

# **„Inkrementelle Blechumformung und ihre Kombination mit Streckziehen - Grundlagen und Anwendungen“**

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation  
vorgelegt von **Dipl.-Ing.**

**Babak Taleb-Araghi**

aus Teheran, Iran

**Berichter:** Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hirt  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Erman Tekkaya

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Dezember 2011



Umformtechnische Schriften

Band 164

**Babak Taleb-Araghi**

**Inkrementelle Blechumformung und ihre  
Kombination mit Streckziehen –  
Grundlagen und Anwendungen**

Shaker Verlag  
Aachen 2012

**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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2011)

Herausgeber:

**Univ. Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hirt**

Institut für Bildsame Formgebung der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

**Professor Dr.-Ing. Dierk Raabe**

Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH, Düsseldorf

**Professor em. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Dr.-Ing. E.h. Reiner Kopp**

Institut für Bildsame Formgebung der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

Copyright Shaker Verlag 2012

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0801-2

ISSN 1433-1551

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

## Vorwort des Herausgebers

Zur Herstellung von Blechbauteilen in großer Stückzahl gibt es sehr effiziente Verfahren. Die Fertigung von Einzelstücken oder Kleinstserien ist demgegenüber sehr aufwändig, da entweder teure Werkzeuge oder ein großes Maß an Handarbeit erforderlich sind. Daher wurde in den vergangenen Jahren die sogenannte CNC-gesteuerte inkrementelle Blechumformung in unterschiedlichen Verfahrensvarianten weltweit in Forschungsinstituten und Industriebetrieben untersucht. Allen Verfahrensvarianten ist gemeinsam, dass ein einfaches stiftförmiges Umformwerkzeug CNC-gesteuert eine an die Bauteilkontur angelehnte Bahn abfährt und auf diesem Weg das Blech inkrementell zur angestrebten Endform umformt. Dabei sind insbesondere die vom Flankenwinkel abhängige starke Blechdickenabnahme, die geringe Geometriegenauigkeit sowie die lange Prozessdauer als wesentliche Hemmnisse für eine industrielle Einführung anzusehen. Als Lösungsansatz wird in der vorliegenden Arbeit die Verfahrenskombination aus Streckziehen und inkrementeller Blechumformung sehr systematisch untersucht. Ausgehend von den Grundlagen werden industrierelevante und komplex geformte Anwendungsbauteile realisiert und gezeigt, dass durch die Verfahrenskombination die geometrische Genauigkeit verbessert, die maximale Blechausdünnung reduziert und die Herstellzeit verkürzt werden können. Gleichzeitig zeigen die Anwendungsbeispiele, wie unter Nutzung einer neuartigen integrierten Maschine und einer angepassten CAX-Umgebung eine durchgängige Methodenplanung und ein in sich geschlossenes Produktionskonzept realisiert werden können.

Aachen, Januar 2012

Prof. Dr.-Ing. G. Hirt



---

## Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bildsame Formgebung (IBF) der RWTH-Aachen Universität.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hirt, dem Leiter des Instituts für Bildsame Formgebung für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die Betreuung dieser Arbeit. Er gab mir die Möglichkeit in der Arbeitsgruppe „Blechformteile“ mit sehr viel geistiger Freiheit zu arbeiten und zu promovieren. Nicht zuletzt haben seine kritischen Hinterfragungen und wissenschaftlichen Anregungen stets zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ebenso danke ich sehr herzlich Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Erman Tekkaya vom Institut für Umformtechnik und Leichtbau der Technischen Universität Dortmund für die Übernahme des Koreferats und für sein entgegengebrachtes Interesse an den in dieser Arbeit behandelten Themen.

