

**Einfluss von Materialinhomogenitäten
und ihren Veränderungen in einer
fertigungstechnischen Prozesskette
auf die Bauteilqualität**

Olaf Grohmann

BAND 78

Fertigungstechnik

Einfluss von Materialinhomogenitäten und ihren Veränderungen in einer fertigungstechnischen Prozesskette auf die Bauteilqualität

Vom Fachbereich Produktionstechnik
der
UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Wi.-Ing. Olaf Grohmann

Gutachter:
Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Heinzel, Universität Bremen
Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhfuß, Universität Bremen
Tag der mündlichen Prüfung: 21.06.2019

Forschungsberichte aus dem Leibniz-Institut für
Werkstofforientierte Technologien

Band 78

Olaf Grohmann

**Einfluss von Materialinhomogenitäten und ihren
Veränderungen in einer fertigungstechnischen
Prozesskette auf die Bauteilqualität**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

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.: Bremen, 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 978-3-8440-7106-1

ISSN 2626-658X

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 • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Trotz der stetigen Steigerung der Produktionsqualität und Wiederholbarkeit gibt es dennoch Effekte, die sich nur durch aufwendige werkstoffkundliche Untersuchungen erklären lassen. So zeigt sich in der industriellen Fertigung nach wie vor Verzug an hochentwickelten Bauteilen, der später mit viel Aufwand beseitigt werden muss oder hohe Kosten durch Ausfall des Bauteils verursacht. Daneben existieren Fälle, in denen das Material versagt und damit die Bauteil-Lebensdauer verkürzt, ohne dass es einen augenscheinlichen Grund dafür gegeben hätte. Die Analyse von Einzelprozessen und Prozessketten ist daher weiterhin nötig, um die Wechselwirkungen zwischen Material und Prozessgrößen zu identifizieren und die Einflussfaktoren auf den Verzug zu bewerten.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Berichte stellen die aktuellen Forschungsergebnisse der Hauptabteilung Fertigungstechnik im Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien dar. Diese Forschungsarbeiten befassen sich sowohl mit den grundlegenden Wirkzusammenhängen bei trennenden und umformenden Bearbeitungsverfahren, der Entwicklung ökonomisch (effizient) und ökologisch (umweltbewusst, nachhaltig) optimierter Fertigungsprozesse und –prozessketten als auch den ultrapräzisen Endbearbeitungsverfahren für innovative und hochgenaue Produkte der Optik und Mikrotechnik.

Vor diesem Hintergrund stellt diese Dissertation erstmals eine Prozesskette in einer einzelnen Simulationsumgebung unter Berücksichtigung von Materialinhomogenitäten dar und betrachtet die daraus resultierenden Abweichungen in Hinsicht auf die zu erreichende Bauteilqualität am Beispiel eines Lagerinnenrings.

Das in dieser Arbeit entwickelte Prozesskettenmodell zur Beurteilung vom Einfluss von Materialinhomogenitäten und ihren Veränderungen in einer fertigungstechnischen Prozesskette auf die Bauteilqualität entstand im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereichs SFB 570 "Distortion Engineering".

Danksagung

Die vorliegende Dissertationsschrift beruht auf den Ergebnissen, die neben meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IWT in Bremen, entstanden. Dem Leiter der Hauptabteilung Fertigungstechnik, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. E. Brinksmeier, gebührt mein herzlicher Dank für sein Vertrauen und seine unterstützende Förderung meiner Arbeiten. Des Weiteren danke ich besonders Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. C. Heinzel, der mich zunächst als Oberingenieur in den Projekten und auch in der Dissertationsschrift fachlich begleitete sowie betreute.

Dem Leiter des Bremer Instituts für Strukturmechanik und Produktionsanlagen (bime) der Universität Bremen, Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Kuhfuß, gilt mein besonderer Dank für die Übernahme des Korreferats. Für die Wahrnehmung des Vorsitzes in der Prüfungskommission danke ich zudem Frau Prof. Dr.-Ing. M. Petersen.

