

Forschungsberichte aus dem  
**wbk** Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Eric Thore Segebade

**Erhöhung der Verschleißbeständigkeit  
von Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels  
simulationsgestützter Zerspanung  
und mechanischer Mikrotexturierung**

Band 248



Forschungsberichte aus dem  
wbk Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer  
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza  
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Eric Thore Segebade

**Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von  
Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels  
simulationsgestützter Zerspanung und  
mechanischer Mikrotexturierung**

Band 248



# **Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels simulationsgestützter Zerspanung und mechanischer Mikrotextrurierung**

Zur Erlangung des akademischen Grades  
**Doktor der Ingenieurwissenschaften**  
der KIT Fakultät für Maschinenbau des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte  
**Dissertation**  
von

Eric Thore Segebade  
aus Bremen

Tag der mündlichen Prüfung: 24.08.2021  
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c.  
Dr. h.c. Fritz Klocke

**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.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2021

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 978-3-8440-8275-3

ISSN 0724-4967

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 des Herausgebers**

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze



## **Vorwort des Verfassers**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Großer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit und das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie die Unterstützung bei meinem Promotionsvorhaben. Bei Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke bedanke ich mich sehr für Übernahme des Korreferats und das damit einhergehende Interesse an meiner Arbeit.

Den Kolleginnen und Kollegen der Abteilung „Fertigungs- und Werkstofftechnik“ am wbk danke ich für die freundschaftliche Atmosphäre am Institut sowie die vielen fachlichen und privaten Gespräche. Besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer für die Zusammenarbeit, die konstruktiven Diskussionen und die Bereitschaft zum Korrekturlesen.

Meinen Bürokollegen Germán Gonzaléz Fernández, Jannik Schwalm, Jan Klose und Benedict Stampfer danke ich ebenfalls für das Teilen von Ideen und diskutieren von möglichen Lösungen in beliebigem Kontext.

Weiterhin gilt mein Dank den Mitarbeitern von Werkstatt und Technik. Hervorzuheben sind Thomas Hildenbrand und Klaus Simon für die unkomplizierte Unterstützung bei der Probenfertigung und Versuchsstandbetreuung. Auch danke ich dem SC-IT und dort insbesondere Margit Scheidt.

Den Kollegen vom IAM-CMS Dr.-Ing. Johannes Schneider und Dr.-Ing. Daniel Kümmel danke ich für die gute Zusammenarbeit im Kontext der Tribologie sowie für die Durchführung der tribologischen Experimente.

Meiner Familie möchte ich den allergrößten Dank zukommen lassen. Vor allem meiner Mutter Uta Segebade bin ich für das fachfremde, sprachliche Korrekturlesen dankbar.

Karlsruhe, August 2021

Eric Segebade



## **Abstract**

Wear driven by tribological loads is a serious issue in moving metallic parts. While surface layer states like topography, work hardening and/or microstructure influence tribological performance, optimization has to be conducted on a case-by-case basis. This is especially true if multiple surface layer states are to be considered.

Topographical modifications like microtextures can reduce wear drastically in specific cases. They do however reduce fatigue life on account of the notch-effect leading to local stress spikes. This, combined with the increased costs of manufacturing microtextures, may reduce the applicability of microtexturing methods.

In general, many studies connecting manufacturing strategies and surface layer states already exist. Usually, these consider very specific manufacturing methods and materials. In generating further knowledge of this kind, simulation based approaches can constitute a cost effective strategy of how specific surface layer states can be manufactured.

The objective of the present work is generating knowledge on how to manufacture specific surface layer microstructures in turning of Ti-6Al-4V with the goal of reduced wear rates during tribological load and increased fatigue life. Using a simulation-enhanced approach enables extrapolating from a set of experiments used for simulation calibration and an in-depth analysis of local acting temperatures and strain rates. In order to alleviate the costs usually attributed to microtexturing, a new process using conventional cutting tools and conventional machine tools is developed. Finally, parts produced using the generated knowledge are tested regarding their tribological and fatigue performance.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>III</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Forschung und Technik</b>	<b>3</b>
2.1 Tribologie	3
2.1.1 Beschreibung von Tribosystemen mittels Reibwerten	5
2.1.2 Analysemethoden der Tribologie	6
2.1.3 Oberflächentexturierung	7
2.1.4 Verschleißverhalten der Titanlegierung Ti-6Al-4V	9
2.2 Randschichtzustände und -eigenschaften	11
2.2.1 Zerspanungsbedingte Randschichtzustände	11
2.2.2 Einstellung von Randschichtzuständen durch Zerspanung	15
2.3 Simulation der Zerspanung	18
2.3.1 Finite-Elemente-Spanbildungssimulation	20
2.3.2 Werkstoffmodellierung	22
2.3.3 Reibungsmodellierung	31
<b>3 Zielsetzung und Vorgehensweise</b>	<b>34</b>
3.1 Zielsetzung	34
3.2 Vorgehensweise	35
<b>4 Material und Technik</b>	<b>37</b>
4.1 Versuchswerkstoffe und Probengeometrien	37
4.2 Versuchseinrichtungen	39
4.3 Analysetechnik	42
4.4 Charakterisierung von Bauteileigenschaften	44
<b>5 Experimentelle Analyse</b>	<b>45</b>
5.1 Orthogonaler Schnitt	45
5.2 Querplandrehen	49

---

5.3	Mikrotexturierung unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges	55
5.4	Diskussion	60
<b>6</b>	<b>Simulative Analyse</b>	<b>65</b>
6.1	Strategie zum Modellaufbau	65
6.1.1	Allgemeine Randbedingungen	66
6.1.2	Quasi-stationärer Zustand	71
6.1.3	Fließverhalten und Reibung während der Zerspanung von Ti-6Al-4V	73
6.1.4	Modellierung von Randschichtzuständen	78
6.2	Modellaufbau	82
6.2.1	Ergebnis	82
6.2.2	Diskussion	88
6.3	Simulative Analyse von Prozessregimes	91
6.3.1	Prozesskräfte und Spangeometrie	92
6.3.2	Thermo-mechanisches Lastkollektiv	95
6.3.3	Dynamische Rekristallisation	98
6.3.4	Diskussion	103
<b>7</b>	<b>Resultierende Bauteileigenschaften</b>	<b>111</b>
7.1	Reibung und Verschleiß	111
7.2	Schwingfestigkeit	116
7.3	Diskussion	120
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>125</b>
8.1	Zusammenfassung	125
8.2	Ausblick	126
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>I</b>