

# 70

Karlsruher Schriftenreihe  
Fahrzeugsystemtechnik

Matthias Bürckert

**Realitätsnahe Bewertung des  
Einflusses der Oberflächenspan-  
nung flüssiger Zwischenmedien  
auf den maximalen Reibschluss  
zwischen Reifen und Fahrbahn**



Scientific  
Publishing



Matthias Bürckert

**Realitätsnahe Bewertung des Einflusses  
der Oberflächenspannung flüssiger  
Zwischenmedien auf den maximalen  
Reibschluss zwischen Reifen und Fahrbahn**

**Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik  
Band 70**

Herausgeber

**FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik**

Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

Das Institut für Fahrzeugsystemtechnik besteht aus den Teilinstituten Bahnsystemtechnik, Fahrzeugtechnik, Leichtbautechnologie und Mobile Arbeitsmaschinen.

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe erschienenen Bände finden Sie am Ende des Buchs.

# **Realitätsnahe Bewertung des Einflusses der Oberflächenspannung flüssiger Zwischenmedien auf den maximalen Reibschluss zwischen Reifen und Fahrbahn**

von  
Matthias Bürckert

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie  
KIT-Fakultät für Maschinenbau

Tag der mündlichen Prüfung: 9. Januar 2019  
Hauptreferent: Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin  
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Ralf Roos

#### Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
KIT Scientific Publishing  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark  
of Karlsruhe Institute of Technology.  
Reprint using the book cover is not allowed.

[www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu)



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed  
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License  
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons  
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2019 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 1869-6058

ISBN 978-3-7315-0891-5

DOI 10.5445/KSP/1000090300







# Vorwort des Herausgebers

Die Fahrzeugtechnik ist kontinuierlich Veränderungen unterworfen. Klimawandel, die Verknappung einiger für Fahrzeugbau und -betrieb benötigter Rohstoffe, globaler Wettbewerb, gesellschaftlicher Wandel und das rapide Wachstum großer Städte erfordern neue Mobilitätslösungen, die vielfach eine Neudefinition des Fahrzeugs erforderlich machen. Die Forderungen nach Steigerung der Energieeffizienz, Emissionsreduktion, erhöhter Fahr- und Arbeitssicherheit, Benutzerfreundlichkeit und angemessenen Kosten finden ihre Antworten nicht aus der singulären Verbesserung einzelner technischer Elemente, sondern benötigen Systemverständnis und eine domänenübergreifende Optimierung der Lösungen.

Hierzu will die Karlsruher Schriftenreihe für Fahrzeugsystemtechnik einen Beitrag leisten. Für die Fahrzeuggattungen Pkw, Nfz, Mobile Arbeitsmaschinen und Bahnfahrzeuge werden Forschungsarbeiten vorgestellt, die Fahrzeugsystemtechnik auf vier Ebenen beleuchten: das Fahrzeug als komplexes mechatronisches System, die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion, das Fahrzeug in Verkehr und Infrastruktur sowie das Fahrzeug in Gesellschaft und Umwelt.

Die Fahrsicherheit von Kraftfahrzeugen hängt entscheidend von der Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn ab. Diese wird von zahlreichen Parametern des Reifens, des Fahrwerks, der Fahrbahn, der Betriebsbedingung und der Umgebung beeinflusst. Ein Verständnis der Zusammenhänge ist beispielsweise für das automatisierte Fahren für die Vorhersage der Fahrbahngriffigkeit von großer Bedeutung. Während es umfangreiche Untersuchungen zu den Mechanismen der Kraftübertragung auf trockenen und nassen Fahrbahnen gibt, wurde der Einfluss von im Wasser gelösten oder dispergierten Stoffen bislang

weniger detailliert betrachtet. Hier sind vor allem Salze, Kalk und Tenside relevant. Ablagerungen auf der Fahrbahn können sich in längeren Trockenperioden anhäufen und bei anschließendem Regen die Griffigkeit der Fahrbahn stark herabsetzen.

Hierbei sind die Änderung der Oberflächenspannung und der Viskosität des Wassers bedeutsam. Auf den Einfluss der Oberflächenspannung des Wassers auf den maximalen Reibbeiwert zwischen bewässerten Elastomer- und Fahrbahnoberflächen fokussiert Herr Bürckert seine Arbeit. Zur Veränderung der Oberflächenspannung verwendet er Tenside, die sich auch auf Fahrbahnen aus organischen Rückständen bilden können. Mit Hilfe eines selbst entwickelten Griffigkeitsprüfstands ermittelt er den Einfluss verschiedener Parameter auf das Maximum der Seitenkraft über dem Schräglaufwinkel von Vollgummiringen, die auf gewässerten rotierenden Fahrbahnproben abrollen. Er erstellt dafür ein statistisches Vorhersagemodell, das er auf der Basis von Messungen der dispersen und polaren freien Oberflächenenergie der beteiligten Reibpartner und Zwischenmedien und eines von ihm vorgeschlagenen Vier-Zonen-Modells des wässrigen Reifen-Fahrbahn-Kontakts physikalisch interpretiert. Durch statistische Vergleiche mit Seitenkraftmessungen von Pkw-Reifen auf einer gewässerten Fahrbahnoberfläche in einem Innentrommelprüfstand zeigt er die Relevanz und Übertragbarkeit seiner Untersuchungsergebnisse auf reale Reifen.

Frank Gauterin

Karlsruhe, 22.01.2019

# **Realitätsnahe Bewertung des Einflusses der Oberflächenspannung flüssiger Zwischenmedien auf den maximalen Reibschluss zwischen Reifen und Fahrbahn**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)**  
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte  
**Dissertation**  
von

Dipl.-Ing Matthias Bürckert  
aus Bad Mergentheim - Apfelbach

Tag der mündlichen Prüfung:	09.01.2019
Hauptreferent:	Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin
Korreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Ralf Roos



# Kurzfassung

## **Titel: Realitätsnahe Bewertung des Einflusses der Oberflächenspannung flüssiger Zwischenmedien auf den maximalen Reibschluss zwischen Reifen und Fahrbahn**

Auf regennasser Fahrbahn ist der Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn im Vergleich zur trockenen Fahrbahn zum Teil deutlich reduziert. Dies führt dazu, dass im Straßenverkehr auf nasser Fahrbahn im Vergleich zu trockener Fahrbahn verhältnismäßig viele Unfälle, mit zum Teil erheblichen Folgen, geschehen.

