

Alexander Sieger

# Mikrostrukturausprägung additiv gefertigter Gitterstrukturen

Forschungsberichte des  
Direct Manufacturing Research Centers

23



**DMRC**  
DIRECT MANUFACTURING RESEARCH CENTER



**LWK**  
Lehrstuhl  
für Werkstoffkunde

# **Mikrostrukturausprägung additiv gefertigter Gitterstrukturen**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)  
der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Paderborn

genehmigte  
DISSERTATION

von  
Alexander Sieger (geb. Taube), M.Sc.  
aus Karaganda

Tag des Kolloquiums:	04.12.2020
Referent:	Prof. Dr.-Ing. habil. Mirko Schaper
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Thomas Niendorf



Forschungsberichte des Direct Manufacturing Research Centers  
herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. habil. Mirko Schaper

Band 23

**Alexander Sieger**

**Mikrostrukturausprägung additiv gefertigter  
Gitterstrukturen**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

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.: Paderborn, 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 978-3-8440-7924-1

ISSN 2364-3072

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)

## Liste der Veröffentlichungen

Brenne, F.; Taube, A.; Pröbstle, M.; Neumeier, S.; Schwarze, D.; Schaper, M.; Niendorf, T.: Microstructural design of Ni-base alloys for high-temperature applications: impact of heat treatment on microstructure and mechanical properties after selective laser melting, *Progress in Additive Manufacturing*, 1, 2016, 141 – 151

Holzweissig, M.; Taube, A.; Brenne, F.; Schaper, M.; Niendorf, T.: Microstructural Characterization and Mechanical Performance of Hot Work Tool Steel Processed by Selective Laser Melting, *Metallurgical and Materials Transaction B*, 46, 2015, 545 - 549

Leuders, S.; Meiners, S.; Wu, L.; Taube, A.; Tröster, T.; Niendorf, T.: Structural components manufactured by Selective Laser Melting and Investment Casting—Impact of the process route on the damage mechanism under cyclic loading, *Journal of Materials Processing Technology*, 248, 2017, 130 - 142

Taube, A.; Kurtovic, A.; Niendorf, T.; Mertens, T.; Zinn, C.; Schaper, M.; Maier, H. J.: Influence of surface pre-treatments on the high-cycle fatigue behavior of Ti-6Al-4V - From anodizing to laser-assisted techniques, *International Journal of Fatigue*, 91, 2016, 195 - 203

Taube, A.; Reschetnik, W.; Pauli, L.; Hoyer, K. P.; Kullmer, G.; Schaper, M.: Numerische und mechanische Untersuchung additiv gefertigter TiAl6V4 Gitterstrukturen, *Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen*, 2017, 201 – 214

Urbanek, S.; Ponick, B.; Taube, A.; Hoyer, K. P.; Schaper, M.; Lammers, S.; Lieneke, T.; Zimmer, D.: Additive Manufacturing of a Soft Magnetic Rotor Active Part and Shaft for a Permanent Magnet Synchronous Machine, *IEEE*, 2018

## **Zusammenfassung**

Mit Hilfe der additiven Fertigung, insbesondere dem pulverbettbasierten selektiven Laserstrahlschmelzen (LBM), können hochkomplexe Strukturen endkonturnah hergestellt werden. Die große Designfreiheit ermöglicht, zelluläre Leichtbaustrukturen zu erzeugen, deren mikrostrukturellen und mechanischen Eigenschaften direkt vom generativen Fertigungsverfahren abhängen. Insbesondere im Bereich des Leichtbaus bieten zelluläre Strukturen neue Ansätze zur Verminderung des Energieverbrauchs. Um dieses Potential vollständig ausschöpfen zu können, müssen die Effekte, die zum Versagen der Bauteile mit integrierten Gitterstrukturen führen, quantitativ beschrieben und verstanden werden. Dies ist Voraussetzung für eine sichere Auslegung. Dazu werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die charakteristischen Eigenschaften dieser Strukturen sowie die Einflussgrößen im Aufbauprozess näher beleuchtet.

