



**Forschungsberichte aus dem**  
Leibniz-Institut für  
Werkstofforientierte  
Technologien  
**IWT** Bremen

# Einfluss des Herstellungsverfahrens und der Wärmebehandlung auf das Verzugsverhalten unter- schiedlicher Bauteilgeometrien

Dawid Nadolski

# **Einfluss des Herstellungsverfahrens und der Wärmebehandlung auf das Verzugsverhalten unterschiedlicher Bauteilgeometrien**

Vom Fachbereich Produktionstechnik

der

UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte

**Dissertation**

von

Dipl.-Ing. Dawid Nadolski

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Franz Hoffmann (Universität Bremen)

Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Keßler (Universität Rostock)

Tag der mündlichen Prüfung: 30.08.2018



Forschungsberichte aus dem Leibniz-Institut für  
Werkstofforientierte Technologien

Band 74

**Dawid Nadolski**

**Einfluss des Herstellungsverfahrens und  
der Wärmebehandlung auf das Verzugsverhalten  
unterschiedlicher Bauteilgeometrien**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag  
Aachen 2018

**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., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6313-4

ISSN 2626-658X

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**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien – IWT (ehemals Stiftung Institut für Werkstofftechnik) in Bremen. Die wesentlichen Grundlagen zu dieser Arbeit stellen die beiden IGF-Forschungsvorhaben „Analyse der Wirkzusammenhänge zwischen Wärmebehandlung und Verzug von Kaltmassivumformteilen“ und „Gezielte Prozesssteuerung bei der Kaltmassivumformung und Wärmebehandlung zur Minimierung des Verzugs“ dar, welche in Kooperation mit dem Institut für Umformtechnik und Leichtbau der TU Dortmund bearbeitet wurden.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Franz Hoffmann für die langjährige Betreuung meiner Arbeiten, seine fachliche und persönliche Unterstützung sowie das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Dr.-Ing. Alwin Schulz danke ich für seine Unterstützung und für die konstruktive Kritik. Die vielen Diskussionen mit ihm haben sich stets positiv auf den Fortgang der Arbeit ausgewirkt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Keßler danke ich für die wissenschaftliche Betreuung als Zweitgutachter.

Zudem möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch für die Möglichkeit zur Durchführung der Untersuchungen und die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bedanken.

Gleichzeitig gilt mein besonderer Dank den Damen und Herren der Metallographie, der Werkstatt, der Härtereie und der physikalischen Analytik sowie den Studierenden Frau Eliza Djumalieva und Herrn Marcel Weigand. Sie haben durch ihre Unterstützung entscheidend zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Am IWT ist mir stets aus allen Abteilungen große Unterstützung durch meine wissenschaftlichen Kollegen entgegengebracht worden. Besonders hervorheben möchte ich hierbei Frau M.Sc. Anastasiya Tönjes, Herrn Dr.-Ing. Holger Surr, Herrn Dr. rer. nat. Friedhelm Frerichs, Herrn Dr.-Ing. Martin Hunkel, Herrn M.Sc. Jwalant Kagathara und Herrn M.Sc. Marian Skalecki. Für die angenehme Arbeitsatmosphäre und ihre Unterstützung bei der Interpretation der Ergebnisse möchte ich mich zudem insbesondere bei meinen Bürokollegen Herrn Dipl.-Ing. Jörg Franke und Herrn Dipl.-Ing. Peter Saddei bedanken.

Allen beteiligten Projektpartnern gilt mein Dank für die angenehme und produktive Zusammenarbeit. Besonders den Projektbearbeitern Herrn Dr.-Ing. Stephan Hänisch, Herrn Dipl.-Ing. Stefan Ossenkemper und Herrn Dipl.-Ing. Oliver Hering vom Institut

für Umformtechnik und Leichtbau möchte ich für die sehr gute Zusammenarbeit danken. Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya für die vielen interessanten Diskussionen und Anregungen im Rahmen der beiden Forschungsvorhaben sowie für das Mitwirken am Prüfungsausschuss.

Ein herzlicher Dank geht an die weiteren Mitglieder des Prüfungsausschusses Frau M.Sc. Lena Cramer und Herrn Lucas Chwolka.

