

LARS THYSSEN

**KOMPENSATION VON ERWÄRMUNGS-
BEDINGTEN BAUTEILABWEICHUNGEN
IN DER LOKAL ERWÄRMTEEN,
ROBOTERBASIERTEEN
INKREMENTELLEN BLECHUMFORMUNG**



Kompensation von erwärmungsbedingten Bauteilabweichungen in der lokal erwärmten, roboterbasierten inkrementellen Blechumformung

Dissertation

zur

Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

der

Fakultät für Maschinenbau
der Ruhr-Universität Bochum

von

Lars Thyssen
aus Recklinghausen

Bochum 2020

Dissertation eingereicht am: 21.04.2020

Tag der mündlichen Prüfung: 28.05.2020

Erster Referent: Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter

Zweiter Referent: Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme

Band 3/2020

Lars Thyssen

**Kompensation von erwärmungsbedingten
Bauteilabweichungen in der lokal erwärmten,
roboterbasierten inkrementellen Blechumformung**

Shaker Verlag
Düren 2020

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.: Bochum, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7594-6

ISSN 1430-7324

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

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

„Gewisse Bücher scheinen geschrieben zu sein, nicht damit man daraus lerne, sondern damit man wisse, dass der Verfasser etwas gewusst hat.“

Johann Wolfgang von Goethe

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktionssysteme (LPS) der Ruhr-Universität Bochum. Sie enthält die Forschungsergebnisse aus dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Forschungsprojekt KU1543/16-1 „Roboterbasierte inkrementelle Blechumformung – Kompensation von Störgrößen bedingt durch die lokale Erwärmung und der Ungenauigkeit der Umformeinrichtung“.

Auf dem Weg von der Themenfindung bis hin zur Finalisierung dieser Arbeit haben mich viele Menschen begleitet und unterstützt, denen ich – leider nur auszugsweise – auf diesem Wege danken möchte.

Zunächst gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter für die gute Zusammenarbeit am Lehrstuhl, die Ermöglichung dieser Arbeit und die Übernahme des Erstreferats sowie Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferats.

Für die schöne Zeit am Lehrstuhl, welche vor allem durch die kollegiale und humorvolle Zusammenarbeit der Kolleginnen und Kollegen untereinander geprägt war, danke ich dem gesamten Team und besonders der „Mutter“ des Lehrstuhls Frau Vogt. Aus dem Team möchte ich ebenso Simon Husmann, Maïke Klöckner sowie Dennis Möllensiep für ihre nicht selbstverständliche Unterstützung in vielerlei Hinsicht hervorheben. Denis Störkle möchte ich an dieser Stelle gesondert für die Zusammenarbeit, die vielen Denkanstöße, den Programmierungshilfen und der halbstündigen Mittagsruhe im Büro danken. Auch meinen studentischen Hilfskräften Philipp Kulessa und Benedikt Ibing sowie den technischen Mitarbeitern aus den Werkstätten danke ich für ihren großen Einsatz und den vielen Stunden an der Versuchsanlage. Stefan Kesting danke ich für seine Überwindung und die wertvollen Korrekturhinweise.

Ganz besonderer Dank gebührt meinen Eltern, die mich immer bedingungslos unterstützen und ohne deren Förderung diese Arbeit überhaupt nicht möglich gewesen wäre. Mein größter Dank gilt meiner Frau Elli und unseren Jungs Emil und Ole für die unendliche Geduld, die tagtägliche Rückendeckung, das Aushalten meiner Launen sowie die stetige Erinnerung an die wirklich wichtigen Dinge im Leben.

