

**Universität
Rostock**



Traditio et Innovatio

**Forschungsberichte
des Lehrstuhls für
Werkstofftechnik der
Universität Rostock**



**Untersuchungen zur Wärmebehand-
lung additiv gefertigter, metallischer
Bauteile auf Basis von in-situ
Analysen der Phasenumwandlungen**

Christian Rowolt

Band 10

**SHAKER
VERLAG**

Untersuchungen zur Wärmebehandlung additiv gefertigter, metallischer Bauteile auf Basis von in-situ Analysen der Phasenumwandlungen

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) der Fakultät für Maschinenbau
und Schiffstechnik der Universität Rostock.

*vorgelegt von Christian Rowolt
geboren am 20.10.1988 in Rostock*

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Keßler

Universität Rostock
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Lehrstuhl für Werkstofftechnik

Prof. Dr.-Ing. habil. Mirko Schaper

Universität Paderborn
Fakultät für Maschinenbau
Lehrstuhl für Werkstoffkunde

Abgabe: 20.05.2020 | Verteidigung: 12.10.2020

Forschungsberichte des Lehrstuhls für Werkstofftechnik der
Universität Rostock

Band 10

Christian Rowolt

**Untersuchungen zur Wärmebehandlung additiv
gefertigter, metallischer Bauteile auf Basis von
in-situ Analysen der Phasenumwandlungen**

Shaker Verlag
Düren 2021

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.: Rostock, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7842-8

ISSN 2192-0729

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

„Beurteile einen Menschen lieber nach seinen Handlungen als nach seinen Worten; denn viele handeln schlecht und sprechen vortrefflich.“

Matthias Claudius

Kurzfassung

Das selektive Laserstrahlschmelzen gehört zu den additiven Fertigungsverfahren und ist in die Gruppe der Urformverfahren einzuordnen. Die additiven Fertigungsverfahren bieten im Vergleich zu konventionellen Methoden einzigartige Möglichkeiten in der Herstellung komplexer, dreidimensionaler Bauteile. Durch den schichtweisen Aufbau der Bauteile ist eine endkonturnahe Fertigung in einem Fertigungsschritt möglich, womit eine aufwendige, mechanische Nachbearbeitung entfällt. Gleichzeitig ergeben sich weitere Vorteile hinsichtlich Leichtbaukonstruktion, Funktionsintegration oder einem hohen Grad an Materialausnutzung. Die laserstrahlgeschmolzenen Werkstoffstrukturen metallischer Werkstoffe und damit ihre mechanischen Eigenschaften können mit einer nachfolgenden Wärmebehandlung, wie z. B. dem Spannungsarmglühen, dem Härten und Anlassen von Stählen oder dem Ausscheidungshärten von Aluminiumlegierungen, gezielt beeinflusst werden. Allgemeine Richtlinien, speziell für die Wärmebehandlung laserstrahlgeschmolzener, metallischer Bauteile, existieren bislang nicht oder werden aus dem Stand der Technik für den konventionell hergestellten Werkstoff abgeleitet. Das Gefüge von laserstrahlgeschmolzenem Werkstoff unterscheidet sich jedoch deutlich von konventionell hergestelltem Material. Dies wiederum hat einen signifikanten Einfluss auf den Erfolg einer Wärmebehandlung. Während konventionell hergestellte, metallische Werkstoffe häufig mit relativ groben Ausgangsgefügen wärmebehandelt werden, liegen nach dem Laserstrahlschmelzen eher feine, besonders rasch erstarrte Gefüge vor, die deutlich andere Wärmebehandlungsparameter erfordern. Für additiv gefertigte Bauteile aus der Aluminiumgusslegierung AlSi10Mg und dem ausscheidungshärtenden Stahl X5CrNiCuNb16-4 wurden in der vorliegenden Arbeit mit Hilfe systematischer Experimente spezifische, auf das laserstrahlgeschmolzene Gefüge zugeschnittene Wärmebehandlungsparameter entwickelt. Dafür wurden mechanische Kennwerte in Zugversuchen, Kerbschlagbiegeversuchen und Härteprüfungen in unterschiedlichen Wärmebehandlungszuständen ermittelt. Zusätzlich wurde der Effekt unterschiedlicher Wärmebehandlungen auf die Mikrostruktur untersucht. Darüber hinaus wurde das Auflösungs- und Ausscheidungsverhalten der beiden Werkstoffe AlSi10Mg und X5CrNiCuNb16-4 in-situ mittels Kalorimetrie sowie Dilatometrie umfangreich analysiert. Aus den gewonnenen Ergebnissen konnten so neue Wärmebehandlungsstrategien für laserstrahlgeschmolzene Werkstoffe abgeleitet werden.

