



Tobias Schramm

## Automatisierte topografische Vermessung von Hochlastkontakten in einem Tribometer

# **Automatisierte topografische Vermessung von Hochlastkontakten in einem Tribometer**

Bei der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Tobias Schramm

geboren in (Geburtsort): Goslar

eingereicht am: 29.01.2019

mündliche Prüfung am: 29.08.2019

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Georg-Peter Ostermeyer

Prof. Dr. Günter Bräuer



Schriftenreihe Institut für Dynamik und Schwingungen  
TU Braunschweig

**Tobias Schramm**

**Automatisierte topografische Vermessung  
von Hochlastkontakten in einem Tribometer**

Shaker Verlag  
Düren 2019

**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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6954-9

ISSN 1865-9101

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

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Dynamik und Schwingungen der TU Braunschweig.

Mein größter Dank gilt dem Leiter dieses Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. G.-P. Ostermeyer für die Betreuung dieser Arbeit und die Möglichkeit, die Ergebnisse auf Konferenzen präsentieren zu können. Er hat mich stets gefördert und mir in zahlreichen fachlichen Diskussionen viele wertvolle Anregungen und Ideen gegeben. Seine vertrauensvolle Unterstützung hat mir viele Möglichkeiten eröffnet und die Arbeit erst ermöglicht.

Darüber hinaus danke ich Herrn Prof. Dr. G. Bräuer für seine Bereitschaft, sich als Gutachter dieser Arbeit anzunehmen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Tutsch danke ich für die freundliche Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission.

Den Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Dynamik und Schwingungen danke ich für das äußerst angenehme Arbeitsklima sowie die ausgeprägte Diskussions- und Hilfsbereitschaft. Besonders möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. M. Müller, Herrn Dr.-Ing. F. Schiefer, Herrn Dr.-Ing. N. Perzborn und Herrn Dr.-Ing. L. Wilkening für ihre Unterstützung bedanken.

Weiterhin möchte ich Frau A. Struckmann, die mir organisatorisch und bei der Korrekturlesung geholfen hat sowie Frau K. Hentrich für ihre vielseitige technische Unterstützung danken. Darüber hinaus möchte ich mich besonders bei Herrn Dr.-Ing. Stephan Raczek, Herrn J. Merlis, Herrn A. Vogel und Herrn A. Völpel für die äußerst angenehme und freundschaftliche Arbeitsatmosphäre und die vielen anregenden Gespräche und Diskussionen bedanken.

Bei meinen Eltern bedanke ich mich für die stete Unterstützung und Förderung meines bisherigen Werdegangs. Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Frau Katrin für ihre Geduld und ihre Unterstützung bedanken. Sie hat mir stets den Rücken freigehalten und mir so die Erstellung dieser Arbeit ermöglicht.

Goslar, September 2019

Tobias Schramm



# Zusammenfassung

Bei der Reibung spielen die Topografien der Reibpartner eine große Rolle. Insbesondere tribologische Hochlastkontakte weisen eine komplexe Grenzschichtdynamik auf. Diese zeichnet sich durch große Materialbewegungen in der Grenzschicht zwischen zwei Festkörpern aus und findet auf verschiedenen Zeit- und Größenskalen statt. Es gibt heutzutage verschiedene Modelle zur Beschreibung des Reib- und Verschleißverhaltens. Sie kommen jedoch nicht ohne Messungen der Reibung aus, um das Reibverhalten vorherzusagen. Für die systematische Untersuchung des Reib- und Verschleißverhaltens gibt es am Institut für Dynamik und Schwingungen an der TU Braunschweig mehrere Stift-Scheibe-Tribometer.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein bestehendes vollautomatisiertes Stift-Scheibe-Tribometer um die automatisierte Oberflächenvermessung beider Probekörper zu erweitern. Dazu wird ein geeignetes Messverfahren zur topografischen Erfassung dieser ausgewählt und erläutert, wie es in das Tribometer implementiert wird. Ein punktförmiger Lasertriangulator bewegt sich an der rotierenden Scheibe vorbei. Eine im Durchmesser 400 mm große Bremsscheibe wird in unter 90 s vermessen. Bei der Vermessung der Oberfläche des Stifts, fährt dieser an einem sich schnell oszillierenden Lasertriangulator vorbei. Eine 10 mm × 20 mm große Belagsprobe, inklusive des Probenhalters, wird innerhalb von 30 s topografisch erfasst. So können die Oberflächen der Scheibe und des Stifts vollautomatisch und nach einer beliebigen Anzahl von Reibmessungen erfasst werden.

Ein weiterer Aspekt dieser Arbeit liegt in der Auswertung der Messdaten, deren Einflüsse und die Wiederholgenauigkeit der Messungen. Dazu werden eine neuartige iterative Regression zur Ermittlung der Reibebene und verschiedene Kennwerte vorgestellt, mit denen eine Oberfläche charakterisiert werden kann. Mit Hilfe der Kennwerte kann die zeitliche Entwicklung einer Oberfläche in Bezug auf deren Einflussgrößen analysiert oder mehrere Materialien miteinander verglichen werden. Hierbei haben sich Höhenkennwerte für Verschleißanalysen und Kennwerte der Materialanteilskurve für Rauheitsanalysen herauskristallisiert.

An Hand von Beispielstudien wird das Potential der Oberflächenmessungen und deren Informationsdichte gezeigt. Hier ist unter anderem der Vergleich verschieden bearbeiteter Scheibenoberflächen, das geometrische Einlaufverhalten und Verschleißverhalten der Reibpartner und der Einfluss der Geschwindigkeit auf das Staubverhalten im stationären Fall sowie ein Ansatz zur quasi-in-situ Untersuchung von instationären Reibmessungen quantifiziert worden.

Die automatisierte Oberflächenvermessung dient zum besseren Verständnis der Topografie von tribologischen Hochlastkontakten und damit zum besseren Verständnis des Reibverhaltens.



# Abstract

The topographies of contacting bodies strongly influence their friction behavior. In particular, tribological high-load contacts exhibit complex boundary layer dynamics. This is characterized by substantial material movement within the boundary layer between two solids, and takes place on multiple time and size scales. Currently, a variety of models are available for describing friction and wear behaviors. They are, however, incapable of predicting friction behavior without supplemental information gained through friction measurements. For the systematic investigation of friction and wear behavior, the Institute for Dynamics and Vibration at the TU Braunschweig has several pin-on-disc tribometers.

The aim of this work is to expand the functionality of an existing, fully automated pin-on-disc tribometer by introducing automated surface measurements of the pin and disc. For this purpose, a suitable measurement method for the topographic acquisition of the pad specimen and disc is selected and implemented in the tribometer. A point laser triangulator sensor moves along the rotating disc. A brake disc with a diameter of 400 mm can be measured in under 90 s. When measuring the surface of the pin, the pad specimen is moved past a quickly oscillating triangulator. A 10 mm × 20 mm large pad specimen can be topographically measured within 30 s, including measurement of the specimen holder. Thus, fully automated measurements of the the surfaces of the disc and the pin can be carried out after any number of friction measurements.

A further aspect of this work encompasses the evaluation of the measurement data, the influences thereof, and the corresponding repeatability of the measurements. To this end, a new iterative regression method to identify the friction level and various surface characterization values are presented. These values aid in analyzing the temporal development of a surface with regard to its influencing variables and in comparing several materials with one another. Characteristic values of the height and of the material proportion curve have established themselves for wear and roughness analyses, respectively.

On the basis of example studies the potential of the surface measurements and their information density is illustrated. Among other analyses, the comparison of differently machined disc surfaces, the geometric running-in and wear behavior of the friction partners and furthermore, the influence of sliding speed on dust behavior is quantified in a stationary case, and an approach for quasi-in-situ investigations of transient friction measurements is shown.

The automated surface measurement helps to better understand the topography of tribological high-load contacts and thus to better understand the friction behaviour.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Gliederung dieser Arbeit . . . . .	2
<b>2 Hochlastkontakte am Beispiel Bremse</b>	<b>5</b>
2.1 Die Pkw-Scheibenbremse . . . . .	5
2.1.1 Funktionsweise . . . . .	5
2.1.2 Brems Scheiben . . . . .	6
2.1.3 Reibbeläge . . . . .	8
2.2 Tribologie der Hochlastkontakte: Grenzschichtdynamik . . . . .	9
2.2.1 Reibung . . . . .	10
2.2.2 Verschleiß . . . . .	11
2.2.3 Dynamisches Reibmodell . . . . .	12
2.3 Das Automatisierte Universal Tribometer . . . . .	19
2.3.1 Positionierung und Positionsmessung . . . . .	20
2.3.2 Kraftaufbringung und Messung . . . . .	23
2.3.3 Temperatur . . . . .	24
2.3.4 Erweiterte Messeinrichtungen . . . . .	26
2.3.5 Software . . . . .	27
<b>3 Oberflächenmesstechnik</b>	<b>31</b>
3.1 Messverfahren . . . . .	31
3.1.1 Tastschnittgerät . . . . .	31
3.1.2 Konfokales Messprinzip . . . . .	33
3.1.3 Laser-Triangulation . . . . .	36
3.2 Rauheitsmessung . . . . .	41
3.2.1 Filterung . . . . .	43
3.2.2 Oberflächenkenngrößen . . . . .	46
<b>4 Automatisierte Oberflächenvermessung</b>	<b>55</b>
4.1 Auswahl des Messverfahrens . . . . .	55

4.2	Vermessung des Rotors . . . . .	58
4.2.1	Aufbau und Messdatenakquise . . . . .	59
4.2.2	Datenbearbeitung und Auswertung . . . . .	64
4.2.3	Genauigkeitsanalyse . . . . .	68
4.2.4	Vergleich mit anderen Messmitteln . . . . .	69
4.3	Vermessung der Probe . . . . .	72
4.3.1	Aufbau und Messdatenakquise . . . . .	72
4.3.2	Datenbearbeitung und Auswertung . . . . .	77
4.3.3	Genauigkeitsanalyse . . . . .	91
4.3.4	Vergleich mit anderen Messmitteln . . . . .	93
<b>5</b>	<b>Topografiedynamik im Hochlastkontakt</b>	<b>95</b>
5.1	Scheibenoberfläche im Neuzustand . . . . .	95
5.2	Kontaktpatches . . . . .	99
5.2.1	Adhäsion . . . . .	101
5.2.2	Luftzug der Scheibe . . . . .	103
5.2.3	Flächenpressung . . . . .	105
5.3	Einlaufverhalten . . . . .	106
5.3.1	Einlauf einer „grünen“ Belagsprobe . . . . .	106
5.3.2	Einlauf einer schiefen Belagsprobe . . . . .	110
5.3.3	Einlauf nach Entfernung der Grenzschicht . . . . .	115
5.3.4	Verschleißverhalten . . . . .	121
5.4	Quasi in Situ Messungen instationärer Bremsungen . . . . .	123
5.4.1	Schleppbremsungen . . . . .	123
5.4.2	Stoppbremsungen . . . . .	127
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>135</b>
	<b>Literatur</b>	<b>141</b>
<b>A</b>	<b>Weitere Abbildungen und Darstellungen</b>	<b>149</b>