Nach langer Trockenzeit kann nun direkt nach einsetzendem Regen der Fall eintreten, dass der Reibwert auch im Vergleich zu nasser Fahrbahn zusätzlich noch erheblich reduziert sein kann. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass sich nicht reines Wasser als Zwischenmedium im Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn befindet, sondern dass in diesem Wasser auf der Straßenoberfläche befindliche Verschmutzungen gelöst oder dispergiert sein können. Diese Verschmutzungen können nun dazu führen, dass sich die Viskosität oder/und die Oberflächenspannung und damit die Benetzungseigenschaften des Wassers verändert und sich dies nachteilig auf die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn auswirkt.

Vor diesem Hintergrund verfolgt diese Arbeit das Ziel, den Einfluss der Oberflächenspannung und damit der Benetzungseigenschaften des Zwischenmediums Wasser auf die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn zu untersuchen. Der Einfluss der Viskosität wird innerhalb dieser Arbeit nicht näher betrachtet.

Zu diesem Zweck wurde im ersten Schritt eine Untersuchungsmethode erarbeitet und eine Prüfumgebung entwickelt und aufgebaut, die es

gestattet, den Einfluss der Oberflächenspannung flüssiger Zwischenmedien auf die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn im rollenden Kontakt realitätsnah zu beleuchten.

Im zweiten Schritt wird eine Modellvorstellung bzw. eine Forschungshypothese vorgestellt, mit welcher der Einfluss der Oberflächenspannung und weiterer Parameter auf die Reibung zwischen Reifen und nasser Fahrbahn nachvollzogen werden kann. Diese Modellvorstellung greift das von MOORE [Moo 72] entwickelte Drei-Zonen-Modell auf und erweitert dieses in dieser Arbeit zum Vier-Zonen-Modell.

Durch empirische Parameterstudien werden schließlich die Einflüsse der Oberflächenspannung flüssiger Zwischenmedien und weiterer Parameter auf den maximalen Reibwert untersucht. Über mathematisch-statistische Modellbildung werden die Auswirkungen der variierten Parameter bewertet und im Kontext des vorgestellten Vier-Zonen-Modells diskutiert.

Zur Veranschaulichung der Auswirkungen der Oberflächenspannung flüssiger Zwischenmedien auf die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn werden die in dieser Arbeit ermittelten Untersuchungsergebnisse abschließend vereinfacht auf ein praxisnahes Beispiel angewandt.

# Abstract

## **Title: Realistic evaluation of the influence of surface tensions of liquid intermediate substances on tire road friction**

In contrast to dry roads, where the tire/road grip is larger, the grip of a car tire is generally reduced on wet roads. This leads to comparatively more accidents on wet roads as opposed to the same roads when the surfaces were dry.

Additionally, after a certain spell of dry weather, rain on the road can make the surface even more slippery. This is due mainly to surface contamination such as oil or dust, polluting the water and resulting in poor gripping of the road by the tires. In fact, as the contaminants substantially influence the viscosity and/or the surface tension, they also affect the surface-wetting property of the water; and this will eventually cause a severe decrease in the tire/road grip.

It is within this context that the present work aims at investigating the influence of the surface tension (and thereby the surface-wetting property in the tire/road interface of the intermediary medium) on the grip between the tire and the road surface. The influence of viscosity does not form part of this work.

A method has been devised to systematically achieve the goal outlined above. Further, for an appropriate approach towards this goal a testing environment has been developed that permits the realistic investigation of the influence of the surface tension of liquid intermediary mediums on the tire/road grip in the contact area between tire and road.

The type of model employed is provided also, together with a specific research hypothesis. The idea behind the model presented here is that

it allows to reconstruct the influence of the surface tension and further parameters on the grip between the tire and the wet road surface. It is based on the so-called “Three-Zone-Model” of MOORE [Moo 72], which here is extended to a “Four-Zone-Model”.

The influence of the surface tension of liquid intermediary mediums and other parameters on the maximum grip are further investigated in experiment. Results show the effects of varying parameters as they are evaluated through statistical models. These are discussed in detail.

Finally, a simple application example is studied to illustrate as to how the results of this investigation can be applied to illustrate the effects of surface tension of liquid intermediary mediums on the grip between the tire and the road surface.



# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin danke ich für mein sehr interessantes Forschungsthema und für die Unterstützung meines Promotionsvorhabens. Für unsere vielen konstruktiven Gespräche, die inhaltlichen Anregungen und seine Unterstützung meiner Ideen bin ich sehr dankbar.

Ebenso gilt mein Dank meinem Korreferenten Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Ralf Roos für die freundliche Übernahme des Korreferats und seine Anmerkungen zu meiner Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und sein Interesse an meiner Arbeit.

Dem Laborleiter des Instituts, Herrn Dr.-Ing. Hans-Joachim Unrau, danke ich für sein unglaubliches Engagement, die unzähligen interessanten und lehrreichen Diskussionen und Gespräche, seine immer geduldige Unterstützung und immer wertvollen Anmerkungen zu meiner Arbeit.

Den immer hilfsbereiten Kollegen im Labor und in der Werkstatt, Günter Wildemann, Dipl.-Ing. (BA) Andreas Freund, Julian Deeg, Kerstin Dietrich und Markus Diehm gilt mein Dank für die Unterstützung bei der Entwicklung und dem Aufbau des Griffigkeits- und Abriebprüfstandes und bei der Durchführung der empirischen Untersuchungen. Ihre vielfältigen Erfahrungen und Ihre Hilfsbereitschaft waren für die Umsetzung der theoretischen Ideen in die Praxis stets hilfreich.

