are needed, which allow a fast and autonomous adjustment of the process parameters. To perform a manufacturing process with a high rate of variant diversity and little tooling time, not only the closed-loop control of the process should be adaptive but also the tool and the process itself.

In this work, a compensation and correction method of an adaptive bending process is presented, which offers a compensation of the elastic springback and as well as a correction of inaccurate bending angles. Bending is one of the most commonly used manufacturing processes in industrial sheet metal forming. In comparison to other forming processes, the elastic springback has a relatively big influence on the forming result. The implementation of the compensation and correction method is carried out for a sample, four-tiered cutting and forming process on a progressive tool. This demonstration tool features an additional independently controllable servo axis, which is used to compensate and, if necessary, correct the pre-bent sheet part. Furthermore, position encoders are integrated into the tool, in order to measure the bending and springback angles on-line. By means of the adaptive method, the tool is enabled to adjust to a new material or geometry within a small number of parts. Besides that, it is possible to react on changing influence parameters throughout the process. Moreover, the independently controllable bending axis allows a correction while running a continuous press stroke. By connecting the control of the tool with the control of the servo press, the latter can be stopped to ensure another correction or the repair of the tool. Thus, the process controls the forming system, not vice versa, as is the rule. Plus, rejected parts can be avoided and not only reduced.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Stand der Forschung	3
2.1	Geschichte und Grundlagen des Biegeumformens von Blechen.....	3
2.1.1	Geschichte der Biegetheorie	3
2.1.2	Dehnungen, Spannungen und Rückfederung beim einfachen Biegen von Blechen.....	7
2.1.3	Mehrfache Biegung von Blechen	10
2.1.4	Einflussparameter beim Biegen von Blechen.....	13
2.2	Ausgewählte Blechbiegeverfahren	16
2.2.1	Freies Biegen	16
2.2.2	Gesenkbiegen.....	17
2.2.3	Biegerichten.....	18
2.3	Adaptive Fertigungssysteme.....	19
2.3.1	Grundlagen adaptiver Systeme	19
2.3.2	Ausgewählte Beispiele adaptiver Biegeprozesse.....	22
2.4	Zusammenfassung und Bewertung des Stands der Forschung.....	28
3	Motivation, Zielsetzung und Vorgehensweise	31
3.1	Motivation.....	31
3.2	Zielsetzung.....	33
3.3	Vorgehensweise.....	34
4	Versuchseinrichtungen und –halbzeuge	37
4.1	Versuchsanlagen	37
4.1.1	Material-Prüfmaschine	37
4.1.2	Servo-elektrische Exzenterpresse	38
4.2	Demonstrationsprozess und -werkzeug	39
4.2.1	Demonstrationsprozess	39
4.2.2	Demonstrationswerkzeug	39

4.3	Versuchshalbzeuge	43
4.3.1	Geometrie und Werkstoffe	43
4.3.2	Ergebnisse der Zugversuche	45
4.3.3	Ergebnisse der Schichtstauchversuche	46
4.3.4	Eingangsdaten für die Finite-Elemente-Simulation.....	47
4.4	Modellaufbau der Finite-Elemente-Simulation	49
5	Steuerungs- und Regelungsplan des Folgeverbundprozesses.....	51
6	Sensitivitätsanalyse des mehrfachen Blechbiegens im gegebenen Folgeverbundprozess	55
6.1	Winkelbezeichnungen.....	56
6.2	Versuchsreihen.....	57
6.2.1	Versuchsreihen für die numerischen Untersuchungen	59
6.2.2	Versuchsreihen für die realen Untersuchungen	65
6.3	Darstellung und Bewertung der Ergebnisse der numerischen Versuche.....	67
6.3.1	Versuchsreihe N1: Einfluss der Werkstückeigenschaften	67
6.3.2	Versuchsreihe N2: Einfluss der Werkzeugtoleranz; Horizontale Positionierung des Blechabschnitts.....	73
6.3.3	Versuchsreihe N3: Einfluss der Prozessparameter; Zustellungsänderungen beim mehrfachen Biegen unter Berücksichtigung der Biegerichtung.....	75
6.3.4	Versuchsreihe N4: Einfluss der Fließkurvenapproximation.....	80
6.4	Darstellung und Bewertung der Ergebnisse der Realversuche	83
6.4.1	Versuchsreihe R1: Messsystemanalyse	83
6.4.2	Versuchsreihe R2: Einfluss der Prozessschwankungen und Korrelation zwischen Vor- und Kompensationsbiegen	83
6.4.3	Versuchsreihe R3: Einfluss der Zustellung und der Biegerichtung beim wiederholten Biegen	87
6.5	Schlussfolgerungen für die Entwicklung der Kompensations- und Korrekturmethode	93

