

Ein multifunktionales Tribomesssystem für stationäre und instationäre Reibmessungen

Von der Fakultät für Maschinenbau

Der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Naser Al Natsheh

aus Hebronn (Westbank)

eingereicht am: 23. April 2010

mündliche Prüfung am: 16. August 2010

Referenten: Prof. Dr.-Ing. G.-P. Ostermeyer

Prof. Dr.-Ing. R. Tutsch

2010

Schriftenreihe Institut für Dynamik und Schwingungen
TU Braunschweig

Naser Al Natsheh

**Ein multifunktionales Tribomesssystem
für stationäre und instationäre Reibmessungen**

Shaker Verlag
Aachen 2010

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., 2010

Copyright Shaker Verlag 2010

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9465-6

ISSN 1865-9101

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

Man sieht nur mit dem Herzen gut. Das Wesentliche ist für die Augen unsichtbar.

Antoine de Saint-Exupéry

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand neben meiner Tätigkeit als Akademischer Rat am Institut für Dynamik und Schwingungen der Technischen Universität Braunschweig.

An erster Stelle gilt mein Dank dem Leiter dieses Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. GEORG-PETER OSTERMEYER, der mich zum Bearbeiten dieser Promotion anregte und mich in all den Jahren wissenschaftlich hervorragend betreute. Seine stete Gesprächsbereitschaft, seine Unterstützung und seine wertvollen Ratschläge und Hinweise haben diese Arbeit erst möglich gemacht.

Großer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. RAINER TUTSCH für seine freundliche Bereitschaft, die vorliegende Arbeit zu begutachten.

Ferner bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. CLAUS-PETER KLAGES für die Übernahme des Vorsitzes im Prüfungsausschuss.

Bei allen derzeitigen und ehemaligen Mitarbeitern des Instituts möchte ich mich für die angenehme Atmosphäre und die kollegiale Zusammenarbeit bedanken. Für die Unterstützung bei der Korrektur dieser Arbeit bedanke ich mich sehr herzlich insbesondere bei meinen Kollegen Frau KATJA HENTRICH, Frau ANNETTE STRUCKMANN, Frau Dipl.-Ing. DOMINIKA DOMBEK, Herrn Dr.-Ing. JAN-HINRICH SICK und Herrn Dr.-Ing. MICHAEL MÜLLER, die stets angenehme Gesprächspartner waren und für Auflockerung der Arbeitsatmosphäre sorgten.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Frau RANA HAIMOUR bedanken, die stets Verständnis für meine lange Abwesenheit hatte und natürlich auch bei meinen lieben Kindern, YARA, ANAS und MALEK, die ich an dieser Stelle um Verzeihung für die endlose Zeit ohne mich bitte.

Braunschweig, im August 2010

Naser Al Natsheh

ZUSAMMENFASSUNG

Reibung ist ein alltägliches Phänomen und tritt in technischen Systemen überall dort auf, wo sich Körper berühren und sich relativ zueinander bewegen. Trotz intensiver theoretischer wie auch experimenteller Bemühungen ist das Verständnis der grundlegenden Ursachen der Reibung und ihrer Zusammenhänge bislang weitestgehend unvollständig.

Moderne Reibtheorien mit dynamischen Reibgesetzen, die den Reibkoeffizienten μ als einen zeitabhängigen Prozessparameter des Tribosystems beschreiben, rücken zunehmend als Erklärungsmodelle für gemessene Reibphänomene in den Vordergrund. Zur Identifikation entsprechender Modellparameter werden neuartige Messmethoden benötigt, die im Gegensatz zu den klassischen Tests in der Lage sind, sowohl stationäre als auch instationäre Messungen zu liefern.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein neuartiges Tribometer entwickelt, aufgebaut und erprobt, das einen dynamischen Zugang zur Messung und Einstellung tribologischer Größen auf einfache Weise ermöglicht. So kann beispielsweise die kontinuierlich abfahrbare Reibweglänge bei gleich bleibenden Abmessungen der Reibkörper um zwei bis drei Größenordnungen im Vergleich zum klassischen Stift-Scheibe-Versuch vergrößert werden. Zudem kann durch die hohe geometrische Auflösung die erzeugte Reibbahn präzise wiederbeschrieben werden, so dass Einlaufvorgänge besser untersucht werden können.

Das entwickelte Tribometer wird im Reiblabor des Instituts für Dynamik und Schwingungen der TU Braunschweig eingesetzt, um die aktuellen theoretischen Arbeiten über die Reibung sowie insbesondere die neuen Reibgesetze durch die Erzeugung hochgenauer empirischer Daten zum Abgleich von Simulationsrechnungen zu unterstützen. Dadurch soll ihre Gültigkeit verbessert werden.

