

**Empirische Methode zur  
schnellen Charakterisierung von  
Wärmebehandlungszuständen  
hochfester Aluminiumlegierungen**

Anastasiya Tönjes

**BAND 77**

**Werkstofftechnik**

**Empirische Methode zur schnellen  
Charakterisierung von  
Wärmebehandlungszuständen hochfester  
Aluminiumlegierungen**

Vom Fachbereich Produktionstechnik  
der  
UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades  
Doktor-Ingenieur  
genehmigte

Dissertation

von

M. Sc. Anastasiya Tönjes

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch  
Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Keßler (Universität Rostock)

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Oktober 2019



Forschungsberichte aus dem Leibniz-Institut für  
Werkstofforientierte Technologien

Band 77

**Anastasiya Tönjes**

**Empirische Methode zur schnellen Charakterisierung  
von Wärmebehandlungszuständen hochfester  
Aluminiumlegierungen**

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 978-3-8440-7059-0

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Abteilung Leichtbauwerkstoffe der Hauptabteilung Werkstofftechnik am Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien - IWT in Bremen (ehemals Stiftung Institut für Werkstofftechnik). Die Grundlagen zu dieser Arbeit entstanden im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e. V. (AiF) geförderten Projekt „Simulation der mechanischen Eigenschaften wärmebehandelter Aluminiumlegierungen“ (SiWAI) und im Teilprojekt U03 „Thermische und thermomechanische Wärmebehandlung“ des Sonderforschungsbereichs 1232 „Farbige Zustände“, der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziert wird.

Ein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch, der meinen gesamten wissenschaftlichen Werdegang an der Universität Bremen von Anfang an gefördert hat.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Keßler danke ich für die Übernahme des Korreferates und für die zahlreichen Ratschläge zum Thema Kalorimetrie.

Ich bedanke mich ganz herzlich bei meinem Kollegen Dr.-Ing. Nils Ellendt für seine unermüdliche Unterstützung, stete Hilfsbereitschaft, spannendsten Ideen und seine ansteckende Lebensfreude.

Darüber hinaus möchte ich mich bei meiner Mentorin Frau Prof. Dr.-Ing. Kirsten Tracht für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes sowie für die zahlreichen hilfreichen persönlichen Gespräche bedanken.

Bei meinem Abteilungsleiter Dr.-Ing. Axel von Hehl möchte ich mich insbesondere für eine außerordentlich familienfreundliche Führung sowie die hilfreichen Tipps und Anregungen bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Mädler danke ich für sein Vertrauen und seine Förderung innerhalb des Sonderforschungsbereiches 1232.

Ebenfalls danke ich vielen IWT Kollegen aus unterschiedlichen Abteilungen für die Unterstützung und angenehme Zusammenarbeit. Herrn Dr.-Ing. Holger Surm danke ich für die Hilfe beim Einstieg in die statistischen Versuchspläne und die Regressionsanalyse sowie für die zahlreichen hilfreichen, ehrlichen und direkten Ratschläge und Anregungen. Meiner Bürokollegin Annika Repenning möchte ich für

die zahlreichen Diskussionen und ihre Vorarbeiten, die das Projekt SiWAL erst möglich gemacht haben, danken. Heike Sonnenberg danke ich für die aufmunternden Gespräche, hilfreichen Tipps und für das Mitwirken im Prüfungsausschuss. Bei Lena Heemann, Daniel Knoop, Dr.-Ing. Marian Georg Skalecki und Belinda Schicks möchte ich mich für das Korrekturlesen und die vielen hilfreichen Anregungen bedanken. Außerdem möchte ich Lena Cramer für die leider recht kurze, aber sehr emotionale, lustige und spannende Zusammenarbeit danken.

Meiner rund um die Uhr erreichbaren Statistik-Hotline Christina Plump danke ich für ihre Hilfsbereitschaft und Geduld.

Mein Dank geht auch an meine studentischen Hilfskräfte. Max Fricke danke ich für die langjährige zuverlässige Unterstützung, Koordination der Versuche während meiner Schwangerschaft und Elternzeit sowie für die zahlreichen Messungen und Auswertungen. Bei Fany Bowt möchte ich mich für ihre Geduld bei den monotonen Auswertarbeiten bedanken.

Mein besonderer Dank gilt allen an dieser Arbeit beteiligten technischen Mitarbeiter\*innen für die Hilfsbereitschaft, Probenfertigung, Durchführung der Versuche und die zahlreichen Analysen. Hier möchte ich mich insbesondere bei Karin Busch, Ingo Bunjes, Carolin Cyron, Martin Engel, Christian Fried, Silke Geißler, Andreas Grohnert, Daniel Hallmann, Marein Köhlenbeck-Duda, Jörg Lambertus, Petra Meier, Peter Rathjen, Jörg Reichert, Martina Rickers, Enno Schirmer, Karl-Hayung Siebels, Fin Walter und Rainer Willenbrock bedanken.