Abstract

Selective laser beam melting belongs to the additive manufacturing processes and can be classified in the group of primary forming processes. Compared to conventional methods, additive manufacturing processes offer unique possibilities in the production of complex, three-dimensional components. Due to the layer-by-layer structure of the components, near-net-shape production is possible in a single manufacturing step, which eliminates the need for costly mechanical post-processing. At the same time, there are further advantages in terms of lightweight construction, functional integration or a high degree of material utilization. The laser beam melted material structures of metallic materials and thus their mechanical properties can be specifically influenced by subsequent heat treatment, such as stress-relief annealing, hardening and tempering of steels or precipitation hardening of aluminium alloys. General guidelines, especially for the heat treatment of laser beam melted metallic components, do not exist so far or are derived from the state of the art for the conventionally produced material. However, the microstructure of laser beam melted material differs significantly from conventionally produced material. This in turn has a significant influence on the success of a heat treatment. While conventionally produced metallic materials are often heat treated with relatively coarse initial microstructures, there are rather fine, particularly rapidly solidified microstructures after laser beam melting, which require significantly different heat treatment parameters. For additively manufactured components made of the aluminium casting alloy AlSi10Mg and the precipitation hardening steel X5CrNiCuNb16-4, specific heat treatment parameters tailored to the laser beam melted microstructure were developed in the present work with the aid of systematic experiments. For this purpose mechanical parameters were determined in tensile tests, notched bar impact tests and hardness tests in different heat treatment conditions. In addition, the effect of different heat treatments on the microstructure was investigated. Furthermore, the dissolution and precipitation behavior of the two materials AlSi10Mg and X5CrNiCuNb16-4 was extensively analysed in-situ by calorimetry and dilatometry. From the results obtained, new heat treatment strategies for laser beam melted materials could be derived.

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik.....	7
2.1	Laser-Beam-Melting.....	7
2.2	Wärmebehandlung konventionell hergestellter Bauteile	11
2.2.1	Aluminiumlegierung AlSi10Mg.....	11
2.2.2	Stahl X5CrNiCuNb16-4	16
2.3	Wärmebehandlung additiv gefertigter Bauteile	22
2.3.1	Aluminiumlegierung AlSi10Mg.....	22
2.3.2	Stahl X5CrNiCuNb16-4	27
3	Werkstoffe und Methoden	31
3.1	Untersuchte Werkstoffe	31
3.1.1	Aluminiumlegierung AlSi10Mg.....	31
3.1.2	Stahl X5CrNiCuNb16-4	32
3.2	Parameter der additiven Fertigung.....	34
3.2.1	Aluminiumlegierung AlSi10Mg.....	34
3.2.2	Stahl X5CrNiCuNb16-4	37
3.3	Untersuchte Wärmebehandlungen	39
3.4	Verwendete Methoden.....	40
3.4.1	Dynamische Differenzkalorimetrie	40
3.4.2	Dilatometrie	55
3.4.3	Mikrostrukturelle Untersuchungen	61
3.4.4	Härteprüfung	63
3.4.5	Zugversuch.....	63
3.4.6	Kerbschlagbiegeversuch	65
4	Ergebnisdarstellung und Diskussion zu AlSi10Mg	67
4.1	Zustand wie gebaut und nach Standardwärmebehandlung	67
4.1.1	Metallografie	67

4.1.2	Härteprüfung.....	72
4.1.3	Zugversuch.....	74
4.2	In-situ Analyse von Phasenumwandlungen.....	76
4.2.1	Erwärmversuche.....	76
4.2.2	Lösungsglühversuche.....	82
4.2.3	Abkühlversuche.....	89
4.2.4	Versuche zur Direktauslagerung.....	96
4.3	Festgelegte Parameter für angepasste Wärmebehandlungen.....	98
4.4	Zustand nach angepasster Wärmebehandlung.....	99
4.4.1	Metallografie.....	99
4.4.2	Härteprüfung.....	101
4.4.3	Zugversuch.....	102
4.4.4	Schlussfolgerungen.....	103
5	Ergebnisdarstellung und Diskussion zu X5CrNiCuNb16-4.....	105
5.1	Zustand wie gebaut und nach Standardwärmebehandlung.....	105
5.1.1	Metallografie.....	105
5.1.2	Härteprüfung.....	108
5.1.3	Zugversuch.....	109
5.1.4	Kerbschlagbiegeversuch.....	112
5.2	In-situ Analyse von Phasenumwandlungen.....	113
5.2.1	Erwärmversuche.....	113
5.2.2	Abkühlversuche.....	122
5.2.3	Mikrostrukturuntersuchungen.....	136
5.2.4	Versuche zur Direktauslagerung.....	147
5.3	Festgelegte Parameter für angepasste Wärmebehandlungen.....	150
5.4	Zustand nach angepasster Wärmebehandlung.....	151
5.4.1	Metallografie.....	151

5.4.2	Härteprüfung	153
5.4.3	Zugversuch.....	154
5.4.4	Kerbschlagbiegeversuch	157
5.4.5	Schlussfolgerungen	158
5.5	Vergleich unterschiedlicher Chargen und Baujobs	159
5.5.1	In-situ Charakterisierung von Phasenumwandlungen	162
5.5.2	Metallografie.....	165
5.5.3	Härteprüfung	169
5.5.4	Zugversuch.....	170
6	Zusammenfassung.....	173
	Selbständigkeitserklärung.....	I
	Literaturverzeichnis	II
	Anhang	XII
A.	Abkürzungsverzeichnis	XII
B.	Symbolverzeichnis.....	XII
C.	Abbildungsverzeichnis	XIV
D.	Tabellenverzeichnis	XXII
E.	Betreute studentische Arbeiten im Rahmen der Promotion	XXIII
	Danksagung	XXIV
	Akademischer Lebenslauf	XXVII