

**Methoden zur Auslegung von
robusten Prozessen in der Warmmassivumformung**

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.

Thomas Henke

aus Celle

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hirt
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke

Tag der mündlichen Prüfung: 26. Oktober 2015

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Umformtechnische Schriften

Band 176

Thomas Henke

**Methoden zur Auslegung von robusten Prozessen
in der Warmmassivumformung**

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.: 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 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 978-3-8440-4145-3

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

Danksagung

Acknowledgement

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bildsamer Formgebung (IBF) der RWTH Aachen. Ich danke der DFG für die Förderung des Exzellenzclusters „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“, in dessen Projektumfeld diese Arbeit entstand.

Prof. Dr.-Ing. G. Hirt, dem Institutsleiter des IBF, spreche ich meinen Dank aus für die Ermöglichung der Arbeit und seinen fordernden, fördernden und nachahmenswerten Führungsstil.

Ebenso bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. F. Klocke, dem Direktor des Werkzeugmaschinenlabors (WZL) der RWTH Aachen, für die Übernahme des Korreferats.

Für zahlreiche anregende Diskussionen bedanke ich mich bei meinen ehemaligen Kollegen, besonders bei Prof. Dr.-Ing. habil. M. Bambach. Den Herren M.Sc. S. Hojda und M.Sc. M. Teller danke ich darüber hinaus für die Durchsicht des Manuskripts sowie für die sprachliche und setzerische Korrektur. Herrn Dipl.-Inform. R. Rabindran danke ich besonders für seine versierten Anregungen in programmier-technischen Belangen.

Mein Dank gilt ebenso meinen zahlreichen studentischen Mitarbeitern sowie Studien- und Diplomarbeitern.

Größten Dank spreche ich den Herren H. Willems und A. Deserno aus dem Materialprüflabor, den Herren M. Poelmeyer, C. Seiffert, H. Schulz, G. Sauder und M. Bergen aus der mechanischen Werkstatt, den Herren J. Sieprath und M. Hamacher aus der Elektrowerkstatt sowie den Herren B.Sc. P. Hibbe und Dipl.-Ing. C. Kämper aus. Ohne ihre tatkräftige Unterstützung wären die praktischen Untersuchungen, die dieser Arbeit zugrunde liegen, nicht durchführbar gewesen.

Schließlich danke ich meinen Eltern, die meinen beruflichen Werdegang ermöglicht und stets unterstützt haben.

Aachen, im Oktober 2015

Thomas Henke

I Inhaltsverzeichnis

Contents

I	Inhaltsverzeichnis	3
II	Formelzeichen und Abkürzungen	6
1	Einleitung	9
2	Stand der Technik	11
2.1	Prozessauslegung in der Massivumformung	11
2.2	Reibung und Wärmetransport	14
2.2.1	Wärmeübergang	16
2.2.2	Reibung	18
2.3	Entwicklung von Fließspannung und Mikrostruktur	21
2.3.1	Dynamische Werkstoffeffekte	22
2.3.2	Statische Werkstoffeffekte	30
2.4	Methoden zur Berücksichtigung von Schwankungen in Prozessanalyse und -auslegung	32
2.4.1	Statistische Versuchsplanung	33
2.4.2	Monte-Carlo-Verfahren	33
2.4.3	Antwortflächenmethode	34
2.4.4	Sensitivitätsanalyse	34
2.4.5	Analyse von Schwankungen in der Warmmassivumformung	35
3	Zielsetzung und Vorgehensweise	38
4	Unsicherheiten bei der Prozessauslegung in der Warmmassivumformung 40	
4.1	Unsicherheiten im Prozessablauf	40
4.2	Unsicherheiten bei der Stoff- und Randwertermittlung	42
5	Ermittlung von Stoff- und Randwerten	45
5.1	Prozessunabhängige Stoffwerte	46
5.1.1	Thermisches Werkstoffverhalten - Stufe 1	46
5.1.2	Plastisches Werkstoffverhalten - Stufe 2	53

5.2	Prozessabhängige Randwerte	57
5.2.1	Emissionskoeffizient - Stufe 3	57
5.2.2	Wärmeübergangskoeffizient - Stufe 4	59
5.2.3	Reibfaktor - Stufe 5	65
5.3	Fazit	70
6	Parameterermittlung eines mikrostrukturbasierten Werkstoffmodells	71
6.1	Referenzmodell	72
6.1.1	Kornwachstum	72
6.1.2	Dynamische Rekristallisation	75
6.1.3	Zwischenfazit	83
6.2	Schwankungsbehaftetes Modell	85
6.2.1	Resampling-Verfahren	85
6.2.2	Kornwachstum	88
6.2.3	Dynamische Rekristallisation	95
6.3	Fazit	104
7	Werkstoffgerechte Auslegung eines Gesenkschmiedeprozesses	107
7.1	Herstellung gesenkgeschmiedeter Getriebekomponenten	107
7.2	Schmiedestrategie zur Herstellung eines geschmiedeten Kegelrades	109
7.2.1	Werkzeugkonzept und FE-Modell	109
7.2.2	Ermittlung sicherer Prozessparameter	113
7.3	Fazit	126
8	Analyse der Schwankungen in Prozessablauf- und Werkstoffverhalten ..	128
8.1	Identifikation und Quantifizierung der Prozessschwankungen	129
8.2	Vergleich von Realprozess und Referenzsimulation	133
8.3	Einflussanalyse der Schwankungen im Prozess	137
8.4	Einfluss der Schwankungen in der Mikrostrukturentwicklung	143
8.4.1	Analyse des Referenzprozesses	144
8.4.2	Analyse der Prozessschwankungen	145
8.5	Fazit	147
9	Zusammenfassung und Ausblick	149

III Literaturverzeichnis	155
IV Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	165