Integration von Regelungsalgorithmen in die Finite-Elemente-Simulation von Ringwalzprozessen

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.**

Vahid Jenkouk

aus Tehran, Iran

Berichter: Univ.-Prof. Dr.- Ing. Gerhard Hirt

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Meier

Tag der mündlichen Prüfung: 04. September 2014

Umformtechnische Schriften

Band 173

Vahid Jenkouk

Integration von Regelungsalgorithmen in die Finite-Elemente-Simulation von Ringwalzprozessen

Shaker Verlag
Aachen 2014

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, 2014)

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 2014
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3157-7
ISSN 1433-1551

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

Vorwort des Herausgebers

Das Radial-Axial-Ringwalzen ist ein flexibles Verfahren zur Herstellung nahtloser Ringe unterschiedlichster Querschnitte und Abmessungen. Ausgehend von einem kompakten, gelochten Vorring entsteht die Endgeometrie durch inkrementelle Umformung im Radial-und Axialwalzspalt. Dabei werden im industriellen Prozess u.a. die Drehzahlen, Vorschübe und Positionen der Haupt-und Axialwalzen, des Dorns und der Zentrierrollen in Abhängigkeit von im Prozessverlauf gemessenen Größen geregelt. Dies stellt eine grundsätzliche Schwierigkeit für die Finite-Elemente-Simulation des Ringwalzens dar, da bei konventioneller Simulation die Zeitverläufe dieser Freiheitsgrade vorab bekannt sein müssten. In der vorliegenden Arbeit wird daher aufgezeigt, wie die Regelungsalgorithmen der Ringwalzanlage in die Finite Elemente Simulation integriert werden können. Dabei wird die Kinematik des Prozesses basierend auf für die Anlagenbedienung üblichen Vorgaben unter Nutzung der Werte virtueller Sensoren entsprechend den anlagenspezifisch üblichen Algorithmen erst im Verlauf der Simulation definiert. Mit diesem Vorgehen ist es nicht nur möglich, Ringwalzprozesse auszulegen sondern auch neue Ringwalzstrategien und Regelungskonzepte zunächst in der Simulation zu erproben.

Prof. Dr.-Ing. G. Hirt

Danksagung

Die Forschungsergebnisse zu der vorliegenden Arbeit entstanden während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bildsame Formgebung der RWTH Aachen im Zeitraum von Oktober 2008 bis Juli 2013. Ich möchte mich daher vielmals bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hirt, dem Direktor des Instituts, für die Unterstützung, die Betreuung und das geschenkte Vertrauen bedanken. Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Horst Meier, Leiter des Lehrstuhls für Produktionsautomatisierung an der Ruhr-Universität in Bochum, für die Übernahme des Korreferates bedanken.

Ich möchte mich besonders bei Herrn Dr.-Ing Dennis Michl bedanken, da meine Karriere am IBF mit einer Studienarbeit unter seiner Betreuung begann. Herrn Dr. Martin Franzke möchte ich für die vielen interessanten Diskussionen, in denen die Grundidee zu dieser Arbeit entstand, danken. Seine Tür stand immer offen für mich und er hat mir stets durch seine klare Denkweise geholfen, Lösungsansätze für meine Probleme zu finden.

Ein wesentlicher Bestandteil meiner Arbeit war die Integration einer industriellen Regelung in ein FE-Modell. Dies wäre ohne die Unterstützung der Firma SMS Meer GmbH nicht möglich gewesen. Mein Dank gilt hier den Herren Jürgen Debye, Klaus Brauckmann und Dr.-Ing. Andreas Lieb.

Bei Frau Doris Eggermann möchte ich mich für die hervorragende Unterstützung bei allen Problemen bezüglich des Rechenclusters und der Programmierung bedanken.

Ich hatte das Privileg an einem Institut mit einer sehr guten Werkstatt zu arbeiten. Mein besonderer Dank gilt meinen Kollegen, die mich in der Werkstatt bei der Durchführung der zahlreichen Versuchswalzungen unterstützt haben. Ich bedanke mich insbesondere bei Herrn Hubert Schulz, Herrn Manuel Poelmeyer, Herrn Michael Hamacher, Herrn Guido Sauder und Herrn Christian Seiffert.