Für die kritische Durchsicht des Manuskripts und die konstruktiven Hinweise danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. R. M. Gläbe, Herrn Dr.-Ing. R. Rentsch und Dr.-Ing. Dipl.-Phys. J. Sölter. Mein ausdrücklicher Dank gilt allen Bürokollegen, die mich in meiner Zeit am IWT begleitet haben und allen weiteren Kollegen mit denen ich zusammenarbeiten durfte. Speziell Herr Dr.-Ing. R. Rentsch danke ich für die vielen netten und kritischen Diskussionen, Herrn Gorzawski für die schier unendliche gute Laune und Hilfsbereitschaft, die immer ansteckend und erfrischend war und Herrn Dr.-Ing. Dipl.-Phys. D. Stöbener für die stets hilfreichen Tipps, für die Zusammenarbeit und für die Motivation an den Wochenenden.

Zudem bedanke ich mich bei meiner Familie für das entgegengebrachte Vertrauen, der aufopferungsvollen Unterstützung und dass sie stetig an mich glaub(t)en. Vor allem Swantje gebührt dabei mein aufrichtiger Dank.

Teile der dieser Arbeit zugrunde liegenden Untersuchungen wurden im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 570 – Distortion Engineering finanziell gefördert. Hierfür bedanke ich mich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG).

Für Bibo und Tippsi

Inhaltsverzeichnis

Seite

Formelzeichen und Abkürzungen	a
1. Einleitung und Motivation	1
2. Stand der Kenntnisse	3
2.1 Urformverfahren des Wälzlagerstahls 100Cr6	4
2.2 Herstellung und Einsatz von Wälzlagern	6
2.3 Untersuchungen zum Verzug	12
2.3.1 Methoden zur Verzugsidentifikation	12
2.3.2 Erkenntnisse zu Materialanalysen	14
2.3.3 Verzugspotenziale der einzelnen Prozesse	18
2.3.3.1 Induktionserwärmung	18
2.3.3.2 Abscheren / Sägen (Trennen) der Stangenabschnitte	18
2.3.3.3 Warmumformung	21
2.3.3.4 Drehen	22
2.3.3.5 Wärmebehandlung	23
2.4 Simulation und Modellbildung	25
2.4.1 Prozessketten	27
2.4.2 Schadenskriterien	29
2.4.3 Verzug	30
2.4.4 Gefügeumwandlung	34
Fazit	36
3. Zielsetzung und Vorgehensweise	38
4. Methoden	41
4.1 Statistische Werkzeuge	41
4.2 Rundheitsauswertung durch die Fourier-Transformation	43
4.3 Finite-Elemente-Methode (FEM)	46
4.4 Schwingungsmessung	47
4.5 Eigenspannungsmessung	48
5. Analyse der Prozesskette	49
5.1 Analyse des Ausgangsmaterials	49
5.1.1 Chemische Zusammensetzung des Eingangsmaterials	49
5.1.2 Ergebnisse von Jominy-Versuchen	50
5.1.3 Karbidnetzwerk und Karbidzeitigkeit	51
5.1.4 Baumann-Abdruck	53
5.1.5 Analyse unterschiedlicher Materialeigenschaften	53

Fazit	55
5.2 Analyse der Fertigungsstrategien	55
5.2.1 Abscheren	57
5.2.2 Stauchen	59
5.2.3 Gesenkschmieden und Lochen	61
5.2.4 Walzversuche zur Untersuchung der Kernseigerung	64
5.2.5 Zerspanung und Spanntechnik	66
5.2.5.1 Abstechdrehen im Laborumfeld	66
5.2.5.2 Drehen und Spanstrategie	68
5.2.5.3 Spannstrategie	69
5.2.6 Einfluss der Materialinhomogenität in der Wärmebehandlung	72
Fazit	73
5.3 Experimentelle Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Prozesskette	74
5.3.1 Statistische Auswertung der Rundheitsmessung	75
5.3.2 Statistische Auswertung der Radiusschwankungen	79
5.3.3 Bewertung der Prozesskette anhand von Materialanalysen	80
Fazit	83
5.4 Diskussion	84
6. Modellentwicklung zur Prozesskette unter Berücksichtigung von Inhomogenitäten	86
6.1 Simulationen an Werkstücken mit Materialinhomogenitäten	88
6.1.1 2D-Simulation: Untersuchung des Einflusses der Seigerungen	89
6.1.2 3D-Simulation: Untersuchung des Einflusses der Kernseigerung	92
6.1.3 Vergleich von Umformkraft und Umformarbeit	101
Fazit	104
6.2 Vergleich der Simulationsergebnisse mit den experimentellen Untersuchungen	105
Fazit	119
6.3 Diskussion	120
7. Zusammenfassung und Ausblick	122
8. Literatur	125
9. Anhang	I

