

**Reibung von Elastomeren auf rauen Oberflächen  
und Beschreibung von Nassbremseigenschaften  
von PKW-Reifen**

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)  
der Fakultät Physik  
der Universität Regensburg

vorgelegt von

**Ernst Joachim Schramm**

aus Freiburg i. Br.

Regensburg und Hannover 2002

## **Abstract**

J. Schramm:

### **Reibung von Elastomeren auf rauen Oberflächen und Beschreibung von Nassbremseigenschaften von PKW-Reifen**

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung der Gleitreibung von Elastomeren auf rauen Oberflächen im Hinblick auf den Anwendungsfall von PKW-Reifen beim Bremsen auf nasser Fahrbahn unter ABS-Bedingungen. Anders als bei rein elastoplastischen Reibpartnern ergeben sich bei den viskoelastischen Elastomeren komplexe Kontaktbedingungen, die durch die mechanisch-dynamischen Moduln, Gleitgeschwindigkeit und Temperatur beeinflusst werden. Die seit langem bekannten geschwindigkeitsabhängigen Reibwertkurven zeigen ein oberflächen- und elastomerabhängiges Maximum, dessen Ursache in der Literatur unterschiedlich interpretiert wird (Adhäsions- oder Hysteresereibung). Der hier gewählte Ansatz besteht in dem Versuch einer quantitativen Beschreibung mit einem aktuellen Konzept zur Hysteresereibung. Besonderes Augenmerk liegt auf dem Einfluss der geometrischen Oberflächenrauigkeit auf den Reibwert.

In einem Laborexperiment werden mit einer rheologisch einfachen Elastomermischung geschwindigkeitsabhängige Reibwertkurven auf zwei Silizium-Karbid-Oberflächen mit verschiedenen Körnungen sowie einer geglätteten Stahloberfläche erhalten. Als Lubrikanten werden Wasser und Paraffinöle verschiedener Viskosität verwendet. Die Theorie der Hysteresereibung erlaubt erstmalig eine explizite Berechnung der Reibwerte auf den rauen, benetzten Oberflächen unter Berücksichtigung von sowohl mechanisch-dynamischen Materialeigenschaften als auch der Oberflächenrauigkeit. Der Modul bei hohen Anregungsfrequenzen wird dafür aus mechanisch-dynamischen Messungen mit dem Masterverfahren erhalten. Die Modellierung der Kontaktbedingungen ergibt Voraussagen zu Eindringtiefe und Kontaktfläche. Die Theorie der Hysteresereibung liefert für die Geschwindigkeitsabhängigkeit und Rauigkeitsabhängigkeit eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment.

Die im Straßentests von Reifen im Nassbremsen unter ABS-Bedingungen erreichten Bremswege werden maßgeblich von den Reibvorgängen im Kontaktbereich bestimmt. Die Bestimmung des Bremsweges bei 3 Temperaturen auf 4 verschiedenen Straßenoberflächen werden vorgestellt. Im Vergleich zum Laborversuch müssen hier komplexere Bedingungen berücksichtigt werden. Die Messung der Oberflächenrauigkeit erfolgt mit einem Laser- und einem Nadelmesssystemen auf unterschiedlichen Längenskalen. Die Oberflächencharakterisierung mit Hilfe der Höhendifferenzkorrelation ergibt einfache und aussagekräftige Deskriptoren, die den Rauigkeitseinfluss auf den Reibwert bei unterschiedlichen Reibexperimenten beschreiben können.

## **Abstract**

J. Schramm:

### **Friction of Elastomers on Rough Surfaces and Description of Wet Braking Performance of Passenger Car Tires**

This work is dealing with the investigation of sliding friction of elastomers on rough surfaces with regard to the application of passenger car tires braking on wet surfaces under ABS conditions. Other than with pure elastoplastic friction partners, with viscoelastic elastomers complex contact conditions appear which are influenced by the mechanical-dynamical moduli, sliding velocity and temperature. Since a long time known velocity dependent friction curves show a surface- and elastomer dependent maximum the reason for which is suggested diversely in literature (adhesion or hysteresis friction). The here chosen attempt consists of a quantitative description with a nowadays concept of hysteresis friction. Special attention lies on the influence of the geometrical surface roughness to the friction coefficient.

In a laboratory experiment, velocity dependent friction curves are obtained on two silicon-carbide surfaces with different granulation and on a smoothed steel surface. Water and paraffine oils with different viscosity are used as lubricants. The theory of hysteresis friction allows for an explicit calculation of friction coefficients on rough wetted surfaces considering the mechanical-dynamical material properties and the surface roughness. The modulus at high excitation frequencies is obtained by mechanical-dynamical measurements and the master technique. Modelling of contact conditions provides predictions for the penetration depth and the contact area. The theory of hysteresis friction gives good agreement with experiment concerning the velocity dependence and the roughness dependence.