Außerdem gilt mein Dank den Studenten, Johannes Gromes, Fabien Grimmig, Fabian Gottschalk, Heiko Wehner, Matthias Köck, Jan Rieder, Gregor Kochendörfer, Lisa Weiss, Marco Bender und Florent Bertrand, deren Abschlussarbeiten ich betreuen durfte und die auf diesem Wege wichtige Erkenntnisse zu meiner Arbeit beigetragen haben.

Weiterhin danke ich ganz herzlich meinen Doktoranden- und Institutskollegen für das großartige, immer wieder motivierende und freundschaftliche Arbeitsklima am Institut. Sie haben einen großen Anteil daran, dass ich die Jahre am Institut als etwas Außergewöhnliches in Erinnerung behalten werde. Ein besonderes Dankeschön gilt hierbei meinen Zimmerkollegen, Matthias Greiner, Johannes Gültlinger, Patrick Riehm und Rene Armbruster, für die vielen konstruktiven, zerstreuenden und kreativen Diskussionen. Zudem ein dickes Dankeschön an die Kollegen, Matthias Pfriem, Felix Bleimund und Lisa Weiss, die jederzeit überaus hilfsbereit waren und Ihre Gedanken in meine Arbeit mit einfließen ließen.

Meinem Kollegen und Freund Matthias Greiner danke ich hierbei in ganz besonderem Maße. Seine Freundschaft verhalf mir jederzeit jegliche Motivationstiefs zu überwinden um wieder frisch und frei ans Werk zu gehen.

Meinem „Quasi“-Kollegen und Freund Christian Dold vom Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik (IWM) in Freiburg danke ich für die unzähligen Diskussionen und die praktischen sowie auch theoretischen Hilfestellungen.

Meinen Freunden Christoph Ettwein, Marco Cipolla und Michael Bär gebührt mein herzlichster Dank für allzeit offene Ohren, viele interessante und motivierende Gespräche und für mich so manche wichtigen Unterstützungen.

Meiner Tante Elisabeth Ettwein danke ich für Ihr großes Engagement bezüglich der Korrekturanmerkungen meine Ausarbeitung betreffend.

Abschließend spreche ich meinen größten Dank meiner Familie für die stete Unterstützung durch Studium und Promotion aus. Sie verstanden es dabei, mich in jeder Hinsicht zu unterstützen, mehr als ich es mir hätte wünschen können. Nur dadurch war dies überhaupt möglich!

Herzlichen Dank!

Matthias Bürckert

Karlsruhe, im Januar 2019



# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	i
Abstract.....	iii
Danksagung.....	v
<b>1. Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Stand der Forschung .....	5
1.3 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit.....	16
1.3.1 Zielsetzung.....	16
1.3.2 Abgrenzung der Arbeit.....	16
1.4 Inhaltliche Strukturierung.....	18
<b>2. Allgemeine Grundlagen.....</b>	<b>21</b>
2.1 Grundlagen zur Kraftübertragung von PKW-Reifen .....	22
2.1.1 Kinematik und Kinetik des Reifens unter Schräglauf .....	22
2.1.2 Seitenkraftcharakteristik von Reifen .....	25
2.1.3 Mechanismen der Reibkraftübertragung.....	29
2.2 Straßenoberfläche .....	38
2.2.1 Fahrbahnaufbau / -material .....	39
2.2.2 Fahrbahntextur.....	40
2.3 Zwischenmedien .....	42
2.4 Labor-Messverfahren zur Kraftübertragung zwischen Reifen/Gummi und Fahrbahn.....	45
2.4.1 Innentrommelprüfstand (IPS) am FAST.....	46
2.4.2 Prüfstand nach GROSCH / LAT100.....	48

<b>3.</b>	<b>Forschungsansatz und -methode</b>	51
3.1	Modellvorstellungen und Forschungshypothese	51
3.1.1	Vom Reifen zum Gummigleitkörper	52
3.1.2	Modellvorstellung am Gummigleitkörper	53
3.1.3	Modellvorstellung für den abrollenden Reifen bzw. das abrollende Gummirad	57
3.1.4	Forschungshypothesen	60
3.2	Untersuchungsmethode	62
<b>4.</b>	<b>Versuchseinrichtung und Messverfahren</b>	67
4.1	Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT)	67
4.1.1	Konstruktiver Aufbau	68
4.1.2	Datenerfassung / Spezifikationen	73
4.1.3	Versuchsdurchführung / -auswertung	74
4.1.4	Reproduzierbarkeit / Erwartete Genauigkeit	90
4.1.5	Bewertung und Abgrenzung zu bestehenden Verfahren	93
4.2	Untersuchung der Übertragbarkeit der Messergebnisse auf Reifenmessungen	94
4.2.1	Untersuchungsmethode	94
4.2.2	Versuchsdurchführung	97
4.2.3	Bewertung der Übertragbarkeit	117
<b>5.</b>	<b>Charakterisierung von Festkörperoberflächen und von Flüssigkeiten</b>	119
5.1	Definition der Oberflächenenergie	120
5.2	Bestimmung der freien Oberflächenenergie von Festkörpern	121
5.2.1	Grundlagen	122
5.2.2	Charakterisierung exemplarischer Oberflächen	125
5.3	Bestimmung der Oberflächenspannung von Flüssigkeiten	132
5.3.1	Grundlagen	133
5.3.2	Charakterisierung von Zwischenmedien	135

---

5.4	Charakterisierung des Benetzungszustandes von Festkörpern .....	141
5.4.1	Benetzbarkeitsbereich (Wetting Envelope) .....	141
5.4.2	Kenngrößen zur Charakterisierung des Benetzungszustandes .....	144
5.5	Dynamische Viskosität .....	146
<b>6.</b>	<b>Parameterstudien am GAT und Diskussion der Ergebnisse .....</b>	<b>149</b>
6.1	Versuchsdurchführung.....	149
6.2	Parametervariationen.....	150
6.3	Exemplarische Ergebnisse von Einzeluntersuchungen	154
6.4	Mathematisch-statistische Modellbildung .....	155
6.4.1	Modellansatz und Schätzung der Regressionskoeffizienten .....	155
6.4.2	Bewertung der Modellgüte.....	166
6.5	Exemplarische Übertragung der Ergebnisse auf eine realitätsnahe Anwendung.....	167
6.5.1	Modellvorstellung und Annahmen.....	167
6.5.2	Einfluss der Oberflächenspannung flüssiger Zwischenmedien auf den Bremsweg bei Vollbremsung .....	168
6.6	Schlussbetrachtung.....	171
<b>7.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>173</b>
7.1	Zusammenfassung.....	173
7.2	Ausblick.....	175
7.2.1	Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT) .....	175
7.2.2	Parametervariationen.....	176
7.2.3	Oberflächenaktive Substanzen .....	177
7.2.4	Allgemeine Hinweise.....	178