ABSTRACT

Friction occurs in all technical systems at the physical interface between two sliding surfaces in contact. Despite very intensive theoretical and experimental studies to understand the frictional phenomenon, the knowledge about the basic causes of friction and its relationship is yet hardly understood.

Basically there exists a significant interest in dynamic friction models, which describe the coefficient of friction μ as a time dependent process parameter. The identification of the belonging parameters needs a special kind of measurements. This is due to the fact that the measurements with the classical pin on disk arrangement give stationary values of μ only, the measurements of dynamic properties are even infeasible.

A new tribometer for dynamic friction measurements with an extremely extended length of the friction path and versatile variation of the friction parameters has been developed. A high geometrical resolution allows the re-running on the same friction path with a high precision, so that the running-in process of friction couples can be rapidly achieved.

The experimental characteristics and the realization of this novel tribometer are presented by measurements.

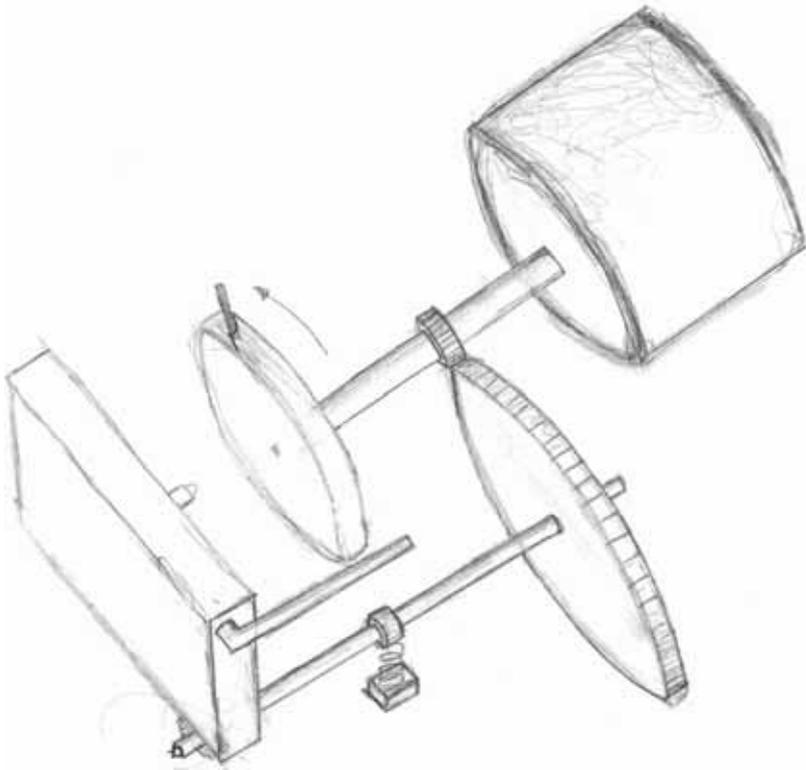


Abbildung I: Erste Gedanken zur Realisierung des Spiraltribometers, Berlin im März 1999

INHALTSVERZEICHNIS

SYMBOLVERZEICHNIS	III
1 EINLEITUNG	1
1.1 MOTIVATION	1
2 STAND DES WISSENS	5
2.1 HISTORISCHE ENTWICKLUNG DER TRIBOLOGIE	5
2.2 STAND DER TRIBOLOGISCHEN FORSCHUNG	14
3 TRIBOLOGISCHE GRUNDLAGEN	17
3.1 KLASSISCHE BESCHREIBUNG DER REIBUNG	17
3.2 MODERNE BESCHREIBUNG DER REIBUNG	21
3.3 BESCHREIBUNG VON TECHNISCHEN OBERFLÄCHEN	30
3.4 GRUNDLAGEN DER REIBUNGSMECHANISMEN	35
3.4.1 Verschleißfreie Reibung	35
3.4.2 Verschleißbehaftete Reibung	35
3.5 DAS TRIBOLOGISCHE SYSTEM	38
4 TRIBOLOGISCHE MESS- UND PRÜFTECHNIK (TRIBOMETRIE)	45
4.1.1 Methoden zur Kraftmessung	47
4.1.2 Häufige Fehlerquellen in der Tribometrie	53
4.2 FAZIT UND AUFGABENSTELLUNG	64
5 DAS SPIRALTRIBOMETER	66
5.1 VORARBEITEN IN BERLIN	67
5.2 GRUNDLAGEN	68
5.2.1 Kinematik des Spiraltribometers	68
5.2.2 Der Gleitwinkel beim Spiraltribometer	72
5.3 DAS GESAMTE MESSSYSTEM	73
5.4 BELASTUNGS- UND POSITIONIEREINHEIT	81
5.5 ANTRIEBSEINHEIT	84
5.6 DAS STEUERPROGRAMM UND DIE BEDIENOBERFLÄCHE	86
5.7 PRINZIPIELLE VORTEILE DES SPIRALTRIBOMETERS	90
6 EIGENSCHAFTEN DES SPIRALTRIBOMETERS	96
6.1 DYNAMISCHE EIGENSCHAFTEN DER BELASTUNGSEINHEIT	96
6.2 EIGENFREQUENZEN DES ANTRIEBSSTRANGES	98
6.3 ORDNUNGSANALYSE	99