Formelzeichen und Abkürzungen

<i>Formelzeichen</i>	<i>Bedeutung</i>	<i>Einheit</i>
A	Fläche	mm ²
a _p	Schnitttiefe	mm
a _k	Fourier-Koeffizienten	-
b _k	Fourier-Koeffizienten	-
C	dynamische Tragfähigkeit des Lagers	kN
D _L	Durchmesser der Laufbahn	mm
D _{Brozzo}	Schädigungsparameter	-
D	Durchmesser	mm
F _{id}	Umformanteil	N
F _R	Reibanteil	N
F _z	Zerspangkraft	N
f	Vorschub	mm
F	Frequenz	s ⁻¹
H	Höhe	mm
h _B	Bruchflächenhöhe	mm
h _E	Kanteneinzugshöhe	mm
h _S	Glattschnitthöhe	mm
K	Fourier-Ordnung	-
k _f	Fließspannung	N/mm ²
k _{f, homo}	Fließspannung mit homogenen Materialeigenschaften	N/mm ²
k _{f, Kern}	Fließspannung im Kern	N/mm ²
k _{fm}	mittlere Fließspannung	N/mm ²
L	nominelle Lagerlebensdauer (entspricht L10)	10 ⁶
L ₁₀	Lebensdauer bei einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 10 %	10 ⁶
L _h	nominelle Lebensdauer in Stunden analog L	h
M _s	Martensitstarttemperatur	°C
M _{s0}	Ausgangsmartensitstarttemperatur	°C

Formelzeichen und Abkürzungen

n	Drehzahl	min^{-1}
P	dynamisch äquivalente Lagerbelastung	kN
p	Lebensdauerexponent der Überrollung	-
$R(\varphi)$	Umfangswinkel	$^{\circ}$
R_{ONt}	Rundheit	mm
r_0	Ausgangsradius	mm
r_0	Konstante des mittleren Kreisradiuses	mm
r_{ε}	Schneideckenradius	mm
$r_{\text{au\ss}en}$	Au\ss enradius	mm
r_{innen}	Innenradius	mm
T_{krit}	kritische Temperatur	$^{\circ}\text{C}$
v_c	Schnittgeschwindigkeit	m/min
W	Umformarbeit	Nm
y	Amplitude	μm
α	Freiwinkel	$^{\circ}$
γ	Spanwinkel	$^{\circ}$
Δs	Spannweg	μm
ε	Dehnung	-
ζ_m	Volumenanteil Martensit	%
κ	Einstellwinkel	$^{\circ}$
λ	Neigungswinkel	$^{\circ}$
μ	Reibkoeffizient	-
σ_1	1. (maximale) Hauptspannung	MPa
$\bar{\sigma}$	Vergleichsspannung, Spannungsabweichung	MPa
$\bar{\sigma}_t$	tangentiale Eigenspannung	MPa
σ_m	hydrostatische (mittlere) Spannung	MPa
σ_v	Vergleichsspannung	MPa

φ	Umformgrad	-
φ	Umfangswinkel	°
φ_v	Vergleichsumformgrad	-
$\varphi_{v,Br}$	Vergleichsumformgrad bis zum Bruch	-
$\dot{\varphi}$	Umformgeschwindigkeit	s ⁻¹
$\dot{\varphi}_m$	mittlere Umformgeschwindigkeit	s ⁻¹
ψ_{1-4}	werkstoffliche Faktoren	-

Abkürzungen *Bedeutung*

Brickmesh	Elemente
CN	Karbidnetzwerk
CZ	Karbidzeitigkeit
ESP	Eigenspannungen
FEM	Finite-Elemente-Methode
GKZ	Weichgeglüht auf kugeligen Zementit
HT	Heat Treatment (Wärmebehandlung)
MnS	Mangansulfide
Remesh	Neuvernetzung der Elemente bei großer Umformung
SFB	Sonderforschungsbereich
Tetraeder- mesh	Vernetzung mit Elementen, die vier dreieckige Seitenflächen (Pyramide) aufweisen