

# Dmitri Tabakajew

Simulationsgestützte Analyse und  
Optimierung der Umformung  
geschlossener Stahlprofile mittels  
Hamburger Verfahren

***Simulationsgestützte Analyse und Optimierung der Umformung  
geschlossener Stahlprofile mittels Hamburger Verfahren***

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

genehmigte  
DISSERTATION

von  
Dmitri Tabakajew, M.Sc.  
aus Nowoaltajsk, Russland

Tag des Kolloquiums: 05. März 2019  
Referent: Prof. Dr.-Ing. Werner Homberg  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya



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

**Dmitri Tabakajew**

**Simulationsgestützte Analyse und Optimierung  
der Umformung geschlossener Stahlprofile  
mittels Hamburger Verfahren**

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 978-3-8440-6647-0

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

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Umformende und Spanende Fertigungstechnik der Universität Paderborn.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Homberg, der mir die Möglichkeit zur Durchführung dieser Arbeit gegeben hat und mich jederzeit sowohl fachlich als auch persönlich unterstützt hat. Die konstruktiven Anregungen haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Des Weiteren möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya für die Übernahme des Korreferats danken. Für Ihre Mitwirkung in der Promotionskommission danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner (Vorsitzender) und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut (weiteres Mitglied).

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl, den studentischen Hilfskräften, besonders bei Herrn Benedikt Kottmann, und den Studien- und Abschlussarbeitern, die durch ihre tatkräftige Unterstützung zur Entstehung der Arbeit beigetragen haben. Insbesondere danke ich Herrn Dr.-Ing. Tim Rostek, der mich durch wertvolle Anregungen und durch konstruktive Diskussionen unterstützt hat.

Für die Unterstützung im experimentellen Bereich bedanke ich mich bei allen Technikern, besonders bei den Herren Manuel Köhler, Jochen Tofall und Martin Bonefeld. Außerdem möchte ich Frau Karin Wöstenkühler für die Unterstützung bei der Korrektur dieser Arbeit danken.

Die Arbeit basiert weitgehend auf den Ergebnissen eines Forschungs- und Entwicklungsprojektes, das aus den Mitteln der Europäischen Union und des Landes Nordrhein-Westfalen gefördert und vom Projektträger Jülich betreut wurde, wofür an dieser Stelle gedankt sei. Auch allen Mitarbeitern der Firma Lindemann und der Firma Metatech, mit denen ich im Rahmen des Projektes zusammengearbeitet habe, insbesondere den Herren Dr.-Ing. Jens Prehm und Nils Schönhoff, möchte ich ganz herzlich für ihre Unterstützung danken. Gleiches gilt für die Herren Dr.-Ing. Uwe Diekmann und Haris Uysal, denen ich für die produktive und angenehme Zusammenarbeit danke.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern Sergej und Inna Tabakajew und meiner Schwester Julia, die mir während der Erstellung dieser Arbeit immer verständnisvoll und geduldig zur Seite standen und mich jederzeit in vielfältiger Weise unterstützt haben.



## **Zusammenfassung**

Die Erfüllung der Forderung nach einer wirtschaftlichen und ressourceneffizienten Produktion von Rohr- und Profilbiegebauteilen ist vor allem durch eine Weiterentwicklung bestehender Umformprozesse erreichbar. In dieser Arbeit wird das Hamburger Verfahren zur Herstellung von Rohrbogen aus rohrförmigen Halbzeugen hinsichtlich besserer geometrischer Bauteileigenschaften und einer höheren Produktivität systematisch analysiert und optimiert. Gleichzeitig werden Potentiale zur Erzeugung von Bauteilen mit komplexen Querschnitten und Formen mittels des Hamburger Verfahrens aufgezeigt. Hierzu werden, aufbauend auf den Ergebnissen aus experimentellen und numerischen Untersuchungen, neue Ansätze zur Auslegung und Optimierung eingesetzter Biegewerkzeuge entwickelt. Ein dazu erstelltes Simulationsmodell beschreibt die Wechselbeziehung zwischen den relevanten Einfluss- und Zielgrößen und wird zur Ermittlung idealer Werkzeugparameter eingesetzt. Anschließend werden vorteilhafte Lösungen vorgestellt, die kostengünstig und flexibel einsetzbar sind und die bestehenden Verfahrensgrenzen deutlich erweitern. Die Arbeit trägt damit zu einer Verbesserung der Form- und Maßgenauigkeit der hergestellten Bauteile sowie einem signifikanten Anstieg der Ausbringungsmenge bei.

## **Summary**

The demand for economic and resource-efficient production of pipe and profile-bending parts can be met in particular through the further development of existing forming processes. In this thesis, the so-called “Hamburg process” for producing pipe elbows from tube-shaped semi-finished products is systematically analysed and optimised to achieve improved geometrical component properties and higher productivity. At the same time, it highlights the potentials for producing components with complex cross-sections and shapes by the Hamburg process. Working on the basis of the results of experimental and numerical investigations, new approaches are developed for the design and optimisation of the bending tools used. A simulation model created for this purpose describes the correlation between the relevant influencing and target factors and is applied to determine the ideal tool parameters. Favourable solutions are then presented which can be deployed in a cost-efficient and flexible manner and significantly extend existing process limits. The thesis therefore contributes to an improvement in the shape and dimensional accuracy of components produced as well as to a significant increase in production output.