Zum Schluss möchte ich mich ganz herzlich bei meiner Familie bedanken. Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern Olga und Andrey, die mich auf meinem Lebensweg immer begleitet und unterstützt haben. Meinem Mann Christian möchte ich vor allem für seine unendliche Geduld danken. Ohne seine Rückendeckung oder auch ermunternden Worte wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Meiner Tochter Silvia danke ich für ihre Hartnäckigkeit beim Einfordern meiner Aufmerksamkeit, wodurch ich die liebevollen Erholungspausen genießen konnte. Bei meinem Bruder Dr.-Ing. Fedor Egorov möchte ich mich für das Aufzeigen des Promotionsweges sowie seine Unterstützung am Anfang meines wissenschaftlichen Werdegangs bedanken. Frau Sonja Tönjes danke ich für das Korrekturlesen meiner Arbeit und dessen sprachliche Bereicherung aus einem anderen Blickwinkel.

**Inhaltsverzeichnis**

<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Kenntnisstand .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Aluminiumlegierungen .....</b>	<b>3</b>
2.1.1 Grundlagen zur Wärmebehandlung von Al-Legierungen .....	3
2.1.2 Legierungssystem Al-Mg-Si (6xxx) .....	6
<b>2.2 Charakterisierung der Wärmebehandlungszustände der aushärtbaren Al-Legierungen .....</b>	<b>10</b>
2.2.1 Härteprüfung .....	10
2.2.2 Zugversuch .....	11
2.2.3 Elektrische Leitfähigkeit .....	13
2.2.4 Dynamische Differenzkalorimetrie .....	14
2.2.5 Lichtmikroskopie, Elektronenmikroskopie und röntgenographische Charakterisierung .....	15
<b>2.3 Methoden zur Berechnung der mechanischen Eigenschaften der Al-Legierungen .....</b>	<b>16</b>
<b>2.4 Statistische Versuchsplanung .....</b>	<b>21</b>
2.4.1 Begriffe der statistischen Versuchsplanung .....	21
2.4.2 Versuchspläne .....	21
2.4.3 Regressionsmodell .....	23
<b>3 Problemstellung, Zielsetzung und Lösungsansätze .....</b>	<b>26</b>
<b>4 Experimente .....</b>	<b>28</b>
<b>4.1 Versuchsplanung .....</b>	<b>28</b>
4.1.1 Statistische Versuchsplanung .....	28
4.1.2 Untersuchte Aluminiumlegierungen und Probengeometrien .....	31
4.1.3 Vollständiger Versuchs- und Probenplan .....	34
<b>4.2 Versuchsdurchführung .....</b>	<b>37</b>
4.2.1 Wärmebehandlung .....	37
4.2.2 Jominy-Versuche .....	38
4.2.3 Härteprüfungen .....	39
4.2.4 Mikrohärteprüfungen .....	41
4.2.5 Zugversuche .....	42
4.2.6 Elektrische Leitfähigkeitsmessungen .....	44

4.2.7	Dynamische Differenzkalorimetrie .....	45
4.2.8	Lichtmikroskopie .....	46
<b>5</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>47</b>
<b>5.1</b>	<b>Auswertung und Interpretation der Messdaten .....</b>	<b>47</b>
5.1.1	Temperaturmessungen .....	47
5.1.2	Jominy-Versuche .....	51
5.1.3	Härteprüfungen .....	52
5.1.4	Mikrohärteprüfungen .....	57
5.1.5	Zugversuche .....	60
5.1.6	Elektrische Leitfähigkeitsmessungen .....	64
5.1.7	Dynamische Differenzkalorimetrie .....	70
5.1.8	Lichtmikroskopie .....	74
5.1.9	Diskussion der experimentellen Ergebnisse .....	78
<b>5.2</b>	<b>Modellbildung .....</b>	<b>81</b>
5.2.1	Regressionsmodell für die Flach- und Mesoproben ( $M_{\text{diskr}}$ ) .....	83
5.2.2	Regressionsmodell ohne diskreten Größen ( $M_{\text{kont}}$ ) .....	101
<b>5.3</b>	<b>Anwendbarkeit und Grenzen .....</b>	<b>115</b>
5.3.1	Prüfung der Anwendbarkeit des Modells auf Mikroproben .....	115
5.3.2	Prüfung der Anwendbarkeit des Modells auf Demonstratorbauteile .....	117
5.3.3	Bewertung der Methode .....	121
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>126</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>130</b>
<b>8</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>140</b>
<b>8.1</b>	<b>Probenabmessungen .....</b>	<b>140</b>
<b>8.2</b>	<b>Messdaten .....</b>	<b>143</b>
<b>8.3</b>	<b>Regressionsanalyse .....</b>	<b>144</b>