

Elektrische Messung der Kontaktfläche an Körpern mit dünnen Widerstandsschichten

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation von

Jan-Hinrich Sick

aus Kiel

eingereicht am 6. November 2008
mündliche Prüfung am 23. März 2009

Referenten

Prof. Dr.-Ing. habil. Georg-Peter Ostermeyer
Institut für Dynamik und Schwingungen, Technische Universität Braunschweig

Prof. Dr. rer. nat. Claus-Peter Klages
Institut für Oberflächentechnik, Technische Universität Braunschweig

Vorsitzender der Promotionskommission

Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch
Institut für Produktionsmesstechnik, Technische Universität Braunschweig

2009

Schriftenreihe Institut für Dynamik und Schwingungen
TU Braunschweig

Jan-Hinrich Sick

**Elektrische Messung der Kontaktfläche
an Körpern mit dünnen Widerstandsschichten**

Shaker Verlag
Aachen 2009

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss. 2009

© Shaker Verlag 2009

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

Printed in Germany

ISBN 978-3-8322-8555-5

ISSN 1865-9101

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 0 24 07 / 95 96 - 0 • Telefax: 0 24 07 / 95 96 - 9
Internet: <http://www.shaker.de> • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während mehrjähriger Tätigkeit am Institut für Dynamik und Schwingungen der Technischen Universität Braunschweig. Herr Professor Dr.-Ing. habil. GEORG-PETER OSTERMEYER, der Leiter des Instituts, ermöglichte diese Arbeit, welche als Grundlagenforschung von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert wurde. Mit vielen anregenden Diskussionen trug er zum Gedeihen des Vorhabens bei und übernahm schließlich die Begutachtung. Herr Professor Dr. rer. nat. CLAUS-PETER KLAGES vom Institut für Oberflächentechnik der Technischen Universität Braunschweig führte die externe Begutachtung durch und ermunterte mich ebenfalls regelmäßig, offenen Fragen nachzugehen. Den Prüfungsvorsitz und den damit verbundenen organisatorischen Aufwand übernahm freundlicherweise Herr Professor Dr.-Ing. RAINER TUTSCH vom Institut für Produktionsmesstechnik der Technischen Universität Braunschweig. Diesen drei Herren danke ich vor allen anderen für Ihren unentbehrlichen Beitrag zur erfolgreichen Bearbeitung dieser Aufgabe.

Meine Kollegen am Institut für Dynamik und Schwingungen waren mir stets gute Gesprächspartner in freundlicher Arbeitsatmosphäre. Herrn NASER AL NATSHEH, Frau ANNETTE STRUCKMANN, Herrn Dr.-Ing. MICHAEL MÜLLER und auch den nicht namentlich aufgeführten Mitgliedern des Instituts sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Die Aufgabenstellung wurzelt in Beobachtungen aus der Zeit meiner Tätigkeit am Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik in Braunschweig. Die Frage nach einer Messung der Kontaktfläche ist jedoch ein Grundlagenthema der Reibungsphysik, weshalb ihre Bearbeitung als Komplement der anwendungsorientierten Forschung an die Universität verlegt wurde. Zuvor war ich unter der Leitung von Herrn Professor Dr. GÜNTER BRÄUER in der Arbeitsgruppe von Herrn HOLGER LÜTHJE damit befasst, gemeinsam mit Frau SASKIA BIEHL und Herrn Dr.-Ing. RALF BANDORF neue Anwendungen für Dünnschichten zu untersuchen. Auch Herr CHRISTIAN SCHWARZMÜLLER und Herr SEBASTIAN STAUFENBIEL leisteten wertvolle Beiträge dazu. Herrn VOLKER SCHMIDT danke ich in diesem Zusammenhang für die Präparation der hier vorgestellten Schichtproben.

Braunschweig, im August 2009

J.-H. SICK

Zusammenfassung

Die Bestimmung der wahren Kontaktfläche fester Körper erweist sich bis heute als messtechnische Herausforderung. Eine möglichst genaue Kenntnis der wahren Kontaktfläche ist jedoch von besonderem Interesse für die Entwicklung der Hypothesen zur Beschreibung des Festkörperkontakts.

Unter Anwendung eines jüngst von DENHOFF veröffentlichten Modells für einen elektrischen Einzelkontakt wird ein Modell für fragmentierte elektrische Kontakte mit definierten Widerstandsschichten vorgeschlagen, welches innerhalb gewisser Grenzen ohne besondere Annahmen zu den geometrischen Größenverhältnissen des einzelnen Mikrokontakts auskommt. Auf dieser Basis wird begründet, wie mit einem minimalen messtechnischen Aufwand der Zusammenhang von elektrischem Kontaktwiderstand, wahrer Kontaktfläche und ihrer Fragmentierung beurteilt werden kann.

Mit diesem Modell für fragmentierte Kontakte wird die messtechnische Anwendung in Gestalt eines neuen Verfahrens zur Bestimmung von Mikrotopographie und mikromechanischen Eigenschaften in einer makroskopischen Testanordnung vorgeschlagen.

Zusätzlich wird der Versuch einer praktischen Umsetzung beschrieben, einschließlich einer Abgleichmethode und Untersuchung der Einflussgrößen, welche die Messunsicherheit bestimmen.

Abstract

Measuring the real area of contact is still challenging. Numerous technical applications would benefit from more accuracy in both measuring and modeling solid body interfaces. A closer look at the contact area is the key in order to achieve precise knowledge of properties of thermal or electrical conductive contacts and of other tribological interfaces.

