

Ermüdungsfestigkeit bei sehr hohen Schwingspielzahlen unter Berücksichtigung des Einflusses der Prüffrequenz



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Vom Fachbereich Maschinenbau
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Norbert Schneider
aus Lehrte

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Christina Berger
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz
Tag der Einreichung: 04.11.2013
Tag der mündlichen Prüfung: 14.01.2014

Darmstadt 2013
D17



Berichte aus der Werkstofftechnik
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Christina Berger

Band 3/2014

Norbert Schneider

**Ermüdungsfestigkeit bei sehr hohen Schwingspiel-
zahlen unter Berücksichtigung des Einflusses der
Prüffrequenz**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2014

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2824-9

ISSN 1617-3805

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffkunde der Technischen Universität Darmstadt.

Zunächst möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mich während der gesamten Ausbildung in jeder Hinsicht und vollem Vertrauen unterstützt haben. Bei meiner Frau Judith und meinen Töchtern Leni und Emma bedanke ich mich herzlich für die Geduld und stetige Unterstützung während der Erstellung dieser Arbeit.

Mein ganz besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. C. Berger für die Betreuung und Förderung der Arbeit, für die Übernahme der Berichterstattung, die konstruktiven Diskussionen und vor allem für das in mich gesetzte Vertrauen. Herrn Prof. Dr.-Ing. T. Melz danke ich für die Übernahme der Mitberichterstattung. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Oechsner möchte ich für das Interesse an der Arbeit und die Möglichkeit der Fortsetzung meines wissenschaftlichen Werdegangs am Institut für Werkstoffkunde bedanken.

Insbesondere bei Frau Prof. Dr.-Ing. B. Pyttel möchte ich mich für die Anregungen und zahlreichen, sehr hilfreichen Diskussionen und die hervorragende Begleitung dieser Arbeit bedanken. Bei Herrn Dr.-Ing. U. Wuttke, Leiter des Kompetenzbereichs Bauteilfestigkeit, bedanke ich mich für die Diskussionen und das angenehme Arbeitsumfeld.

Weiterhin bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern des Zentrums für Konstruktionswerkstoffe die durch ihr Schaffen einen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet haben. Frau Dr.-Ing. D. Schwerdt danke ich für die Diskussionen und Anregungen und Herrn Dipl.-Ing.(FH) G. Mischlich für die Unterstützung bei den mechanisch-technologischen Untersuchungen. Meinen Bürokollegen Frau M. Eng. I. Brunner, Herrn Dipl.-Ing. B. Schork, Herrn Dr.-Ing. M. Kaffenberger und Herrn Dipl.-Ing. G. Fomen danke ich für eine sehr angenehme Arbeitsatmosphäre und Ihre Unterstützung.

Die Arbeit enthält Forschungsergebnisse, die durch Mittel des Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMW i / AiF-Nr. 324 ZN) über die Arbeitsgemeinschaft industrielle Forschungsvereinigung „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) und das Forschungskuratoriums Maschinenbau (FKM) gefördert und finanziert wurden. Mein Dank gilt ebenso dem Arbeitskreis „VHCF-variable Amplitude“ für die interessanten Diskussionen sowie der Oerlikon Textile GmbH & Co. KG in Person von Herrn Dr.-Ing. H. Waltermann und der Robert Bosch GmbH.

Erklärung:

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfen verwendet habe.



Darmstadt, 04.11.2013

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	1
1 Einleitung.....	5
2 Ermüdungsfestigkeit im Bereich sehr hoher Schwingspielzahlen	8
2.1 Ermüdungsfestigkeit.....	8
2.1.1 Schwingfestigkeit	8
2.1.2 Betriebsfestigkeit	10
2.2 Ermüdungsvorgänge und Schädigungsmechanismen	14
2.3 Werkstoffe.....	16
2.3.1 Vergütungsstähle.....	16
2.3.2 Aluminiumlegierungen.....	17
2.4 Bauteilbemessung.....	19
2.4.1 Konzepte, Richtlinien und Empfehlungen zur Bauteilbemessung	19
2.4.2 Schadensakkumulationshypothesen	23
2.5 Einfluss der Prüftechnik und Prüffrequenz auf die Ermüdungsfestigkeit.....	26
3 Zielstellung der Arbeit	31
4 Experimentelle Untersuchungen.....	32
4.1 Versuchsprogramm.....	32
4.2 Prüftechnik der Ermüdungsversuche	35
4.2.1 Prüfmaschinen.....	35
4.2.2 Prinzip der Ultraschallschwingprüftechnik	35
4.2.3 Kalibrieren des Systems Ultraschallprüfmaschine und Probe	37
4.2.4 Durchführung der Betriebsfestigkeitsversuche.....	39
4.3 Dehnungsgeregelte Versuche.....	41
4.4 Materialcharakterisierung des Vergütungsstahls 50CrMo4	42
4.4.1 Allgemeines	42
4.4.2 Chemische Zusammensetzung.....	43
4.4.3 Gefügecharakterisierung.....	43
4.4.4 Mechanisch-technologische Eigenschaften.....	45
4.5 Materialcharakterisierung der Aluminiumlegierung EN AW-5083	46

4.5.1	Allgemeines	46
4.5.2	Chemische Zusammensetzung	47
4.5.3	Gefügecharakterisierung	47
4.5.4	Mechanisch-technologische Eigenschaften	51
4.6	Probencharakterisierung	52
4.7	Statistische Auswertung der Wöhlerversuche	55
5	Schwingfestigkeit und Schädigungsmechanismen.....	58
5.1	Vorbemerkung	58
5.2	Vergütungsstahl 50CrMo4	58
5.2.1	Glatte Proben.....	58
5.2.2	Gekerbte Proben	61
5.3	Aluminiumlegierung EN AW-5083.....	67
5.3.1	Glatte Proben.....	67
5.3.2	Gekerbte Proben	72
5.3.3	Bruchmechanische Bewertung der primären IMT	78
5.4	Zusammenfassung	82
6	Einfluss der Prüftechnik und Prüffrequenz.....	84
6.1	Vorbemerkung	84
6.2	Einfluss der Prüftechnik.....	84
6.3	Einfluss der Dehnrate	86
6.3.1	Allgemeine Betrachtungen.....	86
6.3.2	Konzept zur Beschreibung des Dehnrateneinflusses	89
6.4	Einfluss des Umgebungsmediums	91
6.4.1	Allgemeine Betrachtungen.....	91
6.4.2	Versuche in inerter Umgebung	92
6.5	Gesamtbewertung des Einflusses der Prüffrequenz.....	97
6.5.1	Vergütungsstahl 50CrMo4	97
6.5.2	Aluminiumlegierung EN AW-5083.....	102
6.6	Zusammenfassung	103
7	Betriebsfestigkeit	107
7.1	Vorbemerkung	107

7.2	Verwendete Kollektivformen und Teilfolgen.....	107
7.3	Versuchsergebnisse und Diskussion.....	110
7.4	Lebensdaueranalyse	115
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	122
	Literaturverzeichnis	126
	Anhang.....	134
A	Probengeometrie	134
B	Dehnungswöhlerlinien	137
C	EDX-Analysen und Mikrohärtemessungen	139
D	Bauteilfestigkeit nach der FKM-Richtlinie.....	141
E	Ergebnisse der Schwingfestigkeitsuntersuchungen	145
F	Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss von Prüftechnik und Prüffrequenz.....	167
G	Ergebnisse der Betriebsfestigkeitsuntersuchungen.....	181