<b>A.</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>179</b>
<b>B.</b>	<b>Formelzeichen .....</b>	<b>181</b>
<b>C.</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>185</b>



# 1. Einleitung

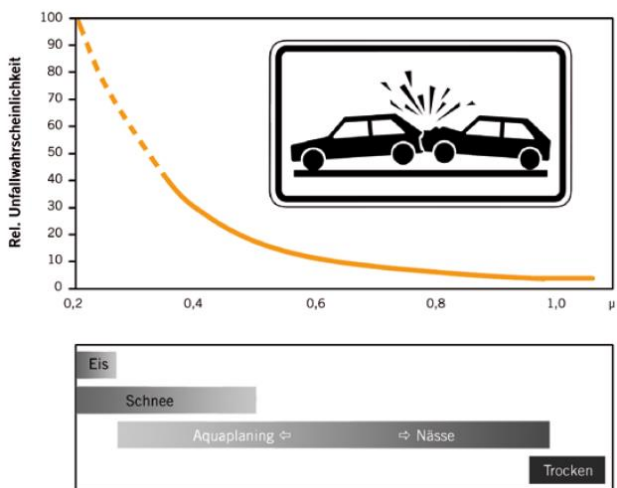
## 1.1 Motivation

Der Reifen ist die einzige Komponente des Fahrzeugs, die sich im direkten Kontakt mit der Oberfläche der Fahrbahn befindet. Er hat die Aufgabe, durch Abrollen die Fortbewegung des Fahrzeugs zu ermöglichen und dabei die wichtige Funktion, wechselwirkend mit der Fahrbahnoberfläche durch die Übertragung von Kräften und Momenten Fahrmanöver möglichst sicher zu gestalten. Unter möglichst hoher Sicherheit ist hier zu verstehen, dass zwischen den vorliegenden und den maximal möglichen Kräften (Reibkräften) möglichst große Reserven vorhanden sein sollten, welche in Notsituationen (Bsp. Vollbremsung oder schneller Spurwechsel) ausgeschöpft werden können, um drohende Unfälle zu vermeiden. Außer dem Reifen und der Fahrbahn wirkt sich eine Vielzahl weiterer Parameter (Bsp. Temperaturbedingungen, vorhandene Zwischenmedien usw.) auf die maximal möglichen übertragbaren Kräfte im Kontakt aus (siehe BACHMANN [Bac 96]).

Aus persönlichen Erfahrungen ist es der Vielzahl der Verkehrsteilnehmer bekannt, dass die auf nasser Fahrbahn maximal möglichen Antriebs-, Brems- und Seitenführungskräfte (die aus der Reibung im Kontakt resultieren) im Vergleich zur trockenen Fahrbahn zum Teil erheblich reduziert sein können. Hieraus ergeben sich zwangsläufig längere Bremswege bzw. geringere maximal mögliche Kurvengeschwindigkeiten, mit welchen Kurven sicher durchfahren werden können. Die Reduzierung der maximalen Antriebs- und Bremskräfte auf nasser Fahrbahn wurde unter anderem von GNADLER [Gna 95], [Gna 96] untersucht.

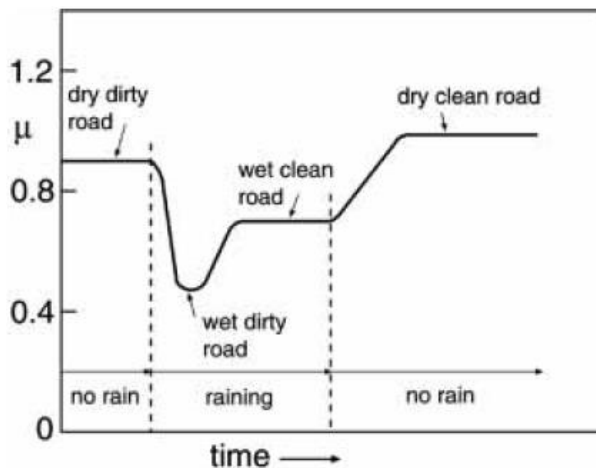
Laut KALENDER [Kal 86] wirkt sich Nässe erheblich auf die Unfallzahlen aus. Er folgert aus seinen Auswertungen, dass die Griffigkeit einer Fahrbahn einen direkten Einfluss auf die Verkehrssicherheit hat, was er dadurch belegt, dass 30 % der Gesamtunfälle pro Jahr bei Nässe auftreten, wobei sich die Straßenoberfläche zeitlich nur zu 5 - 15 % im „nassen“ Zustand befindet. Weitere Untersuchungen zum Einfluss der Nässe als Unfallursache wurden unter anderem bereits von BECKMANN [Bec 64], WEHNER [Weh 75] und HIERSCHE [Hie 87] durchgeführt. Auch diese Untersuchungen unterstreichen den Einfluss der Nässe als Unfallursache.

Der Zusammenhang zwischen der relativen Unfallwahrscheinlichkeit und dem Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn wurde von SCHULZE [Sch 10] in Abbildung 1 veranschaulicht. Hieraus ist direkt ersichtlich, dass zwischen den beiden gegenübergestellten Größen ein direkter Zusammenhang besteht (→ bei höheren Reibwerten besteht eine geringere Unfallwahrscheinlichkeit).