The braking distances obtained in outdoor wet braking tire tests under ABS conditions are mainly influenced of friction processes in the contact area. The determination of the braking distances at 3 temperatures on 4 different street surfaces are presented. In comparison to laboratory tests, there are more complex conditions to be considered. The measurement of the surface roughness is made with a laser system and a needle system on different length scales. The surface characterization by means of the height difference correlation results in simple and meaningful descriptors which can describe the influence of roughness on the friction coefficient for different friction experiments.

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
<b>2 Physikalische Grundlagen der Gummireibung</b>	<b>4</b>
2.1 Gummi und seine viskoelastischen Materialeigenschaften	4
2.1.1 Der Werkstoff Gummi	4
2.1.2 Der mechanisch-dynamische Modul	6
2.1.3 Das viskoelastische Spektrum	7
2.2 Experimentelle Untersuchungen und Modellvorstellungen zur Gummireibung	9
2.2.1 Aufteilung in Adhäsions- und Hystereseanteil	9
2.2.2 Geschwindigkeitsabhängige Reibkurven auf unterschiedlichen Oberflächen	12
2.2.3 Aktuelle Arbeiten zur Reibphysik	16
2.3 Nassbremsen mit PKW-Reifen	19
2.3.1 Relativgeschwindigkeit zwischen Reifen und Fahrbahn	20
2.3.2 Kontaktfläche	22
2.3.3 Empirische Vorhersage der Reifeneigenschaften	23
<b>3 Modellierung der Hysteresereibung</b>	<b>25</b>
3.1 Modelle der Hysteresereibung auf rauen, selbstaffinen Oberflächen	25
3.2 Charakterisierung der Oberflächenrauigkeit	27
3.2.1 Selbstaffine Oberflächen	27
3.2.2 Leistungsdichtespektrum, Autokorrelation und Höhendifferenzkorrelation	28
3.3 Formulierung der Kontaktbedingungen	31
3.4 Hysteresereibung auf rauen Oberflächen	32
3.5 Kopplungswellenlängen	34
<b>4 Experimentelle Untersuchungsmethoden zum Reibverhalten von Elastomeren</b>	<b>35</b>
4.1 Mechanisch-dynamische Eigenschaften der Elastomere	35
4.1.1 Rheometrics Dynamical Analyser	35
4.2 Erfassung der Oberflächenrauigkeit	36
4.2.1 Oberflächenkenngrößen von Straßenoberflächen	36
4.2.2 Laserabstandssensor	38
4.2.3 Mechanisches Tastschnittgerät	40
4.2.4 Vergleich der Messverfahren	41
4.3 Die Reibrad-Apparatur	42
4.4 Nassbremseigenschaften von PKW-Reifen	43
4.4.1 Bremsversuche	43
4.4.2 Gleitbedingungen bei ABS-Bremsungen	45
4.4.3 Fahrbahnrauigkeit	47
4.4.4 Reifentemperatur	47
4.5 Reifenversuche am Innentrommelprüfstand	47

<b>5 Laborexperimente zu grundlegenden Phänomenen der Reibphysik</b>	<b>50</b>
5.1 Charakterisierung des verwendeten Elastomers .....	50
5.1.1 Probenherstellung .....	50
5.1.2 Frequenzabhängige mechanische Moduln.....	51
5.2 Rauheit der Reiboberfläche .....	53
5.3 Reibversuche am Reibrad .....	55
5.3.1 Wahl der Versuchsbedingungen .....	55
5.3.2 Ergebnisse und Interpretation der Versuche.....	56
5.4 Berechnung der Hysteresereibung.....	60
5.4.1 Berechnung der Eindringtiefe.....	61
5.4.2 Berechnung der Hysteresereibkurven.....	62
<b>6 Reifenversuche auf der Straße und im Innentrommelprüfstand</b>	<b>66</b>
6.1 ABS-Nassbremsversuche und Innentrommel-Messungen .....	66
6.1.1 Laufflächenmischungen der Versuchsreifen .....	66
6.1.2 ABS-Nassbremsversuche auf der Straße .....	67
6.1.3 Reifenversuche in der Innentrommel.....	70
6.2 Charakterisierung der Laufflächenmischungen .....	73
6.2.1 Mechanisch-dynamische Charakterisierung.....	73
6.2.2 Darstellung in der Frequenzdomäne.....	75
6.2.3 Bewertung der mechanisch-dynamischen Charakterisierung.....	75
6.3 Methodenentwicklung zur Rauheitsmessung .....	77
6.4 Charakterisierung der Fahrbahnoberflächen.....	80
6.4.1 Höhenverteilungen.....	80
6.4.2 Höhendifferenzkorrelationen.....	81
6.4.3 Oberflächendescriptoren.....	85
6.5 Berechnung der Hysteresereibung.....	85
6.5.1 Berechnung von Eindringtiefe und Kontaktbedingungen .....	86
6.5.2 Berechnung der Hysteresereibkurven.....	89
<b>7 Diskussion</b>	<b>91</b>
7.1 Zur Interpretation der Straßentests .....	91
7.2 Zum Einfluss der Rauigkeit auf den Reibwert.....	92
<b>8 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>95</b>
<b>9 Anhang</b>	<b>98</b>
9.1 Berechnung der fraktalen Dimension .....	98
9.2 Reibwerte aus den Bremsversuchen .....	100
9.3 Mechanisch-dynamische Materialkennwerte .....	101
<b>10 Literatur</b>	<b>105</b>