Weiterhin danke ich allen Arbeitskollegen meiner Arbeitsgruppe für die tatkräftige Unterstützung bei meiner Dissertation. Hervorzuheben sind die Beiträge von Herrn Dr.-Ing. Markus Bambach, Holger Voswinkel und Alexander Göttmann. Ferner bedanke ich mich bei meinen (ehemaligen) studentischen Hilfskräften Margarita Bambach, Jonas Gerund und Andreas Nick für ihren unermüdlichen Einsatz bei den Versuchsdurchführungen und deren Auswertungen. Zusätzlich danke ich allen Partnern des Forschungsprojektes „SIBUForm“ für die ständige Unterstützung und die Anregungen zum Thema „Verfahrenskombination aus Streckziehen und IBU“. Nennen möchte ich im Einzelnen Herrn Peter Krumbacher und Herrn Thomas Hofbauer von der iCASOD GmbH für den Aufbau der virtuellen Planungskette sowie Herrn Volker Huthmacher von der AUDI AG und Herrn Joachim Zettler von der EADS GmbH für ihre technische Mitwirkung. Dem Werkstattteam des IBF und Herrn Theo Heiligers danke ich für die Vorbereitung und Durchführung der vielen Experimenten.

Für die kritische Durchsicht, wertvolle Anregungen und Verbesserungsvorschläge und für das endgültige Korrekturlesen danke ich Herrn Dr.-Ing. Markus Bambach, Herrn Dr. med. Niclaas Bliesener, Herrn David Bailly und meiner Schwester Salome Karji Bani.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner gesamten Familie für die stets fortlaufende Unterstützung während meiner Tätigkeit bei der Erstellung dieser Arbeit sehr herzlich bedanken. Ein erfolgreiches Gelingen ohne deren Hilfe wäre an dieser Stelle kaum möglich gewesen. Besonderer Dank gilt meiner Frau Kristina, die mich immer wieder gestärkt und unterstützt hat und mit viel Geduld und Verständnis bei der Erstellung dieser Dissertation mitgewirkt hat. Nicht zu vergessen ist mein Dank an meine Zwillinge Nina und Klara, die mir durch ihre Geburt und ihr Dasein sehr viel Kraft gegeben und mich Ausdauer gelehrt haben.

Hürth, September 2011

B. Taleb Araghi

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Verfahrensbeschreibung und Stand der Technik .....</b>	<b>5</b>
2.1	Inkrementelle Blechumformung mit CNC-Werkzeugmaschinen .....	5
2.2	CNC-Umformmaschine AMINO DLNC-RB .....	9
2.3	Anwendungsfelder und Marktpotential der Inkrementellen Blechumformung ...	11
2.4	Prozessgrenzen der Inkrementellen Blechumformung .....	14
2.4.1	Blechausdünnung und Grenzformänderung .....	14
2.4.1.1	Lösungsansätze zur Überwindung der Blechausdünnung .....	19
2.4.2	Geometrische Genauigkeit .....	24
2.4.2.1	Lösungsansätze zur Steigerung der Maßhaltigkeit.....	26
2.4.3	Finite Elemente Modellierung der IBU .....	31
2.4.3.1	Lösungsansätze für die Reduzierung der Simulationszeit in der IBU ..	36
2.4.4	Prozessdauer .....	38
2.4.4.1	Lösungsansätze zur Reduzierung der Prozessdauer in der IBU .....	41
2.5	Streckziehen .....	42
2.6	Fazit und Motivation der Arbeit.....	46
<b>3</b>	<b>Herstellung eines zylindrischen Napfes durch Tiefziehen und IBU .....</b>	<b>49</b>
3.1	Experimentelle Arbeit .....	49
3.2	Bauteilanalyse und Bauteilvergleich .....	52
3.2.1	Vergleich der Blechdehnungen und der -dickenverteilungen.....	52
3.2.2	Vergleich des Rückfederungsverhaltens und der induzierten Eigen- spannungen .....	55
3.3	Zusammenfassung und abschließende Bemerkungen .....	60
<b>4</b>	<b>Untersuchung von Größeneffekten bei der IBU an verkleinerten Modellen.....</b>	<b>63</b>
4.1	Experimentelle Arbeiten .....	64