Datteln, im August 2020

Vorveröffentlichungsverzeichnis

- [1] Möllensiep, D.; Kulesa, P.; Thyssen, L.; Kuhlenkötter, B. (2020): Regression-based compensation of part inaccuracies in incremental sheet forming at elevated temperatures. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology 109, S. 1917-1928.
- [2] Thyssen, L.; Magnus S. M.; Störkle, D. D.; Kuhlenkötter, B. (2017): Compensating geometric inaccuracies in incremental sheet forming at elevated temperatures. In: International Conference on the Technology of Plasticity, ICTP 2017. Cambridge, United Kingdom, 17-22 September 2017 (Procedia Engineering 207), S. 860-865.
- [3] Thyssen, L.; Störkle, D. D.; Kuhlenkötter, B. (2017): A Compensation Strategy For Geometric Inaccuracies Of Hot Incrementally Formed Parts. In: Proceedings of the 20th International ESAFORM Conference on Material Forming. Dublin, Ireland, 26-28 April 2017 (AIP Conference Proceedings), S. 80020.
- [4] Min, J.; Seim, P.; Störkle, D. D.; Thyssen, L.; Kuhlenkötter, B. (2017): Electrically-Assisted Incremental Sheet Forming of Advanced High Strength Steels. In: International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing, SMPM 2017. Kruger National Park, South Africa, 23-25 Januar 2017 (Procedia Manufacturing 7), S. 22-26.
- [5] Min, J.; Seim, P.; Störkle, D. D.; Thyssen, L.; Kuhlenkötter, B. (2016): Thermal modeling in electricity assisted incremental sheet forming. In: International Journal of Material Forming Volume 10, S. 729-739.

Kurzfassung

Eine zunehmende Bauteilkomplexität bei abnehmender Losgröße und kürzeren Produktentwicklungszeiten stehen im Gegensatz zur Wirtschaftlichkeit der aktuell vorhandenen Fertigungsprozesse und wecken den Ruf nach neuen, flexiblen Technologien und Verfahren. Das am Lehrstuhl für Produktionssysteme entwickelte roboterbasierte, inkrementelle Blechumformverfahren (Roboforming) begegnet diesem Trend und stellt ein flexibles, werkstückunabhängiges Verfahren für die Herstellung von Blechbauteilen in kleinen Stückzahlen dar. Durch die Verwendung zweier werkstückunabhängiger Werkzeuge lässt sich eine Umformung mit lokaler Unterstützung ermöglichen, wodurch eine höhere Komplexität sowie größere geometrische Genauigkeiten der umgeformten Bauteile erzielt werden können. Eine weitere Optimierung des Umformverfahrens stellt die lokale Erwärmung der Umformzone dar. Durch die Umformung bei erhöhter Temperatur wird das umformbare Materialspektrum erweitert und die Umformeigenschaften verbessert. Im Gegensatz zu den genannten Vorteilen kommt es bei der Umformung bei erhöhter Temperatur zu einer verringerten geometrischen Genauigkeit. In der vorliegenden Arbeit wurde daher eine experimentelle Untersuchung der erwärmungsbedingten Abweichungen durchgeführt, mit dem Ziel eine Kompensationsstrategie zu entwickeln, welche die erwartete Geometrieabweichung eines Bahnpunktes berechnet und ihr entgegenwirkt.

Daher wurde zunächst auf Basis einer Prozessfähigkeitsuntersuchung die Qualität und Reproduzierbarkeit eines einzelnen Versuchs untersucht. Im Anschluss wurde auf Basis einer statistischen Versuchsplanung eine experimentelle Untersuchung durchgeführt, um die unterschiedlichen Gewichtungen der einzelnen Einflussfaktoren und deren Wechselwirkungen zu identifizieren. Die resultierenden geometrischen Abweichungen der Versuche sowie die entsprechenden Geometrie- und Versuchsparameter dienten als Basis für die Aufstellung des Kompensationsmodells. Aufgrund der zahlreichen zu berücksichtigenden Parameter sowie der komplexen Wechselwirkungen jener untereinander wurde als Basis der Modellbildung eine Regressionsanalyse genutzt. Das Kompensationsmodell wurde in die Roboforming-Prozesskette integriert und erfolgreich umgesetzt. Die Validierungsversuche haben den positiven Einfluss des entwickelten Kompensationsansatzes bewiesen. Es konnte sowohl die Berücksichtigung der Einflüsse der einzelnen Geometrie- und Versuchsparameter sowie deren Wechselwirkungen untereinander als auch die Geometrieunabhängigkeit des entwickelten Kompensationsansatzes erfolgreich bestätigt werden.

