

Bewertung und quantitative Beschreibung von  
Rohrbiegebauteilen anhand von Kennziffern  
zur Feststellung der Rückwirkungen ausge-  
wählter Qualitätsmerkmale auf Produktion  
und Produktanwendung

DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines Doktors  
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Dipl.-Wirt.-Ing. Christopher Kuhnhen  
geb. am 06.10.1984 in Plettenberg

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät  
der Universität Siegen

Siegen 2016

Gutachter

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

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd-Uwe Zehner

Prof. Dr. Marcus Schweitzer

Tag der mündlichen Prüfung: 12.10.2016



Forschungsberichte des Lehrstuhls für Umformtechnik

Band 8

**Christopher Kuhnhen**

**Bewertung und quantitative Beschreibung von  
Rohrbiegebauteilen anhand von Kennziffern  
zur Feststellung der Rückwirkungen ausgewählter  
Qualitätsmerkmale auf Produktion  
und Produktanwendung**

Shaker Verlag  
Aachen 2016

**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., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4866-7

ISSN 2191-0030

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**

Diese Arbeit basiert auf Tätigkeiten in Forschungsprojekten als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Umformtechnik sowie dem Lehrstuhl für Fertigungsverfahren und Fertigungsmeßtechnik an der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät der Universität Siegen. Durch die Mitarbeit an der Standardisierung der biegeumformenden Fertigungsverfahren im VDI-Fachausschuss 113 „Biegetechnik“ wurde die Sinnhaftigkeit von der einheitlichen Bewertung von Biegebauteilen und damit das Interesse an der Abfassung einer wissenschaftlichen Arbeit mit dem Schwerpunkt der einheitlichen Bewertung von Biegebauteilen geweckt. Gerade das Dilemma der voreiligen Abnahmeverweigerung bei rein qualitativen Qualitätsmerkmalen wie der Faltenbildung am Innenbogen führt zu einem erhöhten Materialaufwand und damit zu einer Kostensteigerung und soll in Zukunft minimiert werden sowie Ansätze für die weitere Quantifizierung von qualitativen Merkmalen liefern.

Zur erfolgten Niederschrift der Arbeit gilt der besondere Dank an Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel und an Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd-Uwe Zehner, die mir als Lehrstuhlinhaber der beiden zuvor genannten Lehrstühle die notwendigen und hinreichenden Freiheiten einräumten, die vorliegende Dissertationsschrift abzufassen. Darüber hinaus sei Herrn Dr.-Ing. Rainer Steinheimer, Herrn Dipl.-Ing. Christian Mathes, Herrn Dipl.-Ing. (FH) Wolfgang Bürger und Herrn Dipl.-Ing. Sebastian Groth der Dank zu erweisen, die stets mit Rat und Tat sowie bei fachlichen und formalbürokratischen Diskussionen zur Seite standen und darüber hinaus erst interessante Einblicke über den Tellerrand des Fachgebiets ermöglichten. Der Lehrstuhlsekretärin Frau Hannelore Loos sei gedankt für die Organisation der Dienstreisen und anderer bürokratischer Abläufen. Herrn Reinhold Thor gilt der Dank für die Betreuung in IT-Angelegenheiten und den Facharbeitern der mechanischen Fakultätswerkstatt für die Fertigung erforderlicher Versuchsanlagen. Den weiteren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern an den beiden vorgenannten

Lehrstühlen sei für das überaus gute Arbeitsverhältnis, die hinreichenden Denkanstöße sowie für die über die Arbeit hinausgehenden Freundschaften gedankt. Gleicher Dank gilt den Studentinnen und Studenten, welche durch ihre Arbeiten zum Gelingen dieser Schrift beigetragen haben. Des Weiteren bedanke ich mich bei meinem Cousin André Koch, der bereitwillig das fachfremde Lektorat dieser Arbeit übernommen hat.

Meinen Eltern Ursula und Lothar Kuhnhen und meiner Schwester Jennifer danke ich dafür, dass sie mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen und meine Entscheidungen auf dem bisherigen beruflichen Lebensweg voll unterstützt haben.