7	Kompensations- und Korrekturmethode für den Biegeprozess.....	95
7.1	Kompensationsmethode.....	97
7.1.1	Berechnung des Lastwinkels für die Kompensationsmethode.....	99
7.1.2	Berechnung der Werkzeugzustellung für die Kompensationsmethode.....	104
7.2	Korrekturmethode.....	107
7.2.1	Berechnung des Lastwinkels für die Korrekturmethode.....	109
7.2.2	Berechnung der Werkzeugzustellung für die Korrekturmethode.....	112
8	Validierung.....	115
8.1	Virtuelle Prozesssimulation.....	115
8.1.1	Benutzerschnittstelle.....	115
8.1.2	Berechnungsgrundlagen.....	119
8.2	Validierung anhand numerischer Versuche.....	123
8.2.1	Inputdaten für die numerischen Versuche.....	123
8.2.2	Szenarien für die numerischen Versuche.....	127
8.2.3	Ergebnisse der numerischen Versuche.....	128
8.2.4	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse aus den numerischen Versuchen.....	138
8.3	Validierung anhand realer Versuche.....	140
8.3.1	Versuchsreihen der realen Versuche.....	140
8.3.2	Ergebnisse der realen Versuche.....	141
8.3.3	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse aus den realen Versuchen.....	145
9	Zusammenfassung.....	147
10	Literaturverzeichnis.....	149
11	Anhang.....	157

Nomenklatur

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

Schreibweisen

CARL MUSTERMANN GMBH

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

Namen

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

LUDWIK (1903); SPUR et al. (1985)

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 oder 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>
α	[°]	Biegewinkel (allgemein)
α_A	[°]	Anpassungswinkel
α_E	[°]	Tatsächlicher Biegewinkel nach Entlastung

<u>Zeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bezeichnung</u>
α_{KP}	[°]	Kompensationswinkel
α_L	[°]	Tatsächlicher Lastwinkel
α_{LS}	[°]	Soll-Lastwinkel
α_{LX}	[°]	Zu erwartender Lastwinkel
α_R	[°]	Tatsächlicher Rückfederungswinkel
α_{RX}	[°]	Zu erwartender Rückfederungswinkel
α_Z	[°]	Zielwinkel
$\Delta\alpha$	[°]	Winkelabweichung
$\Delta\alpha_L$		Lastwinkelabweichung
$\Delta\alpha_R$	[°]	Rückfederungswinkelabweichung
$\bar{\alpha}_{med}$	[°]	Median der betrachteten Winkel
$\bar{\alpha}_{arithm}$	[°]	Arithmetischer Mittelwert der betrachteten Winkel
$\bar{\alpha}_{AEV}$	[°]	Mittelwert der Allgemeinen Extremwertverteilung der betrachteten Winkel
γ	[mm]	Zustellungs­differenz bei der iterativen Ermittlung der Zustellung für die Korrektur durch Zurückbiegen
δ	[°]	Halbe Breite des Toleranzbereichs um den Zielwinkel α_Z
ε	[-]	Dehnung / Stauchung
ε_R	[-]	Elastische Rückdehnung
η	[-]	Gutteilquote nach Kompensation (allgemein)
η_{ges}	[-]	Gesamtgutteilquote nach Kompensation
η_j	[-]	Gutteilquote nach Kompensation für Validierungsdurchlauf j
μ	[-]	Reibungskoeffizient
ν	[-]	Quer­kon­trak­tions­zahl
ρ	[kg/dm ³]	Dichte
σ	[MPa]	Spannung

<u>Zeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bezeichnung</u>
σ_F	[MPa]	Fließgrenze
σ_R	[MPa]	Randspannung des rein elastischen Rückfederungsmoments
σ_X	[MPa]	Endwert der Fließspannung
φ	[-]	Umformgrad
$\dot{\varphi}$	[-/s]	Umformgeschwindigkeit
A	[mm ²]	Biegequerschnitt
A_g	[-]	Gleichmaßdehnung
A_S	[MPa]	Konstante der Fließkurvenapproximation nach SWIFT (1952)
B_S	[-]	Konstante der Fließkurvenapproximation nach SWIFT (1952)
C_p	[-]	Prozessfähigkeitsindex
C_{pK}	[-]	Prozessfähigkeitsindex unter Berücksichtigung der Lage des Mittelwerts zur Toleranzmitte
C_S	[-]	Konstante der Fließkurvenapproximation nach SWIFT (1952)
d	[-]	Differential-Operator
e	[-]	Eulersche Zahl
e_{abs}	[-]	Absolute Genauigkeit, maximale Abweichung
E	[MPa]	Elastizitätsmodul
EV	[°]	Erwartungswert für Winkel (allgemein)
EV_L	[°]	Erwartungswert für Lastwinkel
EV_R	[°]	Erwartungswert für Rückfederungswinkel
f	[-]	Korrekturfaktor
F	[N]	Kraft
F_N	[N]	Nennkraft
i	[-]	(Index für) Blechabschnittnummer
k	[°]	Schiefe der Verteilung für Winkel (allgemein)
k_L	[°]	Schiefe der Verteilung für Lastwinkel