**Abbildung 1:** Relative Unfallwahrscheinlichkeit über dem Reibwert  $\mu$  aus [Sch, 10] unter Verwendung der Daten aus [Slu, 02]

Viele Verkehrsteilnehmer haben bereits selbst die Erfahrung gemacht bzw. machen müssen, dass nach längeren Trockenperioden und dann einsetzendem Regen die maximal möglichen übertragbaren Kräfte zusätzlich erheblich reduziert sein können [Per 04a]. Die Fahrbahnoberfläche scheint dann sehr glatt, rutschig oder schmierig zu sein. Zur Einschätzung, dass sich bei einsetzendem Regen auf verschmutzter Fahrbahn ein Schmierfilm ausbilden kann, kommt auch LITZKA [Lit 88]. Dieser Sachverhalt lässt sich in Abbildung 2 nachvollziehen. In diesem Diagramm wurde von PERSSON [Per 04a] der Verlauf des Reibwertes über der Zeit vor, während und nach einem Regenschauer nach einer längeren Trockenperiode veranschaulicht.



**Abbildung 2:** Abhängigkeit des Reifen-Fahrbahn-Reibwertes über die Zeit vor, während und nach einem Regenschauer aus [Per, 04a]

PERSSON erläutert den Kurvenverlauf wie folgt: Vor dem Einsetzen des Regens liegt eine trockene, wenn auch verschmutzte Fahrbahnoberfläche vor und es ergibt sich ein relativ hoher Reibbeiwert. Nach dem Einsetzen des Regens fällt der Reibwert sehr stark ab, da sich aus dem Regenwasser und vorhandenen Verunreinigungen (Bsp.

Steinpartikel, Gummiabrieb, ...) ein Wasser-Schmutzgemisch (hochviskoses Zwischenmedium) bildet, was sich negativ auf den maximal möglichen Reibwert auswirkt (siehe auch [Sca 12]). Mit fortschreitender Regendauer steigt der Reibwert wieder an, was durch die Verdünnung des Wasser-Schmutzgemisches bzw. das Wegspülen der Verunreinigungen erklärt werden kann. Trocknet die Fahrbahnoberfläche nun wieder vollständig ab, kann ein höherer Reibwert im Vergleich zum Ausgangszustand (verschmutzt) beobachtet werden, da nun eine saubere, trockene Fahrbahnoberfläche als Reibpartner vorliegt. PERSSON zeigt in [Per 04a] jedoch auch, dass der Einfluss der Viskosität des Wassers, falls dieses rein und unverschmutzt vorliegt, beispielsweise beim Effekt des Aquaplaning vernachlässigt werden kann und dass dabei hauptsächlich die Trägheit des Wassers bei dessen Verdrängung von Bedeutung ist.

In [Per 98] wird angenommen, dass es nur unter Laborbedingungen „saubere“ Oberflächen gibt und die meisten Oberflächen stets mit einer organischen Schmutzschicht überzogen sind. Diese Annahme wird mit einer Untersuchung belegt, bei der eine Metalloberfläche unter Vakuum gereinigt wurde und diese bereits nach wenigen Stunden unter normaler Atmosphäre wieder durch eine ca.  $10 \text{ \AA}$  ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ) dicke Schmutzschicht überzogen war. Hieraus könnte geschlossen werden, dass auch bereits nach relativ kurzen Trockenphasen und einsetzendem Regen der beschriebene Effekt, wenn auch in abgeschwächter Form, auftreten kann.

KENDZIORRA erwähnt in [Ken 05], dass es auf Fahrbahnoberflächen nach langen Trockenperioden unter dem Einfluss von Ozon und UV-Strahlung zur Bildung von Detergenzien (Detergenzien = Tenside) natürlichen Ursprungs kommen kann, was zu einer gefährlichen Glättebildung führen kann. In [Ken 09] beschreibt er, dass der Einfluss von Tensiden in allen von ihm betrachteten Untersuchungen zu einem Abfall des Reibwerts führte. Gründe hierfür könnten seiner Meinung nach die Oberflächenspannungs-Problematik und / oder die Änderung der Viskosität des Zwischenmediums sein.

Es ist naheliegend, dass sich die Kombination aus der von KENDZIORRA [Ken 05] erwähnten Oberflächenspannungs-Problematik (hervorgerufen durch Detergenzien natürlichen Ursprungs) und die von PERSSON [Per 04a] erwähnte Änderung der Viskosität (aufgrund des hohen Schmutzanteils) auf den Abfall der Reibung (in Abbildung 2) nach dem Einsetzen des Regens auswirken könnte. Welchen Anteil die jeweiligen Beiträge zum Gesamteffekt des Reibungsabfalles beitragen, wird vermutlich von der Geschwindigkeit, den Temperaturbedingungen und weiteren Parametern beeinflusst.

Weiterhin ist denkbar, dass sich ebenfalls die von PERSSON in [Per 98] beschriebene dünne Schmutzschicht, die in der Realität meist auf Oberflächen vorkommen wird, bei einem Regenschauer vollständig oder teilweise im Wasser löst oder dispergiert wird und dessen physikalische Eigenschaften (Oberflächenspannung, Viskosität, ...) verändert.

Zusätzlich zu den bereits erwähnten Verunreinigungen (Fahrbahnabrieb, Gummiabrieb, natürliche Detergenzien, ...), können sich auf Fahrbahnoberflächen weitere Substanzen befinden, die sich auf die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn auswirken. Diese Substanzen können zum einen Feststoffe (Streusalz, Rollsplitt vom Abstreuen, ...) oder auch Flüssigkeiten (Streusalz-Wasserlösung, Taumittel, Öl, Benzin, Düngemittelreste, ...) sein.

In dieser Arbeit soll nun der Einfluss der Oberflächenspannung des Zwischenmediums Wasser auf die maximale Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn untersucht werden. Der Einfluss der Viskosität des Zwischenmediums wird nicht näher betrachtet.

## **1.2 Stand der Forschung**

In der Literatur wurde bereits eine sehr große Anzahl an Untersuchungen zur Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn

vorgestellt. Zu diesem Themengebiet führte BACHMANN [Bac 96] die Literaturrecherche „Literaturrecherche zum Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn“ (umfasst ca. 450 Quellen) durch, die den Einfluss vieler unterschiedlicher Einflussgrößen zusammenfasst.