Ich hatte das Vergnügen von der Hilfe sehr guter studentischer Hilfskräfte, Studien-, Bachelor-, und Masterarbeiter zu profitieren. Ich bedanke mich insbesondere bei den Herren Sree Koundinya Sistla, Anbazhagan Ramasamy, Tian Zhang, Philipp Banert und Eike Ebel.

Eine Tätigkeit, welche mir stets Freude bereitet hat, war die Betreuung der Mechanikübung, die in Zusammenarbeit mit dem Institut für allgemeine Mechanik durchgeführt wurde. Hierzu möchte ich Herrn Arthur Back danken, der mir bei der

Einarbeitung und der Übergabe sehr geholfen hat. Ich möchte ebenfalls Herrn Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Schmidt für die gute Zusammenarbeit danken.

Ich möchte mich bei meinen guten Freunden und Bürokollegen, Herrn Joachim Seitz und Herrn Gideon Schwich, für die hervorragende Zusammenarbeit und die schöne Zeit bedanken. Ich wünsche beiden viel Erfolg und Glück für die Zukunft. Ich bedanke mich ebenfalls bei meinen Kollegen Herrn Dr.-Ing. Dominik Recker und Herrn Dirk Rosenstock aus der Massivformgruppe für die fachliche Unterstützung und schöne freundschaftliche Zusammenarbeit. Mein Dank gilt ebenfalls allen anderen ehemaligen Kollegen des IBFs, die durch ihr solidarisches und freundschaftliches Verhalten dazu beigetragen haben, dass mir die Zeit am Institut immer in guter Erinnerung bleiben wird. Ich bedanke mich insbesondere bei Herrn Onur Güvenc, Herrn Dr.-Ing. Babak Taleb Araghi, Herrn Dr.-Ing. Herrn Markus Urban, Herrn Dr.-Ing. Rene Badjou, Herrn Thomas Henke, Herrn Alexander Göttmann, Herrn Dr.-Ing. Markus Bambach, Herrn Alexander Mikloweit, Herrn Christoph Russig, Herrn David Bailly, Herrn Adam Szurdak, Herrn Holger Vosswinkel, Herrn Stephan Hojda, Herrn Markus Daamen, Herrn Frank Flesch, Herrn Dr.-Ing. Gabriel McBain, Frau Daniella Brauers, Frau Marion Köster und Frau Ilka Steiner.

Ich würde mich gerne auch bei meinem jetzigen Arbeitgeber Herrn Prof. Julian Allwood dafür bedanken, dass er mich am Anfang meiner Arbeit an der Universität Cambridge mehrmals freigestellt hat, damit ich meine Dissertation fertigstellen kann.

Ich würde gerne die Gelegenheit nutzen um mich bei meinem guten Freund Patrick Pollok für seine Hilfe und Freundschaft zu bedanken. Meinen Geschwistern Frau Nassim Jenkouk und Herrn Hajir Jenkouk danke ich für die bedingungslose Unterstützung über die gesamten Jahre. Meiner Ehefrau Sharareh Mortazavi möchte ich für die unendliche Liebe, Geduld und Unterstützung danken. Sie hat einen erheblichen Anteil dazu beigetragen, dass diese Arbeit entstanden ist.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern Herrn Manouchehr Jenkouk und Frau Soraya Arian, die mich stets liebevoll unterstützt haben. Sie sind meine Motivation und Inspiration.

Ich widme diese Arbeit meinem verstorbenen Großvater Herrn Feyzollah Jenkouk.