# Liste der Veröffentlichungen

Einige Inhalte dieser Arbeit sind in folgenden Veröffentlichungen vertieft dargestellt:

## 2018

Tabakajew, D.; Homberg, W.: *Determination of Optimal Tool Parameters for Hot Mandrel Bending of Pipe Elbows*. Proceedings of the 21<sup>st</sup> International ESAFORM Conference on Material Forming, AIP Conference Proceedings, Volume 1960, Issue 1, S. 110011-1 – 110011-6, ESAFORM 2018, Palermo, Italy, 2018

Diekman, U.; Homberg, W.; Prehm, J.; Rostek, T.; Schönhoff, N.; Tabakajew, D.; Trasca, A.; Uysal, H.: *Optimization of Tooling Design for Hot Mandrel Bending of Pipe Elbows*. Materials Science Forum, Vol. 918, S. 159-164, MEFORM 2018, Freiberg, Germany, 2018

## 2017

Tabakajew, D.; Homberg, W.: *Increasing the efficiency of hot mandrel bending of pipe elbows*. In: Procedia Engineering, Volume 207, S. 2310-2315, 12<sup>th</sup> International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2017, Cambridge University, Cambridge, United Kingdom, 2017

## 2016

Djakow, E.; Homberg, W.; Tabakajew, D.: *Combined working media-based forming on a pneumo-mechanical high speed forming machine*. In: Proceedings of the ICHSF 2016, S. 47-58, 7th International Conference on High Speed Forming, Dortmund, Germany, 2016

## 2015

Damerow, U.; Borzykh, M.; Tabakajew, D.; Schaermann, W.; Hesse, M.; Homberg, W.; Trächtler, A.; Jungeblut, T.; Michels, J. S.: *Intelligente Biegeverfahren – Entwicklung selbstkorrigierender Fertigungsprozesse in der Umformtechnik*. In: wt-online 6-2015, S. 427-432, 2015

## 2014

Damerow, U.; Tabakajew, D.; Borzykh, M.; Schaermann, W.; Homberg, W.; Trächtler, A.: *Concept for a Self-correcting Sheet Metal Bending Operation*. In: Procedia Technology 15 (0), S. 439-446, 2nd International Conference on System-Integrated Intelligence: Challenges for Product and Production Engineering, Bremen, Germany, 2014

Damerow, U.; Borzykh, M.; Tabakajew, D.; Schaermann, W.; Homberg, W.; Trächtler, A.: *Analysis of High Speed Bending Operations as Basis for Integrating Self-correcting Components to Increase Process Reliability*. In: Procedia Engineering 81 (0), S. 831-836, 11<sup>th</sup> International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan, 2014

Schaermann, W.; Borzykh, M.; Trächtler, A.; Tabakajew, D.; Damerow, U.; Homberg, W.; Hesse, M.; Jungeblut, T.: *Selbstkorrigierende Biegeprozesse in der Umformtechnik*. In: Automation 2014: Smart X – powered by automation, Baden-Baden, Germany, 2014



# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Theoretische Grundlagen – Stand der Technik .....	3
2.1	Herstellung geschlossener Hohlprofile aus Stahl .....	3
2.1.1	Hohlprofile mit kreisförmigem Querschnitt .....	3
2.1.2	Hohlprofile mit komplexem Querschnitt .....	7
2.2	Biegen von Hohlprofilen .....	10
2.2.1	Verfahren mit kinematischer Gestalterzeugung .....	12
2.2.2	Verfahren mit formgebundener Gestalterzeugung .....	18
2.3	Formstücke zum Einschweißen .....	26
2.4	Statistische Methoden .....	28
2.4.1	Faktorielle Versuchspläne .....	28
2.4.2	Neuronale Netze .....	29
3	Wissenschaftliche Zielsetzung .....	33
4	Halbzeuge und Versuchseinrichtungen .....	35
4.1	Werkstoffe .....	35
4.2	Versuchsaufbau .....	38
4.2.1	Rohrbogenpresse .....	38
4.2.2	Prüfstand .....	39
4.2.3	Werkzeuge .....	40
4.2.4	FEM-Berechnungssoftware .....	41
4.3	Messtechnik .....	41
4.3.1	Temperaturmessung .....	42
4.3.2	Reibwertermittlung .....	42
4.3.3	Bauteileigenschaften .....	44
5	Numerische Abbildung des Hamburger Verfahrens .....	47
5.1	Aufbau des numerischen Simulationsmodells .....	47
5.1.1	Beschreibung des Materialverhaltens .....	48

5.1.2	Simulationsbedingungen .....	49
5.2	Validierung der numerischen Simulationen .....	53
5.2.1	Bauteilgeometrie .....	53
5.2.2	Formänderungsanalyse .....	56
5.3	Zusammenfassende Betrachtung .....	60
6	Hamburger Verfahren .....	63
6.1	Qualitätsmerkmale der Bauteile .....	63
6.2	Analyse der Einflussfaktoren auf geometrische Bauteileigenschaften .....	65
6.2.1	Halbzeug .....	65
6.2.2	Kraft-/Dehnungseinleitung .....	78
6.3	Zusammenfassende Betrachtung .....	106
7	Verfahrensoptimierung .....	109
7.1	Werkzeugauslegung .....	110
7.1.1	Softwarewerkzeug zur Konstruktion von Biegewerkzeugen .....	110
7.1.2	Bestimmung optimaler Werkzeugparameter .....	118
7.2	Werkzeugkonzepte .....	121
7.3	Bauteilkonzepte .....	126
7.4	Zusammenfassende Betrachtung .....	132
8	Zusammenfassung .....	135
	Literaturverzeichnis .....	137
	Abbildungsverzeichnis .....	149
	Tabellenverzeichnis .....	153