

Eugen Djakow

Ein Beitrag zur kombinierten
(quasi-)statischen und dynamischen
Umformung von blechförmigen
Halbzeugen

***Ein Beitrag zur kombinierten (quasi-)statischen und dynamischen Um-
formung von blechförmigen Halbzeugen***

zur Erlangung des akademischen Grades
DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Eugen Djakow
aus Almaty, Kasachstan

Tag des Kolloquiums: 30. April 2019
Referent: Prof. Dr.-Ing. Werner Homberg
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Alexander Brosius

Paderborner Umformtechnik
hrsg. von Prof. Dr.-Ing. Werner Homberg

Eugen Djakow

**Ein Beitrag zur kombinierten (quasi-)statischen
und dynamischen Umformung von blechförmigen
Halbzeugen**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Düren 2019

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.: Paderborn, Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6723-1

ISSN 2196-8322

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Umformende und Spanende Fertigungstechnik (LUF) der Universität Paderborn. Mein besonderer Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber, Herrn Prof. Dr. -Ing Werner Homberg, für die wissenschaftliche Betreuung und das in mich gesetzte Vertrauen. Seine wohlwollende Unterstützung hat maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen und die Zeit am Lehrstuhl zu einem sehr lehrreichen Abschnitt meines Lebens gemacht.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. -Ing. Alexander Brosius für die Übernahme des Korreferats und die kritische Durchsicht meiner Arbeit bedanken. Ferner bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. -Ing. habil. Mirko Schaper für die Übernahme des Vorsitzes und bei Herrn Prof. Dr. -Ing. Gerson Meschut für die Mitwirkung als weiteres Mitglied der Promotionskommission.

Den Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls gilt mein Dank für ihre tatkräftige Unterstützung bei konstruktiven oder simulativen Aufgaben. Besonders bedanke ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Tim Rostek für das stets freundliche Klima sowie für die intensiven fachlichen Diskussionen. Weiterhin möchte ich mich bei Thomas Heggemann, Fabian Bader, Dmitri Tabakajew, Benjamin Lossen, Eugen Wiens, Hans Christian Schmidt, Olga Damerow und insbesondere bei Robert Springer für zahlreiche fachliche Gespräche und Anregungen zu meiner Arbeit ganz herzlich bedanken. Zudem gilt mein Dank den technischen Mitarbeitern des LUF und allen Studien-, Bachelor-, Diplom- und Masterarbeitern, die mir bei meinen Arbeiten zur Seite standen und mich mit persönlichem Engagement unterstützt haben. Frau Karin Wöstenkühler gilt mein Dank für die sorgfältige Korrektur dieser Arbeit.

Mein ganz herzlicher Dank gilt meiner Frau Tatjana, die durch ihre unendliche Geduld und Unterstützung sowie ihren Verzicht auf viele gemeinsame Stunden wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen und diese damit erst ermöglicht hat. Nicht zuletzt danke ich ganz besonders meiner Mutter und Schwester, die mich bei der Wahl meines Weges und meinen Bestrebungen stets unterstützt haben. Gewidmet ist diese Arbeit meiner Großmutter Eleonora Schlothauer und meinem Vater Alexander Djakow, die in meinen Jugendjahren die Grundlage für technische Zusammenhänge geschaffen haben.

Zusammenfassung

Der Einsatz wirkmedienbasierter Umformverfahren (WMBU) eröffnet ein großes Potential hinsichtlich der effizienten Herstellung komplexer blechförmiger Leichtbauteile mit ausgezeichneter Oberflächenqualität, Formgenauigkeit und Maßhaltigkeit. Die wirkmedienbasierten Umformverfahren zeichnen sich dadurch aus, dass die Blechplatte während des Umformvorgangs mit Hilfe eines (quasi-)statischen oder dynamischen Wirkmediendruckes (p_{stat} , p_{dyn}) in eine konturgebende Werkzeughälfte umgeformt wird. Auch wenn WMBU im Vergleich mit konventionellen Blechumformverfahren eine verbesserte Nutzung des Formänderungsvermögens der eingesetzten Werkstoffe bieten, gibt es bei der Herstellung von komplexen scharfkantigen oder tiefen Bauteilen Grenzen, die mit einem alleinigen Einsatz eben dieser Verfahren nicht überwunden werden können. Um diese Grenzen zu überwinden, werden im Rahmen dieser Arbeit mehrstufige wirkmedienbasierte Prozessabfolgen für Bauteile mit sphärischen und gestuften Geometrien entwickelt, die die Vorteile von (quasi-)statischen und dynamischen wirkmedienbasierten Umformverfahren vereinen. Auf Basis der experimentellen und numerischen Untersuchungen werden hierbei innovative Prozessführungsstrategien abgeleitet, welche eine optimierte Nutzung des Formänderungsvermögens ermöglichen, die vorhandenen Werkstoffressourcen besser ausnutzen und somit eine sichere Herstellung von o. g. Bauteilgeometrien ohne starke Wanddickenänderungen ermöglichen.