## Zusammenfassung

Das Biegen von Rohren ist ein häufig eingesetztes Fertigungsverfahren. Die Verfahrensarten für das Biegen von Profilen sind nach der Krafteinleitung bzw. der Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück kategorisiert. Biegebauteile weisen verfahrensspezifische Qualitätsmerkmale und Ausprägungsarten auf. Diese Qualitätsmerkmale ließen sich in der Vergangenheit bis auf die Faltenbildung ausreichend quantifizieren.

Die vorliegende Arbeit hat das Ziel, aufgrund der Bewertung der Geometrie des Biegebauteils und des hierfür benötigten Halbzeugs sowie denen aus der für den Verwendungszweck gestellten Anforderungen an die Gebrauchseigenschaften abgeleiteten Qualitätsmerkmalen die Auswahl eines Biegeverfahrens zu ermöglichen. In Ergänzung dazu erfolgte erstmalig die Bewertung der Auswirkungen von Falten im Hinblick auf die zuvor genannte technische Gebrauchseigenschaft, entsprechend des Anwendungsfalls. Dieser wurde für Falten auf Basis des Einsatzzweckes des Biegebauteils als fluidführende Rohrleitung sowie als tragendes Strukturelement untersucht. Das Qualitätsmerkmal Falten am Innenbogen wurde dafür topographisch in Längsrichtung mit einem eigens entwickelten Faltenmessstand vermessen und mit dem Bewertungsfaktor für Faltenbildung  $\Omega_{VD13431}$  kategorisiert sowie im Anschluss denen mittels Durchströmung und Einleitung äußerer Kräfte abgeleiteten Belastungsgrößen gegenüber gestellt. In Folge dessen wurde eine Separation der Ergebnisparameter auf Basis der Krafteinleitungen mittels FE-Simulationen für den Aufbiegeversuch durchgeführt.

Anhand der Ergebnisse war eine Approximation der Auswirkungen von Falten auf den späteren technischen Anwendungsfall möglich. Falten können zukünftig erstmalig aufgrund der in der Arbeit betrachteten Anwendungsfälle zulässig toleriert werden, was positive monetäre Effekte nach sich zieht.

## Abstract

Bending of tubes is an often used manufacturing technology. The different bending procedures are categorized by the process applied forces and the relative motions between tools and workpiece. Bent parts have process specific quality characteristics. In the past these quality characteristics have been sufficiently quantifiable except for the wrinkle formation at the inner bow.

The scientific thesis has the purpose of enabling an evaluation based on the geometry of bent part and semi-finished products as well as the requirement to the quality characteristics in future use. Depending on this evaluation a suitable bending process can be chosen. Furthermore the effects of wrinkles on the bent parts technical performance in terms of its intended use are examined for fluid-carrying pipes and for tubes as main structural elements for the first time. Wrinkles at the inner arc of the bow area as production quality characteristics will be measured topographically in longitudinal direction of the tube with the help of a specifically developed laser triangulation measuring system. Based on these measurements, a categorisation is performed by the evaluation factor for wrinkling according to  $\Omega_{VDI3431}$ . The volumetric flow rate of each bent part as well as externally applicable forces is matched to the evaluation factor. The rating results are separated by external forces with the help of FE-Simulations.