Im Rahmen dieser Dissertation werden numerische und experimentelle Untersuchungen von zwei unterschiedlichen Gitterstrukturtypen aus den Werkstoffen 316L und TiAl6V4 vorgestellt. Beide Werkstoffe werden unter monotoner, einachsiger Belastung getestet. Die parallel dazu durchgeführte digitale Bildkorrelation (DIC) ermöglicht gleichzeitig die detaillierte Analyse der lokalen Dehnungsverteilung während der Verformung. Mikrostrukturelle Eigenschaften und die resultierenden Gittercharakteristika werden mit Hilfe von rasterelektronenmikroskopischen Analysemethoden untersucht. Zudem erfolgt die Entwicklung eines Finite-Elemente- Modells, mit der Anforderung eines möglichst geringen Rechenaufwandes. Ein abschließender Vergleich der realen Dehnungsverteilung mit der FE- Analyse verifiziert das Modell.

## **Summary**

Additive manufacturing, especially powder bed-based selective laser beam melting (SLM), allows the production of highly complex structures. The resulting design freedom can be used to create cellular lightweight structures. The microstructural and mechanical properties of these structures depend on the additive manufacturing process. Especially, in the field of lightweight construction, these structures offer new approaches to reduce energy consumption. To fully exploit this potential, effects that lead to the failure of the components with integrated lattice structures must be described quantitatively. This is a prerequisite for a safe design. For this purpose, the characteristic properties of these structures as well as the influencing variables in the construction process need to be analyzed in more detail.

Within the scope of this dissertation, numerical and experimental investigations of two different types of lattice structures made of 316L and TiAl6V4 are examined. Both materials are tested under monotonous, uniaxial loading. A parallel conducted digital image correlation (DIC) allows to carry out a detailed analysis of the local strain distribution during the deformation. Microstructural properties and the resulting lattice characteristics are examined based on scanning electron microscope analysis methods. In addition, a finite element model focusing on low computing efforts was developed. The model was verified by comparing the results of the FE analysis to the real strain distribution.

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Werkstoffkunde (LWK) und am Direct Manufacturing Research Center (DMRC) der Universität Paderborn.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Mirko Schaper für die fachliche und persönliche Unterstützung während der gesamten Zeit. Die Möglichkeit an unterschiedlichsten Projekten, spannenden Schadensuntersuchungen und in der Lehre zu arbeiten war sehr bereichernd. Vielen Dank für dein Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Niendorf danke ich für die Übernahme des Korreferats, die angeregten Diskussionen und Ratschläge zu fachlichen Fragen. Ebenso danke ich den Herren Prof. Dr.-Ing. Detmar Zimmer und Prof. Dr.-Ing. Werner Homberg für die Mitarbeit in der Promotionskommission.

Für die exzellente fachliche Unterstützung und für die zahlreichen Diskussionen bedanke ich mich bei den Herren Dr.-Ing. Kay-Peter Hoyer, Dr.-Ing Martin Holzweißig und Dr.-Ing Florian Brenne. Ebenso gilt mein Dank allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für Werkstoffkunde und des Direct Manufacturing Research Centers für die angenehme Arbeitsatmosphäre sowie für die vielfältige Unterstützung während der Erstellung der Arbeit. Darüber hinaus gilt mein Dank ebenso den tatkräftigen studentischen Hilfskräften und den engagierten Bachelor-, Studien-, und Masterarbeitern.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Meinen Eltern Lilia und Alexander Taube danke ich für die fortwährende Unterstützung und das Vertrauen, das sie in mich gesetzt haben. Besonders herzlich danke ich meiner Ehefrau Mirjam Sieger für ihre bedingungslose Unterstützung, Geduld und Motivation.

