

# **Reibermüdungsverhalten ingenieurkeramischer Werkstoffe**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**Doktors der Ingenieurwissenschaften**

an der Fakultät für Maschinenbau  
des Karlsruher Instituts für Technologie

genehmigte

**Dissertation**

von

**Dipl.-Ing. Thomas Schalk**

aus

Karlsruhe-Durlach

Tag der mündlichen Prüfung: 29.10.2010  
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Detlef Löhe  
Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. Michael J. Hoffmann



Schriftenreihe Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik

Band 70/2011

**Thomas Schalk**

**Reibermüdungsverhalten  
ingenieurkeramischer Werkstoffe**

Shaker Verlag  
Aachen 2011

**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., 2010

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9887-6

ISSN 1439-4790

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort**

Diese Arbeit entstand während meiner Beschäftigung als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffkunde I des Karlsruher Instituts für Technologie in der Zeit von September 2004 bis Dezember 2008.

An dieser Stelle möchte ich in erster Linie Herrn Prof. Dr.-Ing. Detlef Löhe für die Übernahme des Hauptreferats sowie Herrn Prof. Dr. rer. nat. Michael J. Hoffmann für die Übernahme des Korreferats und seine hilfreichen Anmerkungen danken.

Des Weiteren danke ich meinem Abteilungsleiter Herrn Dr.-Ing. Karl-Heinz Lang für die Betreuung und Durchsicht meiner Arbeit sowie sein mir entgegengebrachtes Vertrauen und die allzeit angenehme Arbeitsatmosphäre in der Abteilung für Schwingfestigkeit. Vielen Dank dafür, dass Sie jederzeit ein offenes Ohr für meine Fragen und Anliegen hatten.

Mein Dank gilt auch den Mitgliedern des DFG-Sonderforschungsbereiches 483 sowie den Mitarbeitern des Instituts für Keramik im Maschinenbau für zahlreiche anregende und offene Diskussionen. Besonders hervorheben möchte ich hierbei Dipl.-Ing. Thomas Schwind, Dr.-Ing. Martin Härtelt, Dr.-Ing. Stefan Fünfschilling, Dr.-Ing. Oberacker, Dr.-Ing. Theo Fett und Prof. Dr.-Ing. Tilmann Beck.

Darüber hinaus gilt mein Dank allen Mitarbeitern des Instituts, welche zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Besonders möchte ich hierbei die Herren Peter Kretzler, Marc Brecht und Arndt Hermeneit hervorheben, welche mir manch unmögliche Konstruktion und Schaltung möglich gemacht haben. Große und tatkräftige Unterstützung erfuhr ich durch die studentischen Hilfskräfte, Studien- und Diplomarbeiter Nils Neef, Alberto Ponce, Hasan Geckin, Mahmoud Bekri, Jens Steiger, Adem Bulut, Sascha Fliegener, Tobias Mayer, Manfred Grigo, Patrik Lepiarz und ganz besonders Claudius Wörner. Vielen Dank auch an die Mitarbeiter der mechanischen Werkstatt, welche meine Konstruktionen in kürzester Zeit umgesetzt haben und mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen. Besonderen Dank möchte ich auch Prof. Dr. mont. Hermann Müller für seine Unterstützung aussprechen. Danken möchte ich auch den Mitarbeitern der Metallographie sowie des Laboratoriums für Elektronenmikroskopie Patrice Brenner, Volker Zibat, Dr. Erich Müller und Dr. Benjamin Butz.

Ganz besonders großen Dank möchte ich meinen Eltern, meiner Frau Eva und unserem Sohn Moritz für ihre Unterstützung und die Liebe, mit denen sie mich begleitet haben, aussprechen.



<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Kenntnisstand</b>	<b>9</b>
2.1	Grundlagen Ermüdung	9
2.2	4-Punkt-Biegung an ingenieurkeramischen Werkstoffen	10
2.3	Grundlagen Reibermüdung	11
2.3.1	Tribologie	11
2.3.2	Kontaktmechanik	19
2.3.3	Bruch	25
2.3.4	Reibermüdung	33
2.4	Methoden zur Erforschung der Reibermüdung	36
2.4.1	Reibermüdung metallischer Werkstoffe	43
2.4.2	Reibermüdung ingenieurkeramischer Werkstoffe	46
<b>3</b>	<b>Werkstoffe</b>	<b>49</b>
3.1	Aluminiumoxid	50
3.2	Siliziumnitrid	51
<b>4</b>	<b>Analysemethoden und Versuchsdurchführung</b>	<b>53</b>
4.1	Prüfstands Aufbau für Laborluftatmosphäre	53
4.2	Prüfstands Aufbau für den Einfluss von Umgebungsmedien	55
4.3	Versuchsführung	57
4.3.1	Restfestigkeitsversuche	57
4.3.2	Zyklische Versuche	58
4.3.3	Statische Versuche	58
4.4	Vergleich der mechanischen Kennwerte von Reibermüdungs- mit 4-Punkt-Biegeversuchen	59
4.5	Versuchsproben	60
4.5.1	Biegeproben	60
4.5.2	Reibkörper	61
4.6	Mikroskopische Untersuchungsmethoden	62
4.6.1	Konfokales Weißlichtmikroskop	62
4.6.2	Rasterelektronenmikroskopie und Focused Ion Beam	62

<b>5</b>	<b>Versuchsergebnisse</b>	<b>64</b>
5.1	Restfestigkeitsbestimmung nach Reibbeanspruchung	64
5.1.1	Restfestigkeitsbestimmung an $\text{Al}_2\text{O}_3$	64
5.1.2	Restfestigkeitsbestimmung an $\text{Si}_3\text{N}_4$	69
5.2	Zyklische 4-Punkt-Biegung mit überlagerter Reibbeanspruchung	73
5.2.1	Zyklische Reibermüdung an $\text{Al}_2\text{O}_3$	74
5.2.2	Zyklische Reibermüdung an $\text{Si}_3\text{N}_4$	77
5.3	Statische Versuche	81
5.4	Verlauf der Tangentialkraft	81
5.5	Mikroskopische Charakterisierung der Schädigungsentwicklung	84
5.5.1	Rasterelektronenmikroskopie	84
5.5.2	Konfokales Weißlichtmikroskop	91
5.5.3	Rasterelektronenmikroskopie und Focused Ion Beam	100
<b>6</b>	<b>Ergebnisdiskussion</b>	<b>112</b>
6.1	Restfestigkeitsversuche	112
6.1.1	$\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramiken	112
6.1.2	$\text{Si}_3\text{N}_4$ -Keramiken	115
6.2	Statische Versuche	116
6.3	Zyklische Versuche	117
6.3.1	Reibermüdungsversuche an $\text{Al}_2\text{O}_3$	117
6.3.2	Reibermüdungsversuche an $\text{Si}_3\text{N}_4$	119
6.4	Schädigungshypothese	121
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>125</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>128</b>