This thesis presents a model for fragmented conductive surfaces with a resistive coating. It considers the spreading resistance of the resistive layer in rough contacts with respect to the single asperity contact size. The model uses a single contact model, which was recently published by M. W. DENHOFF.

The model for fragmented contacts reveals information about microtopographical and micromechanical properties of a sample using a simple macroscopic experimental setup.

Measurement methods of the real area of contact will be discussed. A method of calibration is included, and also a discussion of variables, which influence the uncertainty of measurement.

Inhalt

1. Einführung	1
1.1 Definition der Kontaktfläche fester Körper	3
1.2 Gebräuchliche Kontakthypothesen	4
1.3 Grundlagen der Kontaktflächenmechanik	5
1.4 Vermessung elektrischer Kontakte	10
1.4.1 Berechnung nach BOWDEN und TABOR	11
1.5 Programm dieser Arbeit	13
2. Messung mit dünnen Widerstandsschichten	15
2.1 Vereinfachte Berechnung der Kontaktfläche	15
2.2 Ausbreitungswiderstand in Schichten	17
2.2.1 Experimentelle Bestimmung der Stromausbreitung	17
2.2.2 Diskretisiertes Kontaktmodell nach NAKAMURA und MINOWA	18
2.2.3 Einfluss der Kontaktform	21
2.2.4 Analytisches Kontaktmodell nach DENHOFF	21
2.2.5 Komplementäres Problem: SRP-Messung	26
2.3 Modell für fragmentierte Kontakte nach KOGUT / KOMVOPOULOS	27
2.4 Kontaktfragmentierung und Stromausbreitung	27
2.5 Modell für fragmentierte Kontakte mit Stromausbreitung in der Widerstandsschicht	30
3. Versuchsaufbau	33
3.1 Laborausstattung	33
3.2 Messtechnisches Konzept für den Festkörperkontakt	37
3.2.1 Grundschialtung zur Messung des Kontaktwiderstands	38
3.2.2 Gleichstrom vs. Wechselstrom	39
3.2.3 Stromregelung vs. Spannungsregelung	41
3.3 Signalbandbreite und Abtastrate	45
3.4 Vermeidung des Spannungsdurchschlags	46

4. Präparation der Proben	47
4.1 Grundwerkstoff	47
4.1.1 Gestalt der Probenkörper (Ebene/Kugel)	48
4.1.2 Topographische Charakterisierung	48
4.1.3 Mikrotopographie der Proben (Rauheit)	49
4.2 Beschichtungsverfahren	56
4.2.1 Schichten auf Kohlenstoffbasis	56
4.2.2 Alternativ verwendbare Schichten	57
5. Bezugsnormal zur Kontaktflächenbestimmung	59
5.1 Quecksilber-Immersion	60
5.1.1 Instationäres Eintauchexperiment	63
5.1.2 Berechnung der flächenbezogenen Widerstandskenngröße	64
5.2 Auswahl des Schichtsystems	64
5.2.1 Frequenzabhängigkeit des Wirkwiderstands	65
5.2.2 Leitfähigkeit und Stromdichte	70
6. Messung der Kontaktfläche im Festkörperkontakt	77
6.1 Versuchsplan	77
6.2 Messergebnisse	79
6.2.1 Abgleich / Bestimmung des Flächenwiderstands	79
6.2.2 Widerstand und Fläche im Festkörperkontakt bei veränderlicher Last	82
7. Messunsicherheit	97
7.1 Systematische Einflüsse	98
7.1.1 Belastungseffekt der Spannungsmessung	98
7.1.2 Beleuchtung / Photoresistivität	99
7.1.3 Druckabhängigkeit der Benetzung	99
7.1.4 Einfluss der Haftschrift	100
7.1.5 Elektromagnetische Interferenz	101
7.1.6 Erdungsschleifen	101
7.1.7 Flächenmessung zum Abgleich	102
7.1.8 Schichtdicke	102
7.1.9 Kontaktspannung	104
7.1.10 Leitungswiderstände	104
7.1.11 Kraftmessung	105
7.1.12 Luftfeuchte	105
7.1.13 Nullpunktabweichung der Strommessung	106
7.1.14 Piezoresistivität	106

7.1.15 Referenzwiderstände / Shunts	107
7.1.16 SCHOTTKY-Kontakt und Memristivität	107
7.1.17 Stromausbreitung in der Widerstandsschicht	109
7.1.18 Temperatur	110
7.1.19 Thermoelektrizität	111
7.1.20 Triboelektrizität	113
7.1.21 Tunneleffekt	113
7.1.22 Unbekannte systematische Fehler	114
7.2 Kontaktimpedanz und Rauschen	114
7.2.1 Thermisches Rauschen	115
7.2.2 Schrotrauschen	116
7.2.3 $1/f$ -Rauschen	116
7.3 Wahl der Kontaktimpedanz	118
8. Schlussfolgerungen	121
8.1 Entwicklungspotential	121
8.2 Nächste Schritte	122
8.3 Messtechnische Anwendung: ein neues Mikroskop	122
Literaturverzeichnis	123
Anhang A Herleitung des Ausbreitungswiderstands	133
Anhang B Spezifikation und Abgleich der Messgeräte	145
B1 Strom- und Spannungsmessung	145
B2 Kraftmessung	147
B3 Temperaturmessung	149
B4 Luftfeuchte	150
Anhang C Eigenschaften des Substrats (Stahl)	153
Anhang D Programme und Auswertung	155
D1 Rohdatenformat	155
D2 Berechnungen mit Mathematica	155
D3 Datenanalyse mit jBEAM	155