Alexander Sieger



# Inhaltsverzeichnis

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis .....	I
1 Einleitung.....	1
2 Stand von Wissenschaft und Technik.....	2
2.1 Bionische Strukturen – Lernen von der Natur.....	2
2.2 Offen-zelluläre Leichtbaugitterstrukturen .....	4
2.2.1 Aufbau und Herstellung von zellulären Strukturen.....	5
2.2.2 Mechanische Eigenschaften zellulärer Gitterstrukturen.....	10
2.3 Additive Fertigung.....	12
2.3.1 Verfahrensarten .....	12
2.3.2 Selektives Laserstrahlschmelzen .....	14
2.4 Werkstoffe in der additiven Fertigung.....	16
2.4.1 Chrom-Nickel-Molybdän-Stahl X2CrNiMo17-12-2.....	17
2.4.2 Titanlegierung TiAl6V4.....	18
2.5 Mikrostrukturelle Eigenschaften .....	21
2.5.1 Kristall- und Gefügeanisotropie .....	21
2.5.2 Einfluss des selektiven Laserstrahlschmelzens auf die mikrostrukturellen Eigenschaften.....	23
2.6 Experimentelle Methoden.....	26
2.6.1 Elektronenrückstreubeugung.....	26
2.6.2 Digitale Bildkorrelation.....	29
2.6.3 Finite-Elemente-Methode.....	32
3 Motivation und Zielsetzung .....	35
4 Experimentelle Untersuchungen .....	38
4.1 Additive Herstellung von Probekörpern.....	38
4.1.1 Wärmebehandlung der Titanlegierung TiAl6V4.....	44
4.2 Mechanische Prüfverfahren .....	44
4.3 Rasterelektronenmikroskopie .....	47
4.4 Dehnungsanalyse mittels digitaler Bildkorrelation (DIC).....	48
4.5 Numerische Analyse mittels FEM.....	49
5 Analyse der Pulverwerkstoffe.....	51
6 Oberflächenqualität und Geometrie der Gitterstruktur .....	53

6.1	Oberflächenqualität.....	53
6.2	Geometrie der Gitterstruktur.....	55
6.2.1	Aufbaurate in Abhängigkeit der Schichtdicke.....	60
7	Mikrostrukturelle und mechanische Eigenschaften .....	62
7.1	Mikrostrukturelle Untersuchungen von 316L.....	62
7.1.1	Mikrostrukturelle Eigenschaften von Flachzugproben.....	62
7.1.2	Mikrostrukturelle Eigenschaften von Gitterstrukturen .....	66
7.1.3	Mikrostrukturelle Eigenschaften bei erhöhten Plattformtemperaturen .....	69
7.2	Mechanische Eigenschaften von 316L .....	75
7.2.1	Quasistatische Untersuchungen von 316L Flachzugproben.....	75
7.2.2	Deformations- und Schädigungsverhalten von 316L Gitterstrukturen.....	78
7.2.3	Einfluss von Schichtdicke und Bauorientierung auf die resultierenden mechanischen Eigenschaften von Gitterstrukturen .....	83
7.2.4	Vierpunktbiegeversuche von additiv hergestellten Sandwichstrukturen aus 316L ....	90
7.2.5	Auswirkung der Bauplattformtemperatur auf die mechanischen Eigenschaften .....	92
7.3	Mikrostrukturelle Untersuchungen von TiAl6V4.....	94
7.4	Mechanische Eigenschaften von TiAl6V4 .....	97
7.4.1	Deformations- und Schädigungsverhalten von TiAl6V4 Gitterstrukturen.....	98
7.4.2	Vierpunktbiegeversuche von additiv hergestellten TiAl6V4 Sandwichstrukturen ..	108
8	Simulation von Leichtbaugitterstrukturen .....	112
8.1	Vergleich der digitalen Bildkorrelation mit numerischen Untersuchungen .....	112
9	Zusammenfassung.....	117
10	Literaturverzeichnis .....	120
11	Anhang.....	130