Summary

Working - media - based forming processes (WMBF) represent a great potential regarding the production of complex sheet-metal lightweight components with excellent surface quality, shape accuracy and dimensional stability. The working - media - based forming processes characterize the sheet-metal forming process, where the sheet metal blank is formed during the forming process by means of a (quasi-)static or dynamic working media pressure into a contouring forming tool. Although the WMBF offers improved utilization of the formability of the used materials compared to conventional sheet metal forming processes, there are limits in the production of complex deeper or sharp edged components with (quasi-)static and dynamic WMBF processes, which can not be overcome by using these methods alone. In order to overcome this, multi-level WMBF process sequences for components with spherical and stepped geometries are developed in this work. Here the developed strategies combine the advantages of (quasi-)static and dynamic WMBF processes. Furthermore, based on analytical, experimental and numerical investigations, innovative process management strategies were derived, which completely compensate the local wall thickness changes, make better use of existing material resources and thus enable the safe production of mentioned geometries.

Liste der Vorveröffentlichungen

Einige Inhalte dieser Arbeit sind in folgenden Veröffentlichungen vertieft dargestellt:

2018

DJAKOW, E, HOMBERG, W.; SPRINGER, R.: Forming limit curves for (quasi-)static and dynamic working - media - based forming processes, Proceedings ICHSF 2018, OHIO, USA, 2018.

M. PIPER, A. ZIBART, E. DJAKOW, R. SPRINGER, W. HOMBERG, E.Y. KENIG: Heat transfer enhancement in pillow-plate heat exchangers with dimpled surfaces: a numerical study, International Conference on Healthcare and Medical Technologies, Applied Thermal Engineering 153 (ELSEVIER-2019), Paris 2018, doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.082

LINNEMANN, M.; PSYK, V.; DJAKOW, E.; SPRINGER, R.; HOMBERG, W.; LANDGREBE, D.: Incremental High - Speed - Forming - New Technologies for Flexible Production of Sheet Metal Parts. 6. ICAFT / 25. SFU / 6. AutoMetForm, Chemnitz, 2018.

2017

DJAKOW, E.; SPRINGER, R.; HOMBERG, W.; PIPER, M.; TRAN, J.; ZIBART, A.; KENIG, E.: Incremental electrohydraulic forming - A new approach for the manufacture of structured multifunctional sheet metal blanks. Proceeding - ESAFORM, Dublin, 2017.

SPOELSTRA, P.; DJAKOW, E.; HOMBERG, W.: Rubber Pad Forming - Efficient approach for the Manufacturing of complex structured sheet metal blanks for food industry. Proceeding - ESAFORM, Dublin, 2017.

2016

DJAKOW, E.; HOMBERG, W.; TABAKAJEW, D.: Combined working media - based forming on a pneumo-mechanical high - speed - forming machine. Proceedings - ICHSF, Dortmund, 2016.

2014

HOMBERG, W.; DJAKOW, E.; DAMEROW, O.: Process reliability and reproducibility of pneumo-mechanical and electrohydraulic forming processes. Proceedings - ICHSF, Daejeon, 2014.

2013

HOMBERG, W.; DJAKOW, E.; AKST, O.: Investigation of a pneumo-mechanical high-speed-forming process with respect to the forming of complex sheet and tube components. Journal of mechanical engineering (Vesnik) 67, Sevastopol, 2013.