Schlagwörter: Inkrementelle Blechumformung, Roboforming, geometrische Genauigkeitssteigerung

Abstract

An increasing part complexity but decreasing batch sizes and shorter product development cycles are not in agreement with the profitability of the currently existing manufacturing processes and arouses the call for new, flexible technologies and processes. The robot-based incremental sheet metal forming process ('Roboforming'), which was developed at the Chair of Production Systems, addresses this trend and represents a flexible, workpiece-independent process for the production of sheet metal parts in small batch sizes. By means of two workpiece-independent tools, it is possible to achieve forming with local support, which results in enhanced complexity and geometrical accuracy. Another way to optimize the forming process is to locally heat the forming zone. Forming at elevated temperatures expands the formable material spectrum and improves the forming properties; however, it reduces the geometric accuracy. This fact has given rise to the present work's motivation to experimentally investigate the geometric inaccuracies caused by local heating. The aim of this work is to develop a compensation strategy which calculates and counteracts the expected geometrical deviation for each point of the tool path.

As a first step, this work has applied a process capability investigation in order to examine the quality and reproducibility of a single experiment. Subsequently, it has used an experimental investigation on the basis of a statistical design of experiments to identify the different weightings of the individual influencing factors and their interactions. The resulting geometrical deviations of the experiments as well as the corresponding geometry and test parameters have served as a reliable basis for the preparation of the compensation model. A regression analysis has been chosen as the basis for the modeling process in view of the numerous parameters to be considered as well as the complex interactions between them. It has been possible to integrate our compensation model into the Roboforming process chain and to successfully put it into practice. The validation has proven the positive influence of our developed compensation approach. In consideration of the influences of the individual geometry and test parameters as well as their interactions with each other, our developed compensation approach has proven to be independent of the geometric accuracy.

Keywords: incremental sheet forming, Roboforming, increasing geometric accuracy

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	iii
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	2
2 Stand der Wissenschaft und Technik.....	5
2.1 Inkrementelle Blechumformung asymmetrischer Bauteile (AISF)	5
2.1.1 Verfahrensprinzip und Verfahrensvarianten des AISF	6
2.1.2 Roboforming	8
2.1.3 Eigenschaften und Verfahrensgrenzen des AISF.....	9
2.1.4 Bestehende Strategien zur Grenzerweiterung	15
2.2 Inkrementelle Blechumformung bei erhöhter Temperatur.....	22
2.2.1 Einführung in die Umformung bei erhöhter Temperatur.....	22
2.2.2 Verfahrensvarianten	24
2.2.3 Joulesche Widerstandserwärmung.....	29
2.2.4 Eigenschaften des AISF bei erhöhter Temperatur	34
2.3 Zusammenfassung Stand der Wissenschaft und Technik	40
3 Handlungsbedarf und Konkretisierung der Zielstellung	42
4 Versuchsaufbau	45
4.1 Roboforming-Zelle.....	45
4.2 Messsysteme	47
4.2.1 Optisches Koordinatenmessgerät.....	48
4.2.2 Kraft-Momenten-Sensor	49
4.2.3 Infrarotkamera.....	50
4.2.4 3D-Digitalisiersystem	51
4.3 Erwärmungseinheit	52
4.3.1 Umformwerkzeuge	52
4.3.2 Stromquelle	54
4.3.3 Temperaturmessung und -regelung.....	55
5 Experimentelle Untersuchung der Einflussfaktoren	60
5.1 Prozessstabilität / Prozessfähigkeitsuntersuchung	60
5.2 Versuchsplan	70
5.3 Referenzgeometrien	78

5.4 Versuchsdurchführung	79
5.5 Zusammenfassung.....	81
6 Kompensationsmodell.....	83
6.1 Datenaufbereitung	83
6.2 Regressionsanalyse	89
6.2.1 Einführung	90
6.2.2 Regressionsfunktion.....	99
6.3 Aufstellung des Kompensationsmodells	102
6.4 Zusammenfassung.....	105
7 Experimentelle Validierung und Bewertung.....	107
7.1 Validierung an Referenzgeometrien.....	107
7.2 Validierung an einer unabhängigen Geometrie.....	113
7.2.1 Geometrie.....	114
7.2.2 Versuchsergebnisse.....	115
7.3 Zusammenfassung und Diskussion der Versuchsergebnisse	116
8 Zusammenfassung und Ausblick	120
8.1 Zusammenfassung.....	120
8.2 Ausblick und zukünftige Potentiale	123
Anhang.....	125
A.1 Abbildungen	125
A.2 Tabellen	127
Literaturverzeichnis	128
Abbildungsverzeichnis	141
Tabellenverzeichnis	144

