

Entwicklung der Verfahrenstechnik zum modularen Walzprofilierbiegen

DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Oliver Selter

geb. am 19. Juli 1977 in Heggen

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität Siegen

Siegen 2017

Gutachter

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

Prof. Dr. rer. nat. Robert Brandt

Tag der Einreichung: 16. September 2016
Tag der mündlichen Prüfung: 20. März 2017

Forschungsberichte des Lehrstuhls für Umformtechnik

Band 10

Oliver Selter

**Entwicklung der Verfahrenstechnik
zum modularen Walzprofilierbiegen**

Shaker Verlag
Aachen 2017

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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5266-4

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

Für
Iris, Fynn-Luca
und Hanna-Marleen

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner beruflichen Tätigkeit bei der Firma Westfalia Metallschlauchtechnik GmbH & Co. KG in Hilchenbach. Dem Geschäftsführer Herrn Dr.-Ing. Stefan Hauk danke ich für die Zeit und die Möglichkeit der konstruktiven sowie experimentellen Umsetzung meiner Ideen. Ebenfalls gilt mein Dank meinen Kollegen, den Herren Matthias Weiß und Dietmar Baumhoff, für die stetigen fachlichen Diskussionen.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel, der mich bei meiner Arbeit stets konstruktiv unterstützt hat, gilt mein besonderer Dank. Sowohl die eingeräumten wissenschaftlichen Freiräume als auch die Erstellung des Erstgutachtens legten den Grundstein zu dieser Arbeit.

Prof. Dr. rer. nat. Robert Brandt als Leiter des Lehrstuhls für Werkstoffsysteme für den Fahrzeugleichtbau danke ich für seine fachlichen Hinweise zu meiner Arbeit und für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Für die sehr gute Zusammenarbeit bedanke ich mich bei meinen Kollegen Herrn Christopher Heftrich und Herrn Peter Frohn sowie den Studenten am Lehrstuhl für Umformtechnik, die mich bei der Arbeit mit hilfreichen fachlichen Diskussionen und Denkanregungen unterstützt haben.

Meiner Frau Iris und meinen Kindern Fynn-Luca und Hanna-Marleen danke ich besonders für ihre große Geduld und ihre stetige Unterstützung während der gesamten Entstehungszeit dieser Arbeit.

Attendorn, den 16. September 2016

Oliver Selter

Zusammenfassung

In einem Spannungsfeld aus Mobilität, Ökologie und Ökonomie liefert der Leichtbau seit Jahren einen wichtigen Beitrag zur Minderung der steigenden Gewichtsspirale im Fahrzeugbau. Dabei besteht der Karosserierohbau zum überwiegenden Teil aus Profilbauteilen. Dies zeigt, dass dem Einsatz von Profilen als skalierbaren Strukturbauteilen im Fahrzeugbau ein hoher Stellenwert zukommt. Ihr Beitrag zur Entschärfung des Zielkonflikts zwischen Effizienz und Flexibilität kommt derzeit vor allem im Bereich der Elektromobilität zum Tragen.

Die Motivation der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines kombinierten Fertigungsverfahrens aus Walzprofilier- und Biegetechnik (WAPRO-BI). Dieses stellt eine Maschinenteknik zur Verfügung zur Herstellung von komplexen partiell offenen und geschlossenen Mehrkammerprofilbauteilen mit Nebenformelementen für den Karosseriebau, die in Längsrichtung multiradiengebogen und zusätzlich um die Längsachse tordiert sind. Aus dieser Motivation abgeleitet ist das Ziel der Arbeit die Erforschung von Potentialen zur Erweiterung der Verfahrensgrenzen des konventionellen Mehrrollenbiegens auf Basis der Interaktion zwischen Biege- und Walzprofilieroperation und den damit einhergehenden charakteristischen Spannungs- und Dehnungszuständen. Zur Zielerreichung wurden Prozessuntersuchungen in den Einzeldisziplinen der Walzprofilier- und Biegetechnik vorgenommen und Prozessfenster und -grenzen ermittelt. Als Verfahren konnten identifiziert werden:

- Verfahren 1 „Biegen mit aktiv erzeugter Bandkantendehnung“
- Verfahren 2 „Mehrrollenbiegeverfahren“
- Verfahren 3 „Mehrrollenbiegeverfahren mit vorgekrümmter Halbzeuggeometrie“
- Verfahren 4 „Biegen mit axial überlagerter Zugspannung“

Es konnte nachgewiesen werden, dass der Einsatz unterschiedlicher Biegeverfahren die Grenze der Faltenbildung beim konventionellen Mehrrollenbiegeverfahren erweitert in Richtung kleinerer Biegeradien. Abschließend steht ein Methodenplan für das WAPRO-BI-Verfahren bereit, der auf Basis des Biegeradius als führender Prozessgröße die Auswahl eines geeigneten Biegeverfahrens festlegt. Für die Auslegung und Berechnung der erforderlichen Verfahrensparameter in den Einzelverfahren (1-4) liegen jeweils weitere verfahrensspezifische Prozessfenster und Methodenpläne vor.

