„Modellbildung und adaptive Vernetzung zur
Modellierung inkrementeller Massivumformung“

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften

genehmigte Dissertation
vorgelegt von

David Michael Schäfer

aus Solingen

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hirt
Prof. Dr.-Ing. habil. Birgit Awiszus

Tag der mündlichen Prüfung: 06. März 2015

Umformtechnische Schriften

Band 174

David Schäfer

**Modellbildung und adaptive Vernetzung zur
Modellierung inkrementeller Massivumformung**

Shaker Verlag
Aachen 2015

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, 2015)

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 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3729-6

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

Ein wesentliches Merkmal inkrementeller Umformverfahren ist, dass die plastische Zone in aller Regel klein im Vergleich zur Bauteilgröße ist und schrittweise durch das gesamte Bauteil wandert. Beim Freiformschmieden wird dies durch eine diskrete Folge einzelner Hübe erreicht, wohingegen z.B. beim Walzen oder Ringwalzen ein kontinuierlicher Kontakt mit den rotierenden Werkzeugen gegeben ist. Die Auslegung dieser langen Prozessfolgen mithilfe numerischer Simulationen ist insbesondere durch die langen Prozesszeiten, die häufig komplizierte Prozesskinematik, die gegebenenfalls komplizierten Kontaktsituationen und die aus diesen Bedingungen resultierenden langen Rechenzeiten und Konvergenzprobleme erschwert. Herr Schäfer zeigt in der vorliegenden Arbeit, wie die Rechenzeit durch geeignete Mehrnetzverfahren reduziert werden kann und wie diese Verfahren auch für die Gefügesimulation genutzt werden können. Darüber hinaus zeigt er die Potentiale einer parametrischen Beschreibung sich wiederholender ähnlicher Bewegungsabläufe, wodurch er die grundsätzlichen Voraussetzungen für eine automatische numerische Optimierung der Prozessfolge schafft.

G. Hirt

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hirt für die Betreuung dieser Arbeit und für die konstruktiven Diskussionen während der Entstehung. Ebenfalls möchte ich mich bei Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Birgit Awiszus für die Bereitschaft bedanken, das Koreferat dieser Arbeit zu übernehmen.

Wesentliche Teile dieser Arbeit sind im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogrammes SPP 1146 „Modellierung inkrementeller Umformverfahren“ entstanden. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich daher für die Unterstützung. Den beteiligten Professoren und Mitarbeitern des Schwerpunktprogrammes danke ich für die gute Zusammenarbeit.

Prof. Lirio Schaeffer danke ich herzlich für die Betreuung während meiner Aufenthalte am „Laboratório de Transformação Mecânica“ (LdTM) der „Universidade Federal do Rio Grande do Sul“ (UFRGS) sowie bei den Senafor-Konferenzen in Porto Alegre, Brasilien. Auch für die gute Kooperation im Rahmen des Projektes „Bulk metal formed parts for power plants“ innerhalb des DFG geförderten Forschungsverbunds „Brazilian-German Collaborative Research Initiative on Manufacturing Technology“ (BRAGECRIM) möchte ich mich bei ihm und seinen Mitarbeitern bedanken.

Mein Dank gilt auch meinen ehemaligen Kollegen am Institut für Bildsame Formgebung. Hervorheben möchte ich hier insbesondere Burkhard Wietbrock, bei dem ich mich für das kritische Korrekturlesen dieser Arbeit, aber auch für die Gesellschaft bei diversen Freizeitaktivitäten bedanken möchte. Besonders danken möchte ich auch Oliver Hofmann, Gabriel McBain, Holger Justinger und Doris Eggermann für die schöne Zeit am IBF.

Meiner Frau danke ich für ihre Geduld. Ihr und meinen Eltern danke ich außerdem dafür, dass sie mich immer unterstützen und für mich da sind.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Anwendungsgebiete und Zielsetzung	3
2.1	Betrachtete Verfahren	3
2.1.1	Freiformschmieden: Reck- und Radialschmieden	3
2.1.2	Freiformschmieden: Schmieden von Hohlwellen auf einem Innendorn	7
2.1.3	Walzen	7
2.1.4	Ringwalzen	8
2.2	Zielsetzung	9
3	Stand der Technik	11
3.1	Physikalische Grundlagen und FEM-Lösungsansätze	11
3.1.1	Plastomechanik	11
3.1.2	Thermische Effekte	14
3.1.3	Lösung über die Finite-Elemente-Methode	16
3.1.4	Kopplung FEM - Thermische Berechnung	17
3.1.5	Gefügeentwicklung	17
3.2	Modellbeschreibung mit PEP und LARSTRAN/Shape	25
3.3	Beschleunigung der Simulation durch Nutzung einer adaptiven Vernetzung	27
3.3.1	Adaptive Vernetzung - Mehr-Netz Methode	27
3.3.2	Vernetzungsalgorithmen für adaptive Netze	34
3.3.3	Weitere Ansätze zur Simulationsbeschleunigung durch adaptive Netze	38
3.4	Prozessoptimierung	39
3.4.1	Modellerzeugung und -anpassung	40
3.4.2	Zusammenfassung	41
3.5	Zusammenfassung und Zielsetzung	43
4	Weiterentwicklung der Mehr-Netz-Methode	45
4.1	Netzgenerierung	45
4.1.1	Einflüsse der Netzdefinition	45
4.1.2	Ringvernetzung durch Knotenprojektion	51
4.1.3	Ringvernetzung durch Elementverknüpfungen	55
4.1.4	Adaptive Vernetzung beim Schmieden / Walzen	56

4.2	Datenübertragung und Kontaktübertragung	60
4.2.1	Interpolation von Knotenwerten und Verschiebungsvektoren	60
4.2.2	Direkte Datenübertragung bei Connecting Element Vernetzung	61
4.2.3	Übertragung von Kontaktinformationen	61
4.3	Erweiterung um StrucSim	63
4.3.1	Datenübertragung über standardisierte Vektoren	63
4.3.2	Datenübertragung über anteilige Betrachtung	64
4.3.3	Kopplung mit Mehr-Netz Methode	65
4.4	Anwendungsbeispiele	68
4.4.1	Ringwalzen	68
4.4.2	Reckschmieden mit Gefügeberechnung	69
5	Automatische Modellerzeugung	73
5.1	Beschreibung der Werkzeugkinematik	73
5.1.1	A Priori-Beschreibung der Werkzeugkinematik	74
5.1.2	A Posteriori-Beschreibung der Werkzeugkinematik	77
5.2	Anpassung der Zeitschrittweite	80
6	Diskussion und Ausblick	85
6.1	Grenzen der Umsetzung	85
6.1.1	Grundsätzliche Grenzen der Mehr-Netz-Methode	85
6.1.2	Ungenauigkeiten in der Datenübertragung	86
6.1.3	Vernetzungsprobleme	87
6.2	Ausblick	88
6.2.1	Automatische Netzanalyse zur Neuvernetzung	88
6.2.2	Mehrdimensionale Definition der Umformzonen	89
6.2.3	Erweiterung zum Schmieden von Hohlwellen	90
7	Literaturverzeichnis	95
A	Programmcode	101
A.1	DSTPOS	101
A.2	DSSTICH	102
B	Kurzzusammenfassung	109