Cambridge, Großbritannien, September 2014

Vahid Jenkouk

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Motivation 1

2 Stand der Forschung 7

2.1 Der Radial-Axial-Ringwalzprozess 7

2.1.1 Anwendungen und Herstellungsverfahren nahtloser Ringe 7

2.1.2 Aufbau einer Radial-Axial-Ringwalzmaschine 10

2.1.3 Grundlagen des Radial-Axial-Ringwalzens 12

2.2 Regelung der Werkzeugbewegungen 20

2.2.1 Prozessstabilisierende Bewegungen 21

2.2.2 Regelung der radialen und axialen Abnahme 28

2.2.3 Industrielle Ringwalzwerkssteuerungen 33

2.3 Finite-Elemente-Simulation von Ringwalzprozessen 38

2.3.1 Modelle zur stabilen Berechnung und Verkürzung der Rechenzeit 40

2.3.2 Modelle mit kinematischer Problemstellung 44

2.4 Fazit und Ziele der Arbeit 50

3 Methoden und Versuchsdurchführung 55

3.1 Versuchsanlage 55

3.2 Regelung der Versuchsanlage 56

3.3 Versuchsplanung und -durchführung 59

3.3.1 Prozessplanung 59

3.3.2 Versuchsdurchführung 61

3.4 Finite-Elemente-Methode mit dem Programm Abaqus 64

4 Konventionelle Simulation mit a priori Vorgabe der Kinematik 65

4.1 Modell und Randbedingungen 65

4.1.1 Modellierung des Werkstücks und der Werkzeuge 65

4.1.2 Kinematische Randbedingungen und Kontaktbedingungen 67

4.1.3 Stoffwerte und thermische Randbedingungen 70

4.1.4 Auswahl des Integrationsschemas 73

4.2 Validierung des Modells anhand von Versuchen 73

4.2.1 Einfluss der Massenskalierung 75

4.2.2 Einfluss der thermischen Randbedingungen 78

4.2.3 Einfluss der Reibung 80

4.2.4 Einfluss der Fließkurven 80

4.2.5 Formentwicklung 82

4.3 Fazit 87

5 Simulation mit partieller Regelung 89

5.1 Modellaufbau 89

5.1.1 Sensoren 90
5.1.2 Bewegungssubroutine 92
5.2 Methode 1: Regelung auf Basis der aktuellen Geometrie 93
5.2.1 Zentrierrollenposition 93
5.2.2 Axialwalzendrehzahl 95
5.2.3 Axialgerüstposition 95
5.2.4 Zwischenfazit 97
5.3 Methode 2: Regelung mit Berücksichtigung der Zentrierkräfte 97
5.3.1 Axialwalzendrehzahl 97
5.3.2 Zentrierrollenposition 101
5.4 Bewertung beider Methoden anhand von Simulationen 101
5.5 Validierung anhand von Versuchen 104
5.6 Fazit 108
6 Simulation mit integrierter industrieller Regelung 109
6.1 Führungsverhalten der einzelnen Bewegungsfreiheitgrade 110
6.2 Technologischer Regler und Anbindung an das FE-Modell 112
6.2.1 Regelungstask 112
6.2.2 Programmiertechnische Erstellung der Regelungstask 113
6.2.3 Benutzeroberfläche zur schnellen Erstellung der Regelungstask 116
6.3 Validierung anhand von Versuchen 117
6.3.1 Abbildung der Kinematik 117
6.3.2 Reaktionskräfte und -momente 120
6.4 Fazit 122
7 Vollständig geregeltes Modell mit einfachen Regelungsalgorithmen 125
7.1 Regelung der Bewegungsfreiheitsgrade 125
7.1.1 Geschwindigkeiten der Dornwalze und der oberen Axialwalze 125
7.1.2 Berücksichtigung der Kräfte- und Momentenbeschränkungen 130
7.1.3 Modellbedingungen 131
7.2 Validierung anhand eines Versuchs 131
7.3 Fazit 133
8 Einsatz der Methode beim Axialprofilieren 135
8.1 Prozess und Referenzbeispiel 135
8.2 Experimente am IBF 137
8.3 FE-Modell des Axialprofilierens 140
8.3.1 Regelungsalgorithmen 140
8.3.2 Programm zur Erstellung von Subroutinen 148
8.4 Ergebnisse 150
8.5 Fazit 154

9 Zusammenfassung und Ausblick 155
Literaturverzeichnis 158
Symbolverzeichnis 167
Kurzfassung 173
Abstract 175