### 1 Einleitung und Zielsetzung

Reibungsphänomene gehören zu den ältesten Problemen der Physik und zweifellos auch zu den wichtigsten der Praxis [8][16]. Sie spielen bei vielen Transport- und Schwingungsproblemen eine Rolle, wobei die Größe der Reibung selbst in den meisten Fällen als möglichst klein gefordert wird. Bei einem sich drehenden Wagenrad zum Beispiel ist es ein wichtiges Ziel, die in den Lagern und zwischen Rad und Untergrund auftretende Reibung zu minimieren. In anderen Fällen, z.B. wenn ein Auto vor einem Hindernis rechtzeitig zum Stehen kommen muss, werden hohe Reibwerte zwischen Reifen und Straße gewünscht. Um gezielt Reifenmaterialien entwickeln zu können, mit denen auch auf nassen Straßen kurze Bremswege erreicht werden, besteht in der Reifenindustrie ein essentielles Interesse daran, über eine Methode zur Einschätzung des Nassrutschverhaltens einer Reifenmischung zu verfügen. Für die physikalische Beschreibung von bremsenden Autoreifen ist es nötig, die Reibphänomene des gleitenden Kontaktes zwischen Reifengummi und Straßenoberfläche zu kennen und zu quantifizieren. Hier aber zeigt sich, wie bei vielen anderen Phänomenen auch, die Sonderstellung, die der Werkstoff Gummi wegen seiner viskoelastischen Eigenschaften einnimmt [53][54].

Es müssen die örtlich und zeitlich variierenden Kontaktbedingungen zwischen den Oberflächen genauso berücksichtigt werden wie die Möglichkeiten zur internen Energiedissipation im Reifengummi. Durch das temperatur-, amplituden- und frequenzabhängige, nichtlineare Materialverhalten des Elastomers ergeben sich schwer vorauszusagende Kontaktbedingungen. Eine Möglichkeit, die Deformation des Elastomers zu beschreiben, bietet die Anwendung des Greenwood-Williamson-Kontaktmodells auf gleitende Elastomere [29]. Der Einsatz eines Lubrikanten zwischen den Kontaktflächen verändert die Reibeigenschaften drastisch. Dies zeigt sich bereits an den deutlich längeren Bremswegen, die sich ergeben, wenn ein Fahrzeug auf nasser Straße statt auf trockener eine Vollbremsung macht. Zusätzlich zur Bremswegverlängerung verstärkt der Flüssigkeitsfilm den Einfluss anderer Parameter (Laufflächenmischung, Profilgestaltung, Fahrbahnoberfläche) [4]. Durch die Trennschicht ist der direkte Kontakt verhindert und die Adhäsion dadurch zumindest eingeschränkt. Eine wichtige, offene Frage ist die Größe des verbleibenden direkten Kontaktes, der im Modellversuch von der Grenzflächenspannung des Lubrikanten abhängt.

Die Gummireibung auf rauen Oberflächen wird allgemein als aus einem Adhäsionsanteil und einem Hystereseanteil zusammengesetzt betrachtet [45][53]: Der Prozess der Bildung und des Wiederaufbrechens von adhäsiven Verbindungen an den Kontaktstellen resultiert in einem Beitrag zum Reibwert, der als Adhäsionsreibung bezeichnet wird. Der Beitrag der Hysteresereibung entsteht durch die Energiedissipation infolge zyklischer Deformationen des viskoelastischen Elastomers durch die Rauigkeiten des Untergrundes. Im technisch interessierenden Fall kann der Reibpartner des Elastomers als unendlich hart betrachtet werden. Als wesentliche Materialeigenschaft des Elastomers ist demnach das viskoelastische Verhalten kennzeichnend: Für den Reibpartner die Rauigkeit der Oberfläche und für den Lubrikanten die Viskosität sowie die Oberflächenspannung. Außerdem spielen die Umgebungsgrößen wie Gleitgeschwindigkeit, Druck und Temperatur eine wichtige Rolle für die Reibkraft. Ein kritischer Einflussfaktor ist die wahre Kontaktfläche zwischen Elastomer und Reibpartner, die sich experimentell nur sehr schwierig erfassen lässt. Wegen der nichtlinearen, temperatur- und frequenzabhängigen mechanischen Eigenschaften des Elastomers stellt sich je nach den Randbedingungen ein unterschiedliches Kontaktprofil ein. Insbesondere ist bislang ungeklärt, wie hoch der Anteil der Stellen ist, die trotz benetzter Oberfläche einen direkten Kontakt zwischen Elastomer und Oberfläche darstellen. Dies ist besonders für die Aufteilung der Reibkraft in Hysteresereibungskraft und Adhäsionsreibungskraft interessant.