EICHHORN [Eic 94] liefert in seiner Dissertation einen Überblick über Parameter, die sich auf die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn auswirken. Er listet die folgenden Parameter auf:

- Fahrzeug (Geschwindigkeit, Radlast, Radstellung, ...)
- Reifen (Bauart, Typ, Luftdruck, Profilizustand, Temperatur, ...)
- Zwischenmedien (Art, Schichtdicke, Aggregatzustand, ...)
- Fahrbahn (Material, Textur, Scherfestigkeit, ...)

Schon durch die Auswahl der hier aufgeführten Parameter wird deutlich, welche Komplexität das Themengebiet der Reifen-Fahrbahn-Reibung aufweist. Dies zeigt auch, dass allumfassende Untersuchungen nur sehr schwer bzw. praktisch nicht möglich sind. Zusätzlich ist hier zu beachten, dass zwischen den angeführten Parametern Wechselwirkungen bezüglich der Auswirkung auf die Reibung bestehen bzw. bestehen können und der Einfluss einzelner Parameter meist nicht für sich isoliert untersucht werden sollte (siehe auch [Bac 98]). Dies lässt sich am Beispiel des Einflusses des Zwischenmediums Wasser leicht nachvollziehen. Verändert sich die Wasserhöhe im Reibkontakt, hat dies für unterschiedliche Reifenprofile unterschiedliche Auswirkung auf die entstehenden Reibkräfte. Ähnliches gilt auch für unterschiedliche Fahrbahnoberflächenstrukturen, da gröbere Strukturen analog zu größeren Reifenprofilen das Wasser besser aus dem Kontakt abführen.

Da sich die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit dem Einfluss der Oberflächenspannung des Wassers auf die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn widmet, werden an dieser Stelle zunächst einige ausgewählte allgemeinere Literaturhinweise zum Einfluss des Zwischenmediums Wasser auf den Reifen-Fahrbahnkontakt gegeben.

GENGENBACH [Gen 68a], [Gen 68b], [Gen 68c], [Gen 70] untersuchte unter anderem den Einfluss unterschiedlicher Wasserhöhen auf Reibbeiwerte bzw. auftretende Reibkräfte und variierte dabei die Anpresskraft, die Geschwindigkeit, die Reifenprofilform (auch profillos), die Reifenprofilhöhe und den Reifenfülldruck. Die Ergebnisse zeigen beispielsweise, dass der Reibwert für die unterschiedlichen Reifenprofile unterschiedliche Geschwindigkeitsabhängigkeiten aufweist und auch unterschiedlich auf die Erhöhung des Wasserfilms reagiert.

Untersuchungen von KALENDER [Kal 86] zeigen unter anderem, dass der Reibbeiwert eines Reifens mit geringerer Profiltiefe im Vergleich zu einem Reifen mit voller Profiltiefe auf nasser Fahrbahn eine stärker ausgeprägte Geschwindigkeitsabhängigkeit aufweist.

HAHN [Hah 80] untersuchte den Einfluss der Laufflächenkrümmung und des Reifenquerschnittsverhältnisses auf die maximale Umfangskraft bei unterschiedlichen Wasserfilmhöhen (von 0,2 mm bis zu 3 mm) und unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Die Untersuchungen führte er mit einem profilierten und unprofilierten Reifen durch. Die Ergebnisse zeigen, dass die Umfangskräfte, die der profillose Reifen auf nasser Fahrbahn übertragen kann, im Vergleich zum profilierten Reifen wie zu erwarten geringer sind. Eine ansteigende Wasserfilmhöhe äußert sich ebenfalls wie zu erwarten in abfallenden maximalen Umfangskräften. Der Laufflächenradius und das Querschnittsverhältnis scheinen nicht mit der maximalen Umfangskraft zu korrelieren.

SCHULZE [Sch 69], [Sch 79] untersucht unter anderem den Einfluss unterschiedlicher Texturtypen und Texturformen der Fahrbahnoberfläche auf die Reibung zwischen Reifen und nassen bzw. trockenen Fahrbahnen und stellt diese über der Geschwindigkeit dar. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Makro- und Mikrotextur der Fahrbahnoberfläche bei nasser Fahrbahn unterschiedlich auf den Reibwertverlauf über der Geschwindigkeit auswirken. Eine stark

ausgeprägte Mikrotextr (hohe Schärfe) äußert sich bei niedriger Geschwindigkeiten in einem hohen Reibwert, während eine schwach ausgeprägte Mikrotextr zu einem niedrigen Reibwert führt. Die Makrotextr hingegen beeinflusst den Reibwert abhängig von der Mikrotextr. Eine stark ausgeprägte Makrotextr (grobe Strukturanteile) führt bei gleichzeitig stark ausgeprägter Mikrotextr dazu, dass der Reibwert auf hohem Niveau über der Geschwindigkeit kaum abfällt, bei einer schwach ausgeprägten Makrotextr ist ein starker Abfall des Reibwertes zu beobachten. Bei einer schwach ausgeprägten Mikrotextr wirkt sich die Ausprägung der Makrotextr hingegen kaum auf den Reibwertverlauf über der Geschwindigkeit aus.