6.4	TECHNISCHE DATEN DES TRIBOMETERS	102
6.5	FEHLERANALYSE	103
6.6	KALIBRIERUNG UND JUSTIERUNG DER MESSKETTE	106
7	BEISPIELMESSUNGEN	108
7.1	VERGLEICHSMESSUNGEN MIT DER BAM IM STIFT-SCHEIBE-MODUS	108
7.2	MESSUNGEN IM SPIRALMODUS	113
7.3	EINFLUSS DER NORMALKRAFTSCHWANKUNG AUF DIE MESSERGEBNISSE	116
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	119
9	LITERATURVERZEICHNIS	123

SYMBOLVERZEICHNIS

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
<u>lat. Buchstaben</u>		
a	Länge, Abstand	m
b	Dämpfungskonstante	Ns/m
c	Federsteifigkeit	N/mm
c_{ges}	Ersatzfedersteifigkeit	N/mm
d_k	Kontaktflächendurchmesser	m
e_μ	relativer Messfehler	%
f_0	Eigenfrequenz	Hz
f_{abt}	Abtastfrequenz	Hz
f_g	Grenzfrequenz	Hz
g	Erdbeschleunigung	m/s ²
l	(Profil-)Länge, Bezugsstrecke	m
l_i	Schnittlängen	m
m	Masse	kg
m_{dyn}	dynamische Masse	kg
$n, n_{(t)}$	Drehzahl	1/min
p	Druck	N/m ²
r	Radius	m
s	Bogenlänge, Strecke	m
t	Zeit	s

v	Geschwindigkeit	m/s
v_L	Radialgeschwindigkeit	m/s
v_{krit}	kritische Gleitgeschwindigkeit	m/s
v_{rel}	Relativgeschwindigkeit	m/s
v_{soll}	vorgegebene Relativgeschwindigkeit	m/s
v_T	Tangentialgeschwindigkeit	m/s
\dot{x}	Geschwindigkeit	m/s
\ddot{x}	Beschleunigung	m/s ²
A	Flächen	m ²
D	Dämpfungsmaß	-
E	E-Modul	N/mm ²
E_{kin}	kinetische Energie	J
F	Kraft	N
F_{lat}	laterale Kraft	N
F_{mess}	gemessene Normalkraft in Reibkontakt	N
F_N	Normalkraft	N
F_T	Tangentialkraft	N
F_{wahr}	Wahre Normalkraft in Reibkontakt	N
H	Haftreibungskraft	N
I	Flächenträgheitsmoment	m ⁴
N	Anzahl der Wendungen	-
R	Reibkraft	N
R_a	Mittenrauwert	µm
R_q	Quadratischer Mittenrauwert	m
R_T	tangentiale Reibkraft	N
R_z	Gemittelte Rautiefe	µm
T	Temperatur	K, °C
U_a, U_e	elektr. Spannungen	V

griech. Buchstaben

ε	Kontakt-Eingriffsverhältnis	-
ε	Dehnung	$\mu\text{m/m}$
λ	Wellenlänge	mm
μ	Gleitreibungskoeffizient	-
μ_0	Haftreibungszahl	-
μ_{mess}	gemessene Reibzahl	-
μ_{tat}	tatsächliche Reibzahl	-
σ_z	Standardabweichung	
φ	Drehwinkel	Grad
ω	Kreisfrequenz	Rad/s
Δ	Differenz	
Λ	logarithmisches Dekrement	-
Ω	Erregerkreisfrequenz	Rad/s

Abkürzungen:

IDS	Institut für Dynamik und Schwingungen der TU Braunschweig
<i>exp</i>	Exponentialfunktion
<i>sign</i> (v_{rel})	$\frac{\vec{v}_{rel}}{\ \vec{v}_{rel}\ }$