Abstract

During the last year's lightweight construction provides a contribution to the reduction of vehicle weight to balance the conflict between mobility, ecology and economy. The vehicle's body construction consists predominantly of profile components. Due to their special properties as scalable structural components the application of these parts are of major importance. Especially in the field of electro mobility they ease the conflict between efficiency and flexibility.

The objective of this thesis is the development of a manufacturing process combining both rollforming and bending technology (WAPRO-BI). The new method is provided by a mechanical technology for the production of complex partially open and closed multi-chamber profiles for the design of car body structures. Along the longitudinal axis the profiles contain multiradii bent and torqued sections. The aim of this thesis is the research of potential capabilities for extending the process limit of conventional multiroll bending technology, which is based on the interaction between bending and rollforming operations and their associated stress and strain conditions.

To achieve the target, different investigations were conducted in order to determine process windows and process limits in each individual discipline of rollforming and bending technology. The following technologies could be identified:

- Technology 1 „Bending technology with actively generated strain“
- Technology 2 „Multiroll bending technology“
- Technology 3 „Multiroll bending operation with a pre-bent semfinished product“
- Technology 4 „Bending technology with axial superposed tensile stress“

It could be demonstrated that the application of various bending technologies will extend the limit of wrinkling in conventional multiroll bending technologies for smaller bending radii.

As a result a method plan for the WAPRO-BI technology was established providing a process for the determination of suitable bending processes based on the bending radius. For design and calculation of the required process parameters in each individually described technology (1-4) further specific process windows and method plans are available.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
2.	Stand der Technik	3
2.1.	Grundlagen der Biegetechnik	8
2.2.	Grundlagen der Walzprofilieretechnik	22
2.3.	Betrachtung kontinuierlicher Fertigungsverfahren	30
3.	Motivation, Zielstellung und Vorgehensweise	53
3.1.	Motivation	53
3.2.	Zielstellung	55
3.3.	Vorgehensweise	56
4.	Systementwicklung eines Walzprofilierbiegemoduls	59
4.1.	Ausarbeitung der Funktionenstruktur	60
4.2.	Entwicklung technischer Lösungskonzepte	62
4.3.	Werkzeug und Achsenbezeichnung	63
4.4.	Zusammenstellung der Einflussgrößen und Prozessparameter	66
5.	Halbzeugbeschreibung und Werkstoffcharakterisierung	69
6.	Entwicklung der Werkzeug- und Anlagentechnologie zum modularen Walzprofilierbiegen (WAPRO-BI)	79
6.1.	Aufbau der Versuchsanlage	79
6.2.	Werkzeugkonstruktion der Walzprofiliereinheit	81
6.3.	Werkzeugkonstruktion der Mehrrollenbiegeeinheit	83
6.4.	Betrachtung des Arbeitsraums der Mehrrollenbiegeeinheit	83
7.	Grundlagenuntersuchung der Verfahrenskombination aus Walzprofilier- und Biegeoperation (WAPRO-BI)	99
7.1.	Erprobung der Werkzeuge im Walzprofilierprozess	99
7.2.	Numerische Simulation des Walzprofilierprozesses	100
7.3.	Prozessauslegungsdiagramm für einen Walzprofilierprozess	105
7.4.	Erprobung der Werkzeuge im Mehrrollenbiegeprozess	106
7.5.	Versuchsauswertung	107
7.6.	Versuchsergebnisse	109
7.7.	Numerische Simulation für einen Mehrrollenbiegeprozess	117

7.8.	Prozessfenster und Prozessgrenzen einer Mehrrollenbiegeeinheit	120
8.	Profilbiegen mit aktiv erzeugter Bandkantendehnung	125
8.1.	Analytische Modellbildung	127
8.2.	Versuche	136
8.3.	Numerische Simulation	141
8.4.	Untersuchung zum Einfluss eines vorgekrümmten Halbzeugs auf den Mehrrollenbiegeprozess	150
8.5.	Prozessfenster und Prozessgrenzen	155
9.	Profilbiegen mit überlagerter Zugspannung	159
9.1.	Ermittlung der Bandzugkräfte in einer Walzprofilierkassette	161
9.2.	Prozessfenster und Prozessgrenzen für Bandzugkräfte in einer Walzprofiliereinheit	166
9.3.	Analyse der Einflussfaktoren	169
9.4.	Experimentelle Untersuchung	172
9.5.	Analytische Modellbildung	198
9.6.	Prozessfenster und Prozessgrenzen	216
9.7.	Verifizierung der Modellerkenntnisse am Profilhalbzeug	221
10.	Methodenplan für die WAPRO-BI-Technologie	225
11.	Zusammenfassung	229
12.	Aussicht	231