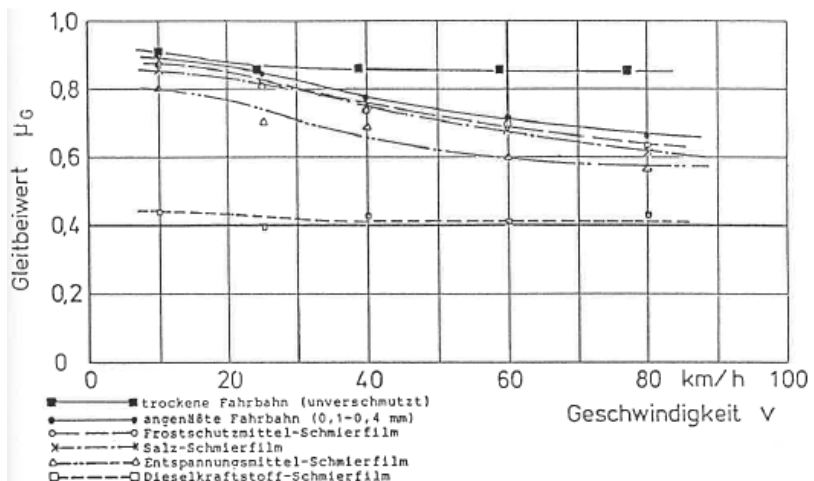
BÜHLMANN [Büh 83] und PELLOLI [Pel 79] untersuchten den Einfluss der Wasserfilmhöhe auf den Reibwert für unterschiedliche Geschwindigkeiten und unterschiedliche Reifen bei unterschiedlichem Schlupf. Von BÜHLMANN werden Wasserfilmdicken bis zu einer Höhe von 1 mm untersucht, während PELLOLI auch extreme Wasserfilmdicken bis zu 9 mm betrachtet. Die Ergebnisse zeigen jeweils, dass zu höheren Wasserfilmdicken der Reibwert wie zu erwarten abfällt. Bei sehr hohen Wasserfilmhöhen ( $> 5$  mm) zeigen die Ergebnisse von PELLOLI, dass der Reibwert bereits bei relativ niedrigen Geschwindigkeit ( $< 40$  km/h) sehr niedrige Reibwerte ( $< 0,4$ ) annimmt.

Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass der Einfluss des Zwischenmediums Wasser bereits in einer Vielzahl Veröffentlichungen diskutiert wurde, auf die hier nicht näher eingegangen wird. Meist wurde dabei jedoch die Qualität des Wassers nicht explizit beschrieben bzw. auch nicht näher betrachtet und berücksichtigt.

In den folgenden Absätzen werden nun exemplarisch Untersuchungsergebnisse vorgestellt, die sich mit dem Einfluss flüssiger Zwischenmedien bzw. mit der Qualität des Wassers auf den Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn befassen.



Nach BACHMANN [Bac 96] untersuchte KIRSTE [Kir 80] Gleitreibwerte für unterschiedliche Schmierfilmmaterialien und Wasser über der Geschwindigkeit (siehe Abbildung 3). Die Ergebnisse zeigen, dass sich die unterschiedlichen Zwischenmedien in Abhängigkeit der Geschwindigkeit unterschiedlich auf den Gleitreibwert auswirken. Das eine Extrem stellt die trockene Fahrbahn dar, bei der sich der Verlauf des Gleitbeiwertes auch für höhere Geschwindigkeiten auf einem relativ konstant hohen Niveau befindet und nahezu kein Abfall beobachtet werden kann.



**Abbildung 3:** Gleitbeiwerte für verschiedene Zwischenmedien in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit aus [Bac 96] nach [Kir, 80]

Das andere Extrem stellt der Kurvenverlauf mit einem Dieselkraftstoff-Schmierfilm dar. Der Verlauf des Gleitbeiwertes ist auch hier relativ unabhängig von der Geschwindigkeit, allerdings auf einem sehr niedrigen Niveau. Die Gleitbeiwertkurven für die anderen betrachteten Schmiermittel befinden sich zwischen diesen beiden Extremfällen, weisen allerdings im Gegensatz zu den beiden Extremfällen eine

ausgeprägte Geschwindigkeitsabhängigkeit auf (Gleitbeiwert fällt mit steigender Geschwindigkeit).

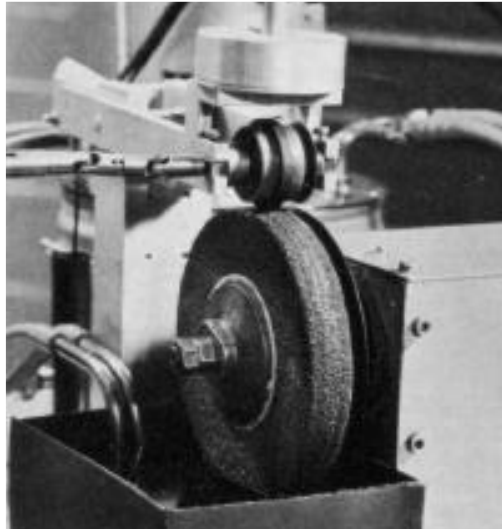
CLAMROTH [Cla 67] stellt in seinem Aufsatz unter anderem zwei Prüfstände vor, mit denen der Einfluss unterschiedlicher Parameter (Bsp. Flächenpressung, Gleitgeschwindigkeit und Temperaturbedingungen) auf die Gummireibung untersucht werden kann.

Ein Prüfstand ermöglicht Reibungsuntersuchung mit Gummigleitkörpern, der zweite Untersuchungen mit abrollenden Gummiprüfproben. An dieser Stelle wird ausschließlich auf den zweitgenannten Prüfstand eingegangen, da die rollende Beanspruchung im Hinblick auf die Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse auf PKW-Reifenmessungen eine bessere Korrelation erwarten lässt.

Untersuchungen von BÜRCKERT [Bür 12] legen nahe, dass die Verwendung von Gummigleitkörpern bei Untersuchungsgeschwindigkeiten  $> 5 \text{ km/h}$  und relativ langen Kontaktzeiten (wenige Sekunden) bereits zur thermischen Überlastung des Gummiprüfmaterials führen kann. Dies kann sich in Blasenbildung an der Oberfläche des Gummikörpers und schließlich in verfälschten Untersuchungsergebnissen äußern.

In Abbildung 4 ist der von CLAMROTH aufgebaute Prüfstand für Reibungsuntersuchungen im rollenden Kontakt abgebildet. Dieser Prüfstand besteht aus einer angetriebenen Schmirgelscheibe (auch ersetzbar durch andere Scheiben), gegen die von oben eine rädchenförmige Gummiprobe (hier auch als Vulkanisat bezeichnet) definiert angepresst wird. Das Gummirädchen kann nun über eine Wirbelstrombremse abgebremst und das entstehende Bremsmoment über eine Torsionswelle ermittelt werden. Aus dem Bremsmoment kann schließlich auf die Reibkraft am Rädchen rückgeschlossen und aus der sich ergebenden Relativbewegung (gemessen über Lochscheiben) der zwischen Rädchen und Scheibe vorliegende Schlupf bestimmt

werden. Mit diesen Informationen können anschließend die auch heute üblichen  $\mu$ -Schlupf-Kurven ermittelt werden.