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

A	[mm ²]	Fläche
a_d	[mm]	mittlere lineare Ausdehnung der a-spots
A_k	[-]	disjunkte Gebiete
A_W	[mm ²]	wirksame Kontaktfläche
t_0	[mm]	initiale Blechdicke
t_1	[mm]	Blechdicke nach der Umformung
c_p	$\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$	spezifische Wärmekapazität
C_p	[-]	Prozessfähigkeitsindex
C_{pk}	[-]	kleinster Prozessfähigkeitsindex
C_{pKL}	[-]	unterer Prozessfähigkeitsindex
C_{pKU}	[-]	oberer Prozessfähigkeitsindex
cov	[-]	Kovarianzfunktion
D	[-]	Menge von Trainingsdaten
e	[-]	Störgröße
f^*	[-]	vorhergesagte Ausgangsgröße des Gaußprozesses
\bar{f}^*	[-]	Mittelwert der vorhergesagten Ausgangsgröße des Gaußprozesses
F	[N]	Kraft
GP	[-]	Gaußprozess
h_R	[mm]	Rillenhöhe
I	[A]	Stromstärke
k	[-]	Faktoren

$k(x, x')$	[-]	Kovarianzfunktion
K	[-]	Kovarianzmatrix
K	[-]	Krümmungswert
k_f	$\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	Fließspannung
l	[mm]	Länge
l_{skal}	[-]	charakteristische Längenskala
l_k	[mm]	Korrekturlänge
l_A	[mm]	Abweichungslänge
m	[-]	Faktorstufenkombination
$m(x)$	[-]	Erwartungswertfunktion
M	[Nm]	Moment
n	[-]	Stichprobenumfang
\vec{n}	[-]	Oberflächennormalen
N	[-]	Versuchsumfang
N_W	[-]	Anzahl der Einzelversuche
n_0	[-]	Anzahl der Realisierungen des Zentrums
P	[W]	elektrische Leistung
P_K	[-]	Konturpunkt
P_W	[-]	Wirkpunkt
Pos	[-]	x-, y-, z-Koordinate
Q_w	[J]	Wärmemenge
r	[mm]	Werkzeugradius
r_{UW}	[mm]	Umformwerkzeugradius
R	[Ω]	elektrischer Widerstand
R^2	[-]	Bestimmtheitsmaß
R_E	[Ω]	Engewiderstand
R_f	[Ω]	Filmwiderstand

R_K	[Ω]	Kontaktwiderstand
t_f	[mm]	Dicke einer Fremdschicht
S_L	[-]	untere Spezifikationsgrenze
S_U	[-]	obere Spezifikationsgrenze
T	[-]	Teilmenge
T_{Ring}	[$^{\circ}\text{C}$]	Ringtemperatur
T_U	[$^{\circ}\text{C}$]	Umgebungstemperatur
U	[V]	elektrische Spannung
$\overrightarrow{v_{KOR}}$	[-]	Korrekturvektorrichtung
x	[-]	unabhängige Variable
X	[-]	$D \times n$ -Matrix der Trainingsdaten
X^*	[-]	Matrix der zukünftigen Eingangsgrößen
$X_{0,135\%}$	[-]	0,135-%-Verteilungsquantil
$X_{99,865\%}$	[-]	99,865-%-Verteilungsquantil
$X_{50\%}$	[-]	50-%-Verteilungsquantil
X_{mid}	[-]	Mittelpunkt der Verteilung
y	[-]	abhängige Variable
\hat{y}	[-]	vorhergesagte abhängige Variable
y_k	[-]	Gewichtsfaktor
z_t	[mm]	Zustelltiefe
$\overrightarrow{z_n}$	[-]	Einheitsvektor

Griechische Buchstaben

α	[$^{\circ}$]	Flankenwinkel
α_i	[-]	Lagrange-Multiplikator
α_i^*	[-]	Lagrange-Multiplikator
α_{Korr}	[-]	Korrelationsfaktor zwischen Punkten