By means of the results an approximation to the intended technical application is possible. For the first time wrinkles can be tolerated permissible holding out the prospect of possible monetary benefits due to the consideration in this thesis.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Stand der Forschung.....	3
2.1	Biegeumformung .....	3
2.1.1	Einordnung des Biegeumformens .....	4
2.1.2	Grundlagen des Rotationszugbiegens .....	6
2.1.3	Geometrische Definition des Rotationszugbiegens .....	8
2.1.4	Prüfmerkmale von Biegebauteilen, insbesondere Falten am Innenbogen.....	11
2.2	Qualität und Prüftechnik .....	14
2.2.1	Qualitätsbegriff .....	14
2.2.2	Historischer Kontext von Qualität im Zeitalter der Industrialisierung.....	15
2.2.3	Rechtlicher Rahmen zur Sicherung von Qualität.....	16
2.2.4	Technischer und betriebswirtschaftlicher Nutzen von Qualität. 17	
2.2.5	Prüf- und Messtechnik in der fertigungsbegleitenden Prüfung . 19	
2.2.6	Kosten- und Nutzenabwägung .....	21
2.2.7	Umwelteinfluss .....	22
2.2.8	Bedienereinfluss .....	24
2.2.9	Prüfprozesseignung .....	25
2.2.10	Faltenbildung.....	30
2.3	Druckverluste in geschlossenen Rohrleitungen.....	37
2.4	Ergebnis aus dem Stand der Forschung .....	38
3	Motivation und Zielsetzung der Arbeit.....	40
4	Modellbildung .....	45
4.1	Zuordnung von Biegebauteilen zu Biegeverfahren .....	45
4.2	Empirische Hypothese zur Auswirkung von Falten .....	52
4.3	Berechnungen des Druckverlustes am Bogen .....	52
5	Verwendete Versuchseinrichtung .....	55

5.1	Zugprüfmaschine.....	56
5.2	Lasermesssystem zur Faltenmessung .....	57
5.2.1	Aufbau.....	57
5.2.2	Durchführung der Messung.....	60
5.2.3	Ermittlung der Streuung des Messsystems .....	61
5.3	3D-Koordinaten-Messarm .....	68
5.4	3D-Koordinaten-Messmaschine.....	69
5.5	Photogrammetrie.....	70
5.6	Optisches Rohrmesssystem.....	72
5.6.1	TUBOSCAN S 200 .....	72
5.6.2	TubeInspect .....	73
5.7	Rauheitsmessgerät für Oberflächenrauheit .....	74
5.8	Druckverlustmessung am Ventilatorenprüfstand.....	75
5.9	Kleinlasthärteprüfgerät Struers Duramin-1/-2 .....	77
6	Experimentelle Untersuchungen.....	79
6.1	Technische Bewertung der Auswirkung von Falten.....	79
6.1.1	Faltenmessung mittels Lasermesssystem.....	81
6.1.2	Oberflächenrauheitsmessung der Halbzeuge.....	87
6.1.3	Druckverlustmessung.....	88
6.1.4	Auf- und Zubiegeversuche.....	91
6.1.5	FE-Simulationen zum Aufbiegen mit PAMSTAMP 2G .....	95
6.2	Referenzmessungen von Biegebauteilen mittels unterschiedlicher Messsysteme.....	97
6.2.1	FARO Edge 2,7M .....	98
6.2.2	GOM-Atos ScanBox 6130 .....	100
6.2.3	TUBOSCAN S 200 .....	101
6.2.4	TubeInspect .....	101
6.2.5	LEITZ Scirocco Trax .....	102
6.2.6	Ergebnisse der Referenzmessungen von Biegebauteilen mittels unterschiedlicher Messsysteme.....	103
7	Technische Wirkung von Falten.....	105

---

7.1	Faltenmessung mittels Lasermesssystem (topographische Faltenvermessung) .....	105
7.2	Vergleich Faltenmessung Lasermesssystem mit Messschiebermessung nach DIN EN 13480-4 .....	108
7.3	Druckverluste im Bogen in Abhängigkeit der Ausprägung von Falten.....	112
7.4	Auf- und Zubiegeversuch .....	116
7.4.1	Aufbiegen.....	116
7.4.2	Zubiegen.....	119
7.5	FE-Simulation mit PAMSTAMP 2G zum Aufbiegen.....	120
7.6	Kleinlasthärteprüfung im Bereich der Faltenbildung am Bauteil nach dem Aufbiegeversuch .....	123
7.7	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Faltenbildung .....	129
7.8	Kalkulatorischer Mehraufwand zur Faltenvermeidung.....	130
8	Zusammenfassung.....	133
9	Ausblick .....	136
10	Literaturverzeichnis .....	138
	Tabellarischer Lebenslauf .....	160