Zusätzlich danke ich Frau Belinda Schicks und Herrn Eduard Schneider für das Korrekturlesen der Arbeit und für die vielen hilfreichen Anregungen.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b> .....	<b>3</b>
2.1	Fertigungsverfahren .....	3
2.1.1	Zerspanen .....	3
2.1.2	Kaltmassivumformung .....	5
2.1.2.1	Voll-Vorwärts-Fließpressen .....	7
2.1.2.2	Werkstoffzustand nach der Kaltmassivumformung .....	8
2.2	Wärmebehandlungsverfahren .....	9
2.2.1	Spannungsarm-, Erholungs- und Rekristallisationsglühen .....	9
2.2.2	Induktives Randschichthärten .....	14
2.2.3	Einsatzhärten .....	15
2.3	Fertigungsabweichungen und Verzug .....	16
2.3.1	Einflussgrößen auf den Verzug .....	18
2.3.1.1	Bauteilgeometrie .....	18
2.3.1.2	Werkstoff .....	20
2.3.1.3	Eigenspannungen .....	22
2.3.1.4	Wärmebehandlung .....	24
<b>3</b>	<b>Zielsetzung und Versuchsprogramm</b> .....	<b>28</b>
<b>4</b>	<b>Versuchsdurchführung</b> .....	<b>31</b>
4.1	Einfach abgesetzte Wellen.....	31
4.1.1	Werkstoff .....	31
4.1.2	Voll-Vorwärts-Fließpressen .....	31
4.1.3	Zerspanprozess .....	34
4.1.4	Wärmebehandlung .....	36
4.1.4.1	Induktionshärten .....	36
4.1.5	Versuchsplan .....	37
4.2	Zweifach abgesetzte Wellen .....	38
4.2.1	Werkstoff .....	38
4.2.2	Voll-Vorwärts-Fließpressen .....	38
4.2.3	Zerspanprozess .....	40
4.2.4	Wärmebehandlung .....	41
4.2.4.1	Spannungsarmglühen .....	41
4.2.4.2	Aufkohlen und Abschrecken (Einsatzhärten) .....	42
4.2.4.3	Aufkohlen und langsam Abkühlen .....	43
4.2.4.4	Blindhärten .....	44
4.2.5	Versuchsplan .....	44



<b>5</b>	<b>Untersuchungsmethoden</b> .....	<b>46</b>
5.1	Bestimmung der chemischen Zusammensetzung .....	46
5.2	Härteprüfung .....	46
5.3	Gefügeuntersuchungen .....	46
5.4	Fließkurvenermittlung .....	46
5.5	Koordinatenmessung .....	47
5.6	Eigenspannungsmessungen .....	50
5.7	Dilatometerversuche .....	50
5.8	Transmissionselektronenmikroskopische Untersuchungen .....	52
5.9	Dichtebestimmung .....	53
5.10	Dynamische Differenzkalorimetrie .....	54
<b>6</b>	<b>Charakterisierung der Werkstoffe</b> .....	<b>56</b>
6.1	Chemische Zusammensetzung .....	56
6.2	Härte im Ausgangszustand .....	56
6.3	Ausgangsgefüge .....	57
6.4	Fließkurven .....	59
<b>7</b>	<b>Ergebnisse einfach abgesetzter Wellen</b> .....	<b>61</b>
7.1	Presskräfte .....	61
7.2	Metallographische Untersuchungen .....	62
7.2.1	Fertigungszustand .....	62
7.2.2	Wärmebehandlung .....	64
7.3	Fertigungsabweichungen .....	68
7.4	Eigenspannungsmessungen .....	72
7.4.1	Fertigungseigenspannungen .....	72
7.4.2	Eigenspannungen nach dem Induktionshärten .....	75
7.5	Maßänderungen .....	76
7.6	Formänderungen .....	81
<b>8</b>	<b>Ergebnisse zweifach abgesetzter Wellen</b> .....	<b>86</b>
8.1	Presskräfte .....	86
8.2	Metallographische Untersuchungen .....	87
8.2.1	Fertigungszustand .....	87
8.2.2	Wärmebehandlung .....	90
8.3	Fertigungsabweichungen .....	97
8.4	Eigenspannungsmessungen .....	99
8.4.1	Fertigungseigenspannungen .....	99
8.4.2	Eigenspannungen nach der Glühbehandlung .....	101

8.5	Maßänderungen .....	105
8.5.1	Spannungsarmglühen .....	105
8.5.1.1	Einfluss der Glühtemperatur.....	107
8.5.2	Aufkohlen und Abschrecken (Einsatzhärten) .....	109
8.5.3	Aufkohlen und langsam Abkühlen .....	112
8.5.4	Blindhärten .....	114
8.6	Formänderungen.....	116
8.7	Dilatometerversuche .....	117
8.8	Transmissionselektronenmikroskopische Untersuchungen.....	129
8.9	Dichtebestimmung.....	131
8.10	Dynamische Differenzkalorimetrie.....	132
<b>9</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>135</b>
9.1	Fertigungsabweichungen .....	135
9.2	Maß- und Formänderungen .....	137
9.2.1	Einfluss der Bauteilgeometrie.....	138
9.2.2	Einfluss des Herstellungsverfahrens .....	138
9.2.3	Einfluss der Umformparameter .....	152
9.2.4	Einfluss des Wärmebehandlungsverfahrens .....	153
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>156</b>
<b>11</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>158</b>
<b>12</b>	<b>Symbol- und Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>159</b>
<b>13</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>163</b>
<b>14</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>178</b>
14.1	Umformwerkzeuge .....	178
14.2	Beschichtung der Rohteile .....	180
14.3	Niederdruckaufkohlen .....	180
14.4	Formänderungen.....	182