



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

AUSLEGUNGSGRENZEN, GRÜBCHEN- UND ZAHNFUSSTRAGFÄHIGKEIT
ASYMMETRISCHER STIRNRADVERZÄHNUNGEN

VON DER FAKULTÄT FÜR MASCHINENBAU DER
TECHNISCHEN UNIVERSITÄT CHEMNITZ

GENEHMIGTE

DISSERTATION

ZUR ERLANGUNG DES AKADEMISCHEN GRADES

DOKTORINGENIEUR

DR.-ING.

VORGELEGT

VON DIPL.-ING. (FH) DAVID KRÜGER
GEBOREN AM 27.08.1984 IN ELSTERWERDA

TAG DER EINREICHUNG: 30.09.2016

GUTACHTER:
UNIV.-PROF. DR.-ING. ERHARD LEIDICH
PROF. DR.-ING. IRIS RÖMHILD
PROF. EM. DR.-ING. HABIL. HEINZ LINKE

TAG DER VERTEIDIGUNG: 19.12.2016

Berichte aus dem Maschinenbau

David Krüger

**Auslegungsgrenzen, Grübchen- und Zahnfuß-
tragfähigkeit asymmetrischer Stirnradverzahnungen**

D 93 (Diss. TU Chemnitz)

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5412-5

ISSN 0945-0874

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist zum überwiegenden Teil während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Professur Konstruktion und Antriebstechnik der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden entstanden und basiert auf den Erkenntnissen einer Auftragsforschung für die Siemens AG. Ich danke daher der Siemens AG für das Interesse an dem Thema und der erhaltenen Unterstützung. Bei der Technischen Universität Chemnitz und Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden bedanke ich mich für das entgegengebrachte Vertrauen und die Ermöglichung des kooperativen Promotionsverfahrens.

Besonderer Dank gilt meinen drei Gutachtern Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Erhard Leidich, Frau Prof. Dr.-Ing. Iris Römhild und Herrn Prof. em. Dr.-Ing. habil. Heinz Linke für die Ermöglichung des Promotionsvorhabens, die umfassende Unterstützung sowie die zahlreichen Fachgespräche, welche wesentlich zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Maik Berger danke ich für die freundliche Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission.

Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Prof. em. Dr.-Ing. habil. Jochen Brechling für die Unterstützung bei der Programmierung des Berechnungsprogramms und die zahlreichen fachlichen Diskussionen. Dr.-Ing. Ralf Heß und Dipl.-Ing. (FH) Marcus Merder möchte ich ebenfalls für die vielen fachlichen Diskussionen herzlichst danken. Dipl.-Ing. (FH) Tom Schiemann und Dipl.-Ing. (FH) Marcel Fischer danke ich für die Unterstützung bei der Programmierung während ihrer Studenzeit. Ebenfalls zu Dank verpflichtet bin ich allen Mitarbeitern der Fakultät Maschinenbau der HTW Dresden für die stets sehr gute Zusammenarbeit sowie der Schaffung eines hervorragenden Arbeitsklimas.

Meiner Verlobten Anke Richter möchte ich besonders danken für die Unterstützung und die Durchsicht des Manuskripts wie auch meinen Eltern und meiner ganzen Familie für den Rückhalt und das Verständnis für die darin gebundene Zeit.

Potsdam, März 2017

David Krüger

Inhaltsverzeichnis

Symbole	III
1. Einleitung	1
2. Stand der Forschung	2
2.1. Geometrie von evolventischen (Sonder-)Verzahnungen	2
2.2. Beanspruchung von evolventischen (Sonder-)Verzahnungen	3
3. Zielsetzung	7
4. Geometrische Ausführbarkeit asym. Evolventenverzahnungen	10
4.1. Ausführbarkeit am Werkzeug	11
4.1.1. Geradflankige Werkzeuge	11
4.1.2. Schneidrad	17
4.2. Ausführbarkeit am Werkrad und der Verzahnungspaarung	23
5. Grübchenträgfähigkeit	30
5.1. Beanspruchung unter dem Hertz'schen Pressungsmaximum im Zahnkontakt	30
5.2. Beanspruchung im Zahnkontakt nach ISO 6336	35
5.3. Beanspruchbarkeit im Zahnkontakt nach ISO 6336	42
5.4. Fazit zur Anwendbarkeit von ISO 6336 zur Berechnung der Grübchenträgfähigkeit asymmetrischer Verzahnungen	44
5.5. Steigerung der Grübchenträgfähigkeit	45
6. Zahnfußträgfähigkeit	51
6.1. Zahnfußträgfähigkeitsberechnung nach ISO 6336	51
6.1.1. Beanspruchung im Zahnfuß nach ISO 6336	52
6.1.2. Beanspruchbarkeit im Zahnfuß nach ISO 6336	59
6.1.3. Fazit zur Anwendbarkeit von ISO 6336 zur Berechnung der Zahnfußträgfähigkeit asymmetrischer Verzahnungen	62
6.2. Numerische Zahnfußträgfähigkeitsberechnung	63
6.2.1. Singularitätenverfahren	64
6.2.2. Beanspruchung entlang der Zahnfußkurve	69
6.2.3. Beanspruchbarkeit des Zahnfußes	84
6.2.4. Zahnfußermüdungssicherheit	96
6.2.4.1. Berücksichtigung der örtlichen Mittelspannung ohne überlagerte statische Mittelspannung	96
6.2.4.2. Berücksichtigung der örtlichen Mittelspannung und zusätzlich überlagerter statischer Mittelspannungen	116

7.	Vergleich der Berechnungsverfahren zur Zahnfußermüdungstragfähigkeit	121
8.	Entwicklung eines Korrekturfaktors zur Berechnung der Zahnfußermüdungssicherheit	127
9.	Zusammenfassung und Ausblick	132
	Literaturverzeichnis	135
	Anlagen	143
Anlage A.	Maximale Werkzeugkopfabrundungsradien am geradflankigen Werkzeug bei ungleicher Aufteilung	143
Anlage B.	Geometrische Ausführbarkeit	145
Anlage B.1.	Am Schneidrad mit 40 und 60 Zähnen	145
Anlage B.2.	Der Paarung bei Herstellung mittels Schneidrad mit 40 und 60 Zähnen	151
Anlage C.	Zahnfußermüdungssicherheit unter Berücksichtigung der örtlichen Mittelspannung und der Stützwirkung (Beanspruchungsfall 1)	155
Anlage D.	Vergleich der Zahnfußsicherheiten unter Beachtung der Stützwirkung	159
Anlage E.	Korrekturfunktion	160
Anlage E.1.	Gleichungssystem der Korrekturfunktion	160
Anlage E.2.	Näherungsverf. zur Berechnung der Zahnfußbeanspruchung asymmetrischer Verzahnungen	162