Obwohl eine Vielzahl von experimentellen Untersuchungen mit verschiedenen Elastomermischungen, Reiboberflächen und Lubrikanten bekannt ist (siehe z.B. [3][26][65][67]), blieb eine allgemeine Beschreibung der Elastomerreibung, die sowohl den Einfluss der Oberflächenrauigkeit als auch die Temperaturabhängigkeit beschreiben kann, bisher aus. Besondere Schwierigkeiten machen die experimentell sehr schwer zugänglichen tatsächlichen Kontaktbedingungen. Als ungeklärt kann auch die Größe der für die Reibung tatsächlich maßgeblichen Rauigkeiten gelten. Mit einer neuen Theorie der Hysteresereibung wurde von Heinrich und Klüppel erstmals der Hystereseanteil der Elastomerreibung auf selbstaffinen Oberflächen mit einem theoretischen Modell beschrieben, das die viskoelastischen Materialeigenschaften sowie die Oberflächenrauigkeit berücksichtigt und zusätzlich Voraussagen über die Kontaktbedingungen macht [29][31][41].

### **Zielsetzung dieser Arbeit**

Einen wichtigen Schwerpunkt dieser Arbeit bildet die Umsetzung und Bewertung der von Heinrich und Klüppel vorgestellten Reibtheorie der Hysteresereibung auf selbstaffinen Ober-

flächen anhand ausgewählter Entscheidungs-Experimente. Zu diesem Zweck werden die in der theoretischen Beschreibung getroffenen Annahmen und Abschätzungen auf ihre Stichhaltigkeit geprüft, indem untersucht wird, ob sie bei Einsetzen experimentell gewonnener Messgrößen sinnvolle Aussagen liefern. Damit werden Schlussfolgerungen und Prognosen für physikalische Vorgänge und Bedingungen aufgestellt und begründet.

Es ist für die Beschreibung der Reibkraft wichtig, die mechanisch-dynamischen Kenngrößen, also den Speicher- und den Verlustmodul, in den maßgeblichen Frequenzbereichen zu kennen. Hier entsteht eine experimentelle Schwierigkeit, da es mit gegenwärtigen Messmethoden nur möglich ist, einen begrenzten Ausschnitt des Frequenzspektrums zu erfassen. Die Methoden, mit Masterverfahren oder der WLF-Transformation über das Frequenz-Temperatur-Superpositionsprinzip auch die fehlenden Frequenzbereiche zu erfassen, funktionieren streng genommen nur bei einfachen Systemen und stoßen bei den interessierenden komplexen Systemen an Grenzen, da diese aus gefüllten Blends bestehen, deren Komponenten eine unterschiedliche Glastemperatur aufweisen [17]. Ein wesentlicher Teil der Arbeit ist deshalb Untersuchungen gewidmet, die die mechanisch-dynamische Charakterisierung der Elastomere bei hohen Frequenzen zum Ziel haben.

Als Hintergrund und Motivation dient eine Versuchsreihe, die eine Untersuchung der Brems-eigenschaften von PKW-Reifen auf nasser Strasse sowie eine umfassende Charakterisierung der Mischungen mit Labormethoden beinhaltet. Dieses Messprogramm ermöglicht es, die Labormethoden im Hinblick auf eine unmittelbare Vorhersage zu überprüfen, und bildet die Basis für die Rückführung der Reibeigenschaften auf die Viskoelastizität. Die Elastomereigenschaften der Mischungen werden über unterschiedliche Rezepturen variiert; als Reibpartner werden verschiedene Straßenbeläge verwendet. Um eine aussagekräftige Beschreibung der Oberflächen zu erhalten, werden die Oberflächenrauigkeiten auf verschiedenen Längenskalen erfasst. Ziel der Untersuchungen ist es dann, durch Vergleich von Mischungen, Reiboberflächen und mechanischen Prüfgrößen prinzipielle Aussagen über die Einflussgrößen zu erhalten, welche die Reibeigenschaften der Elastomere unter den vorgegebenen Bedingungen bestimmen.