<u>Zeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bezeichnung</u>
k_R	[°]	Schiefe der Verteilung für Rückfederungswinkel
k_0	[°]	Koeffizient für Ausgleichsgerade der Rückfederungswinkel bei der Korrektur durch Zurückbiegen (konstantes Glied)
k_1	[-]	Koeffizient für Ausgleichsgerade der Rückfederungswinkel bei der Korrektur durch Zurückbiegen (lineares Glied)
k_f	[MPa]	Fließspannung
l_0	[mm]	Ausgangslänge der Faser
l_1	[mm]	Endlänge der Faser
M_B	[Nm]	Biegemoment
M_R	[Nm]	Elastisches Rückfederungsmoment
n	[-]	Anzahl der in Kompensationsberechnung einbezogenen Blechabschnitte
n_D	[-]	Anzahl der Durchläufe pro Methodenvariante und Wert von n
n_V	[-]	Verfestigungsexponent
p_0	[]	Koeffizient für Ausgleichsgerade der Zustellung-Lastwinkel-Relation (konstantes Glied)
p_1	[-]	Koeffizient für Ausgleichsgerade der Zustellung-Lastwinkel-Relation (lineares Glied)
P	[-]	Messpunkt
r	[mm]	Biegeradius
R^2	[-]	Bestimmtheitsmaß
R_m	[MPa]	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	[MPa]	Spannung bei 0,2% Dehnung
s	[mm]	Blechdicke
SD	[°]	Standardabweichung (allgemein)
SD_L	[°]	Standardabweichung Lastwinkel
SD_R	[°]	Standardabweichung für Rückfederungswinkel

<u>Zeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bezeichnung</u>
v	[mm]	Verschiebung des Blechabschnitts in der Nachbiegestation
W_y	[mm ³]	Axiales Widerstandsmoment
x	[-]	Anzahl der Gutteile
x_w	[-]	x-Achse des kartesischen Werkzeugkoordinatensystems
X	[-]	Index für Biegewinkeltyp
y	[mm]	Abstand zur neutralen Faser
y_w	[-]	y-Achse des kartesischen Werkzeugkoordinatensystems
Δy_w	[mm]	Relativer Weg auf y_w
z	[mm]	Zustellung (allgemein)
z_D	[mm]	Zustellungsänderung aufgrund von Unterschieden zwischen z_S und z_I
z_I	[mm]	Ist-Zustellung
z_S	[mm]	Soll-Zustellung
z_w	[-]	z-Achse des kartesischen Werkzeugkoordinatensystems
Δz_w	[mm]	Relativer Weg auf z_w
Δz	[mm]	Zustellungsänderung
Δz_S	[mm]	Änderung der Soll-Zustellung

Abkürzungen

AEV	Allgemeine Extremwertverteilung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BITKOM	Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V.
EVA	Eingabe – Verarbeitung – Ausgabe
FE	Finite-Elemente
H1	Halbzeug 1
H2	Halbzeug 2
H3	Halbzeug 3
IBU	Industrieverband für Blechumformung e. V.
KB	Kompensationsbiegen
KdÜ	Korrektur durch Überbiegen
KdZ	Korrektur durch Zurückbiegen
MV1	Methodenvariante 1
MV2	Methodenvariante 2
N1	Numerische Versuchsreihe 1 (Sensitivitätsanalyse)
N2	Numerische Versuchsreihe 2 (Sensitivitätsanalyse)
N3	Numerische Versuchsreihe 3 (Sensitivitätsanalyse)
OT	Oberer Totpunkt
R1	Reale Versuchsreihe 1 (Sensitivitätsanalyse)
R2	Reale Versuchsreihe 2 (Sensitivitätsanalyse)
UT	Unterer Totpunkt
V1	Verteilungsvariante 1
V2	Verteilungsvariante 2
VB	Vorbiegen
WDF	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion