



Stephan Raczek

## Automatisierung eines Prüfstandes für tribologische Hochlastkontakte

# **Automatisierung eines Prüfstandes für tribologische Hochlastkontakte**

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

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Stephan Raczek  
aus (Geburtsort): Bad Gandersheim

eingereicht am: 01.02.2018  
mündliche Prüfung am: 21.12.2018

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Georg-Peter Ostermeyer  
Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor

2018



Schriftenreihe Institut für Dynamik und Schwingungen  
TU Braunschweig

**Stephan Raczek**

**Automatisierung eines Prüfstandes  
für tribologische Hochlastkontakte**

Shaker Verlag  
Aachen 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., 2018

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 978-3-8440-6577-0

ISSN 1865-9101

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)

*Für Linda und Amelie*



# Vorwort

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

Mein ganz besonderer Dank geht an den Leiter dieses Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. G.-P. Ostermeyer, für die fachliche Betreuung dieser Arbeit und der Möglichkeit, meine Ergebnisse auf Konferenzen zu präsentieren. Als mein Doktorvater stand er mir in zahlreichen wissenschaftlichen Diskussionen mit Ideen und Ratschlägen zur Seite. Sein großes Vertrauen hat mir viele Möglichkeiten eröffnet und diese Arbeit erst möglich gemacht.

Darüber hinaus gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. T. Vietor für seine Bereitschaft, sich als Gutachter für diese Arbeit bereitzustellen. Prof. Dr.-Ing. R. Tutsch danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission.

Meinen Kollegen am Institut für Dynamik und Schwingungen danke ich für die äußerst freundliche und angenehme Arbeitsatmosphäre sowie für zahlreiche Diskussionen und eine große Hilfsbereitschaft. Besonders bedanken möchte ich bei Herrn Dr.-Ing. F. Schiefer, Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. M. Müller, Frau A. Struckmann, Herrn T. Schramm, Herrn A. Vogel, Herrn J. Merlis, Herrn A. Völpel, Frau K. Hentrich, Herrn Dr.-Ing. N. Perzborn und Herrn Dr.-Ing. L. Wilkening für ihre Unterstützung. Darüber hinaus gilt mein Dank allen studentischen Hilfskräften, die bei meiner Arbeit behilflich waren. Dies gilt besonders für Herrn G. Lehne, Herrn K.-J. Janssen, Herrn F. Rickhoff und Herrn J. Depken, die mich bei der Programmierung, Konstruktion und den Aufbau elektrischer Schaltungen tatkräftig unterstützten.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meiner Frau Linda für ihre Geduld und Unterstützung. Indem sie mir stets den Rücken freigehalten hat, war mir die Anfertigung dieser Arbeit erst möglich.





# Zusammenfassung

Obwohl das Phänomen der Reibung schon seit vielen Jahrhunderten untersucht wird, ist sie bis heute nicht komplett verstanden und nur schwer vorhersehbar. Verantwortlich dafür sind die Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Prozessen in der Grenzschicht. Tribologische Experimente sind daher notwendig, um die Reibung zu untersuchen und in Form von Reibgesetzen zu validieren. Um den Reibwert zwischen zwei Körpern bei unterschiedlichen Lastkollektiven zu bestimmen, werden sogenannte Tribometer eingesetzt. Mit Hilfe dieser Prüfmaschinen können Systeme und Baugruppen bereits in einer frühen Phase der Produktentwicklung tribologisch optimiert und ausgelegt werden. So lassen sich unerwünschte Kosten in einer späteren Projektphase vermeiden. In der Bremsenindustrie kommen hauptsächlich zwei Tribometer-Typen zum Einsatz: Voll- und Teilbelagsprüfstände. Letztere bilden den Kontakt in der Bremse durch einen Bremsbelagsausschnitt (Stift) ab, der auf eine Bremsscheibe gepresst wird. Diese Stift-Scheibe-Tribometer sind zwar weniger für die Untersuchung der Bremsen-Performance geeignet, messen aber die tribologischen Kenngrößen im Kontakt mit einer höheren Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein existierendes Stift-Scheibe-Tribometer für die Untersuchung von Hochlastkontakten, wie man sie zum Beispiel in der Fahrzeugbremse findet, zu automatisieren und die Möglichkeit zu implementieren, Experimente mit neuartigen komplexen Regelungen durchzuführen. Dazu wird eine Hardware verwendet, die Mess- und Steuerkomponenten in einem Gerät vereint. Sie besteht aus einem Echtzeit-Controller und einer programmierbaren logischen Schaltung, die direkt auf die Schnittstellen zum Tribometer zugreift. Die Aufgabe dieser Schaltung ist die Regelung der Antriebe und das Erfassen der Messgrößen. Der Echtzeit-Controller ist verantwortlich für die automatisierte Durchführung der Messaufgaben und der Messdatenaufzeichnung. Darüber hinaus bietet er eine Plattform für komplexe Regelungen, *Hardware-in-the-Loop* Simulationen oder eine automatisierte Validierung von tribologischen Gesetzen in einem Bremssystem.

Die entwickelte Software ist in der Lage, Messdaten synchron und mit Frequenzen bis zu 50 kHz aufzuzeichnen. Gleichzeitig können Reibapplikationen präzise und flexibel durchgeführt werden. Unterschiedliche Funktionen der Drehzahl und Normalkraft, wie zum Beispiel Rampen, sind dabei frei miteinander kombinierbar. Ergänzend verfügt das Tribometer über eine Regelung der Reibleistung und die Möglichkeit, Bremsungen mit simulierter Schwungmasse durchzuführen.

Die experimentelle Erprobung der Automatisierung zeigt relativ geringe Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Größen ausgewählter Funktionen. Beispielmessungen zeigen - unter anderem durch die Simulation unterschiedlicher Fahrertypen in einer Bremssituation - das Potential dieser neuartigen Features bei Reibwertmessungen.



# Abstract

Although the phenomenon of friction has been studied for many centuries, it is still not fully understood. The interactions between various processes in the boundary layer are responsible for making friction phenomena difficult to predict. Tribological experiments are therefore necessary to investigate friction and to validate associated friction laws. In order to determine the coefficient of friction between two bodies in various loading combinations, tribological measurement devices, or tribometers, are used. Using such test devices, systems and assemblies can be tribologically optimized and designed at an early stage of product development. Thus, additional costs at later phases of a given project can be avoided. In the brake industry, two types of tribometers are used: full-scale and reduced-scale brake dynamometers. Reduced-scale brake dynamometers reproduce the contact in the brake using a small brake pad specimen (pin), which is pressed onto the surface of a brake disc. While these pin-on-disc tribometers are less suitable for the study of brake performance, they measure the tribological parameters in the contact more accurately and cost effectively than full-scale dynamometers.

The aim of this work is to automate an existing pin-on-disk tribometer for the investigation of high-load contacts. Such contacts can be found, for example, in vehicle brake systems. Furthermore, the capability for performing experiments with novel, complex control strategies is implemented. For this purpose, a system is used which combines measurement and control components in a single device. It consists of a real-time controller and a programmable logic circuit, which directly accesses the interfaces of the tribometer. This logic circuit carries out the closed loop control of the motors and the measurement of the input signals. The real-time controller is responsible for the automated execution of the measurement tasks and the recording of measurement data. In addition, it provides a platform for complex control algorithms, *hardware-in-the-loop* simulations, and automated validation of tribological laws of braking systems.

The software developed is able to record measured data synchronously with a sampling rate up to 50 kHz. Friction applications can be performed with high precision and flexibility. Various speed and normal force functions, such as ramps, can be freely selected and combined with each other. Furthermore, the tribometer has a closed loop control for performing measurements with constant friction power and brake procedures with a simulated flywheel mass.

The experimental testing of selected automated functions on the test device reveals relatively low deviations between target and achieved values. Example measurements, including simulations of various driver types in braking situations, demonstrate the potential of these novel features for tribological investigations.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>5</b>
2.1	Tribologie . . . . .	5
2.1.1	Reibung . . . . .	6
2.1.2	Verschleiß . . . . .	7
2.2	Theoretische und simulative tribologische Arbeiten am IDS . . . . .	9
2.2.1	Dynamisches Reibgesetz . . . . .	9
2.2.2	Simulation der Grenzschichtdynamik . . . . .	12
2.3	Messen tribologischer Größen von Bremssystemen . . . . .	13
2.3.1	Radbremse . . . . .	14
2.3.2	Tribologische Untersuchung kompletter Baugruppen . . . . .	17
2.3.3	Teilbelagsprüfstand . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Automated Universal Tribotester</b>	<b>25</b>
3.1	Zeitliche Entwicklung . . . . .	25
3.2	Komponenten des AUT . . . . .	29
3.2.1	Aktoren für den Basisbetrieb . . . . .	30
3.2.2	Belastungseinheit . . . . .	31
3.2.3	Sensoren für den Basisbetrieb . . . . .	33
3.2.4	Erweiterter Betrieb . . . . .	36
3.2.5	Verschaltung . . . . .	41
3.3	Messdatenermittlung . . . . .	42
3.3.1	Reibwert zwischen Bremscheibe und -belag . . . . .	42
3.3.2	Kontakttemperatur . . . . .	47
3.3.3	Optische Untersuchung der Reiboberflächen . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Automatisierte Messung am AUT</b>	<b>55</b>
4.1	Kernaufgaben einer Automatisierung am AUT . . . . .	55
4.2	Kombinierte Mess- und Steuerelektronik . . . . .	57
4.2.1	Anforderungen . . . . .	57
4.2.2	National Instruments compactRIO 9074 . . . . .	58

4.3	Entwicklung der FPGA-Konfiguration . . . . .	61
4.3.1	Struktur und Funktionsweise eines FPGA . . . . .	61
4.3.2	Regelung . . . . .	64
4.3.3	Datenverarbeitung . . . . .	71
4.4	Kommunikation zwischen FPGA und Realtime Controller . . . . .	75
4.4.1	Direct Memory Access . . . . .	75
4.4.2	Lokale Variablen . . . . .	77
4.4.3	Zusammenfassung der Kommunikationswege . . . . .	78
4.5	Echtzeitsteuerung des AUT . . . . .	79
4.5.1	Echtzeit . . . . .	79
4.5.2	Aufbau des Echtzeit-Steuerprogramms . . . . .	82
4.5.3	Realisierung einer Zeitsteuerung in einer Messapplikation . . . . .	85
4.5.4	Implementierung einer Reibmessung . . . . .	87
4.5.5	Vorstellung ausgewählter Regelstrategien . . . . .	89
<b>5</b>	<b>Experimentelle Erprobung des AUT</b>	<b>101</b>
5.1	Analyse ausgewählter Regelstrategien . . . . .	101
5.2	Grundsätzliche Untersuchungen zum Reibwert . . . . .	106
5.2.1	Einfluss unterschiedlicher Reibradien auf die Reibwertentwicklung . . . . .	107
5.2.2	Reibwertdynamik bei Modulation der Drehzahl . . . . .	111
5.2.3	Charakterisierung eines Bremsbelags mit Hinblick auf Reibleistung . . . . .	112
5.3	Messungen mit simulierter Drehträgheit . . . . .	116
5.3.1	Gegenüberstellung von Drehzahlrampen und der Trägheitsregelung . . . . .	116
5.3.2	Wiederholbarkeit der SAE-J2522 (AK-Master) Prüfprozedur . . . . .	117
5.3.3	Bremsvorgänge mit vereinfachten simulierten Fahrermodellen . . . . .	119
<b>6</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>123</b>
	<b>Literatur</b>	<b>127</b>
<b>A</b>	<b>Weitere Abbildungen und Darstellungen</b>	<b>133</b>
<b>B</b>	<b>Berechnungen</b>	<b>139</b>
B.1	Berechnung der Gesamtfedersteifigkeit der Belastungseinheit . . . . .	139
B.2	Berechnung der Regel- und Encoderfrequenzen . . . . .	140
B.3	Herleitung der Beschleunigung am AUT für Bremsungen mit simulierter Trägheit . . . . .	141
	<b>Bildnachweise</b>	<b>145</b>