α_R	$\left[\frac{1}{K}\right]$	Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstands
α_W	$\left[\frac{1}{K}\right]$	Wärmeausdehnungskoeffizient
β_0	[-]	Achsenabschnitt
β_1	[-]	Steigung
β_R	$\left[\frac{1}{K^2}\right]$	Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstands
γ	[°]	Nacheilwinkel
ε	[-]	Emissionsgrad
ϑ	[K]	Umformtemperatur
ϑ_R	[K]	Rekristallisationstemperatur
ϑ_S	[K]	Schmelztemperatur
λ	$\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$	Wärmeleitfähigkeit
ξ	[-]	Schlupfvariable
ρ	$[\Omega \cdot m]$	spezifischer elektrischer Widerstand
ρ_B	$[\Omega \cdot m]$	spezifischer elektrischer Widerstand eines Blechs
ρ_D	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Dichte
ρ_f	$[\Omega \cdot m]$	spezifischer elektrischer Widerstand einer Fremdschicht
ρ_S	$[\Omega \cdot m]$	spezifischer elektrischer Widerstand eines Schmierfilms
ρ_ϑ	$[\Omega \cdot m]$	temperaturbedingter Anteil des spezifischen elektrischen Widerstands
Δ	[-]	Prozessstrebene
$\Delta\mu$	[-]	technologisch relevante Effekt
Δ_L	[-]	Differenz zwischen X_{mid} und $X_{0,135\%}$ von der Verteilung der Produktmerkmale
Δ_U	[-]	Differenz zwischen $X_{99,865\%}$ und X_{mid} von der Verteilung der Produktmerkmale
σ	[-]	Standardabweichung
σ_f	[-]	Varianz der Funktion

σ_m	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	hydrostatische Spannung als arithmetisches Mittel der Hauptspannungen
σ_v	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	Vergleichsspannung
τ	[-]	Transmissionsgrad
φ	[-]	Umformgrad
$\dot{\varphi}$	$\left[\frac{m}{s} \right]$	Umformgeschwindigkeit
N	[-]	Dimension des Merkmalsraums

Indizes

0	[-]	Anfangswert
1, 2, 3	[-]	Zustände
<i>max</i>	[-]	maximale Größe zu Wert
UW	[-]	Umformwerkzeug
<i>x, y, z</i>	[-]	Koordinatenrichtung

Abkürzungen

Abw	[-]	Abweichung
AISF	[-]	Asymmetric Incremental Sheet Metal Forming
CCD	[-]	Charge-coupled device
DPIF	[-]	Duplex Incremental Forming
DPIF-L	[-]	Duplex Incremental Forming mit lokaler Unterstützung
DPIF-P	[-]	Duplex Incremental Forming mit peripherer Unterstützung
EVZ	[-]	Ebener Verformungszustand
FEM	[-]	Finite-Elemente-Methode
FPA	[-]	Focal Plane Array
FW	[-]	Flankenwinkel
GBZ	[-]	Gleichmäßiger biaxialer Zug
GGH	[-]	Gegenhalter

IBU	[-]	Inkrementelle Blechumformung
KMS	[-]	Kraft-Momenten-Sensor
KOS	[-]	Koordinatensystem
KRC	[-]	KUKA Robot Control
KRL	[-]	KUKA Robot Language
LPS	[-]	Lehrstuhl für Produktionssysteme der Ruhr-Universität Bochum
MAE	[-]	Mean-absolute error
MSE	[-]	Mean-squared error
NC	[-]	Numerical control
PC	[-]	Personal computer
POM	[-]	Polyoxymethylen
RMSE	[-]	Root-mean-squared error
RSI	[-]	Robot Sensor Interface
SPIF	[-]	Single Point Incremental Forming
SPS	[-]	Speicherprogrammierbare Steuerung
SVM	[-]	Support Vector Machine
TCP	[-]	Tool Center Point
TE	[-]	Thermoelement
TPIF	[-]	Two Point Incremental Forming
TZM	[-]	Titan-Zirkon-Molybdän
UWKZ	[-]	Umformwerkzeug