---

4.2	Auswertung und Bauteilvergleich.....	66
4.2.1	Formänderungsanalyse und Blechdickenverteilung.....	66
4.2.2	Geometrische Genauigkeit.....	71
4.3	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse .....	76
<b>5</b>	<b>Verfahrenskombination aus Streckziehen und IBU .....</b>	<b>79</b>
5.1	Entwicklung und Aufbau eines Blechbearbeitungszentrums .....	81
5.1.1	Maschinenkonzept und -entwicklung .....	81
5.1.2	Maschinenkonstruktion und -aufbau .....	86
5.2	CAX-Entwicklung.....	89
5.3	Materialfluss und Blechdurchdünung.....	93
5.3.1	Geometrie und Modellaufbau .....	93
5.3.2	Auswertung und Diskussion der Ergebnisse .....	97
5.4	Geometriegenauigkeit .....	107
5.4.1	Geometriedefinition und Modellierung .....	107
5.4.2	Analyse und Diskussion der Ergebnisse.....	109
5.5	Fallstudie: „SZ+IBU“-Demonstrator.....	116
5.5.1	Geometrie und Bauteilherstellung .....	116
5.5.2	Auswertung und Diskussion der Ergebnisse .....	120
<b>6</b>	<b>Umformversuche und Benchmarktests.....</b>	<b>129</b>
6.1	EADS-Bauteil.....	130
6.1.1	Integrative Produktion.....	131
6.1.2	Geometriegenauigkeit.....	134
6.2	AUDI-Heckklappe .....	137
6.2.1	Integrative Produktion.....	138
6.2.2	Geometriegenauigkeit.....	141
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>145</b>
<b>8</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>149</b>

---

8.1	Formänderungsanalyse und Blechdickenverteilung.....	149
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>153</b>
<b>10</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>163</b>



## Abkürzungen und Formelzeichen

Symbol	Einheit	Erläuterung
$\alpha$	°	Winkel zwischen Flanke und der Horizontalen
$A_g$	%	Gleichmaßdehnung
$\beta$	-	Ziehverhältnis
CAD	-	Computer Aided Design
CAE	-	Computer Aided Engineering
CAM	-	Computer Aided Manufacturing
CNC	-	Computer Numerical Control
CPU	-	Central Processing Unit
D	mm	Durchmesser
$d_t$	mm	Werkzeughdurchmesser
$d_z$	mm	Werkzeugzustellung
$\varepsilon$	%	Dehnung
$\Delta t$	Sek.	Zeitinkrement
E	N/mm <sup>2</sup>	Elastizitätsmodul
FEM	-	Finite Elemente Methode
FLC	-	Forming limit curve
FLD	-	Forming limit diagram
FLSD	-	Forming limit stress diagram
GFLD	-	Generalized forming limit diagram
H	mm	Bauteilhöhe
IBF	-	Institut für bildsame Formgebung
IBU	-	Inkrementelle Blechumformung
IV	-	inkrementelles Vorbiegen
$k_f$	N/mm <sup>2</sup>	Fließspannung

X

---

L	mm	Werkzeugpfadlänge
M	-	Maßstab
MFS	-	mehrstufige Strategie
MSF	-	Multi-stage forming
n	-	Verfestigungsexponent
NC	-	Numerical Control
NURBS	-	Non-Uniform Rational B-Splines
$\varphi$	-	Umformgrad
R	mm	Radius
$s_0$	mm	Ausgangsblechdicke
$s_1$	mm	Blechdicke nach Umformung
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	Spannung
SPIF	-	Single-Point Incremental Forming
STL	-	Surface Tessellation Language
SZ	-	Streckziehen
t	mm	Blechdicke
TPIF	-	Two-Point Incremental Forming
US	-	Anzahl der Umformstufen
VF	-	Vorform
WR	-	Walzrichtung
WZ	-	Werkzeugzustellung