2012

HOMBERG, W.; DJAKOW, E.: The investigation of a pneumo-mechanical high-speed forming process; 13th International scientific and technical conference "The Progressive Engineering & Technique" Journal of mechanical engineering (Vesnik) 64, Sevastopol, 2012.

HOMBERG, W.; DJAKOW, E.; AKST, O.: Some aspects regarding the use of a pneumo-mechanical high-speed forming process, Proceedings ICHSF 2012, Dortmund, 2012.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Stand der Technik	3
2.1	Tiefziehen.....	3
2.1.1	(Quasi-)statische Wirkmedienbasierte Umformverfahren (QWU).....	4
2.1.2	Hochgeschwindigkeitsumformverfahren (HGU)	13
2.1.3	Kombinierte Umformverfahren	22
2.1.4	Zusammenfassende Betrachtung	28
3	Wissenschaftliche Zielsetzung.....	31
4	Kombinierte (quasi-)statische und dynamische Hochdruckumformung (KSDH)	33
4.1	Verfahrensprinzip der KSDH - Anlage.....	33
4.1.1	(Quasi-)statischer Umformschritt bei der KSDH	33
4.1.2	Dynamischer Umformschritt bei der KSDH	35
4.2	Aufbau der KSDH - Anlage.....	36
4.2.1	Aufbau und Einflussfaktoren des (quasi-)statischen Wirkmediendruckes $p_{i,stat}$	38
4.2.2	Aufbau und Einflussfaktoren des dynamischen Wirkmediendruckes $p_{i,dyn}$	41
4.2.3	Zusammenfassende Betrachtung des Druckaufbaus der KSDH - Anlage.....	59
4.3	Aufbau der eingesetzten und entwickelten Messtechnik	60
4.3.1	Bestimmung der Plungergeschwindigkeit v_p	61
4.3.2	Bestimmung der Blechgeschwindigkeit	63
4.3.3	Bestimmung der örtlichen Druckverteilung bzw. der maximalen Druckhöhe.....	64
4.3.4	Taktile Geometriemessung	65
4.3.5	Optische Dehnungsmessung.....	66
4.3.6	Methodik zur Bestimmung der Grenzformänderungskurven	66
4.3.7	Versuchswerkstoffe	67

5	Ein- und mehrstufige KSDH - Umformung	73
5.1	Arbeitsbereiche und Versagensarten bei der KSDH - Umformung	74
5.2	Blecheinzug bei der ein- und mehrstufigen KSDH - Umformung	78
5.2.1	Einfluss der Vorformrichtung auf den Blecheinzug	81
5.2.2	Einfluss der Häufigkeit und Höhe der dynamischen Vorformung auf den resultierenden Blecheinzug	83
5.3	Einfluss der Prozessstrategien auf Formänderungshöhe und -verlauf	84
5.3.1	(Quasi-)statische freie Umformung	85
5.3.2	Dynamische freie Umformung	87
5.3.3	Vergleich (quasi-)statischer und dynamischer Formänderung bei Aluminium und Stahl während der freien Umformung	88
5.3.4	Einfluss der Beanspruchungsart während der kombinierten Umformung	91
5.3.5	Einfluss der Vorformhöhe auf die erreichbare Grenzformänderung	93
5.3.6	Einfluss der Vorformrichtung auf die erreichbare Grenzformänderung	95
5.4	Maßnahmen und Konzepte für die Einstellung von Werkstückeigenschaften	98
5.4.1	Bestimmung von Werkstückbeanspruchungen und Bewegungen eines Halbzeugs	98
5.4.2	Maßnahmen zur Realisierung größerer wirkmedienbasierter Umformungen	108
5.4.3	Maßnahmen zur Realisierung gleichmäßiger Wanddicken bei der wirkmedienbasierten Umformung	121
5.4.4	Maßnahmen zur Realisierung von höheren Blechumformgeschwindigkeiten bei der wirkmedienbasierten Umformung	137
5.5	Zusammenfassende Betrachtung	145
6	Zusammenfassung und Ausblick	149
	Literaturverzeichnis	151
	Abbildungsverzeichnis	163
	Tabellenverzeichnis	169