**Abbildung 4:** Prüfstand zur Untersuchung der Reibung im rollenden Kontakt aus [Cla, 67]

Damit auch Untersuchungen mit Zwischenmedium im Kontakt durchgeführt werden können, wurde eine Wanne, die mit Wasser befüllt werden kann, am Prüfstand angebracht. Diese Wanne ist so angeordnet, dass sich der untere Teil der Schmirgelscheibe in dieser Wanne befindet und mit dem eingefüllten Medium in Berührung kommt. Während der Versuchsdurchführung kann die Scheibe somit befeuchtet, bzw. angeätzt werden. Außerdem besteht die Möglichkeit der Temperierung der Umgebung, indem eine Kapselung aus Plexiglas angebracht und warme oder kalte Luft eingeblasen wird.

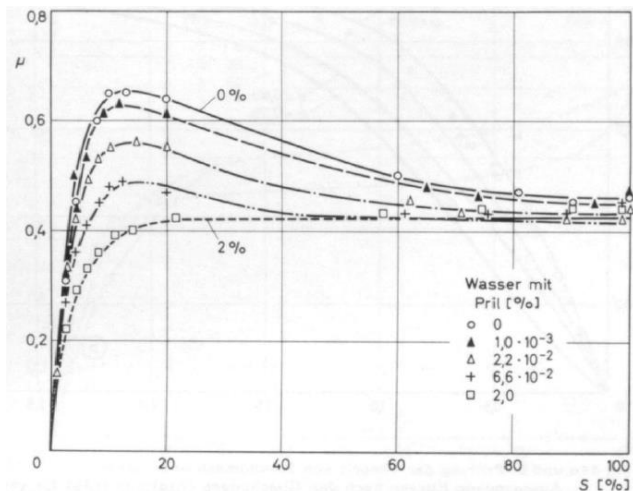
CLAMROTH stellt in seinem Aufsatz Ergebnisse vor, die sich teilweise mit dem Einfluss der Oberflächenspannung von Wasser auf die Griffigkeit beschäftigen. Zu diesem Zweck wurde Wasser mit fünf

unterschiedlichen Pril-Konzentrationen (0 %, 0,001 %, 0,022 %, 0,066 % und 2%) versetzt und die Oberflächenspannung der unterschiedlichen Gemische mittels Kontaktwinkelmessung bestimmt. Weiterhin ermittelte CLAMROTH die Kontaktwinkel, die sich beim Aufbringen der erzeugten Pril-Wassergemische auf den unterschiedlichen Vulkanisaten (Gummiprüben) ergeben. Die von ihm bestimmten Randwinkel wurden 1 Minute nach dem Aufbringen gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Oberflächenspannung mit steigender Pril-Konzentration abnimmt und auch gleichzeitig die gemessenen Kontaktwinkel abnehmen. Weiterhin ist ersichtlich, dass sich die Kontaktwinkel auf den untersuchten Vulkanisaten unterscheiden.

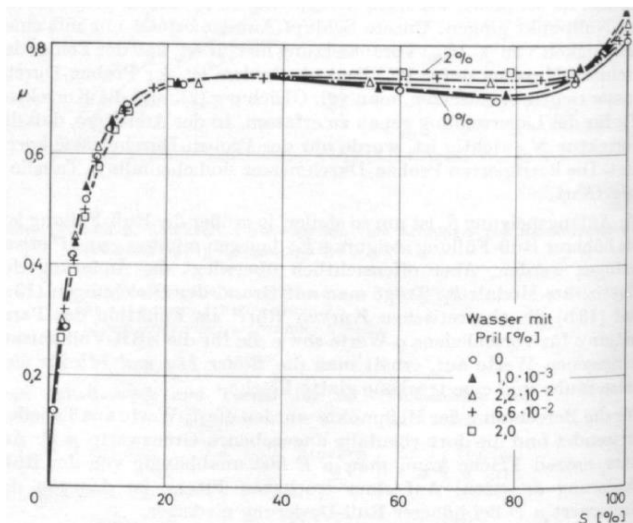
In der Abbildung 5 und Abbildung 6 sind Reibuntersuchungen mit den fünf hergestellten Pril-Wassergemischen, zum einen mit einem Butadienkautschuk (BR-Vulkanisat) und zum anderen mit einem Butylkautschuk (IIR-Vulkanisat), abgebildet. In Abbildung 5 (BR-Vulkanisat) ist zu erkennen, dass der maximale Reibwert mit steigender Pril-Konzentration (bzw. fallender Oberflächenspannung) deutlich abfällt. Zu großen Schlupfwerten hin ist der Abfall weniger stark ausgeprägt.

In Abbildung 6 (IIR-Vulkanisat) ist erkennbar, dass der maximale Reibwert (Bereich 20 – 40 %-Schlupf) nicht von der Spülmittelkonzentration und damit auch nicht von der vorliegenden Oberflächenspannung des Pril-Wassergemisches beeinflusst wird. Zu höheren Schlupfwerten hin ist hier allerdings im Vergleich zu Abbildung 5 ein gegenläufiger Trend erkennbar, d.h. mit steigender Pril-Konzentration steigt der beobachtete Reibwert.

CLAMROTH stellt heraus, dass trotz der ähnlichen Kontaktwinkel auf allen untersuchten Vulkanisaten der Reibwert unterschiedlich beeinflusst wird. Auf vielen untersuchten Vulkanisaten zeigt sich überhaupt keine Abhängigkeit zwischen Reibungskoeffizient und Pril-Konzentration.



**Abbildung 5:** Einfluss von Wasser mit unterschiedlicher Pril-Konzentration auf den Reibungskoeffizienten eines BR-Vulkanisates aus [Cla, 67]



**Abbildung 6:** Einfluss von Wasser mit unterschiedlichen Pril-Konzentrationen auf den Reibungskoeffizienten eines IIR-Vulkanisates aus [Cla, 67]

Abschließend folgert CLAMROTH aus den Untersuchungsergebnissen, dass im Hinblick auf den Reibwert die Benetzbarkeit durch Wasser nicht allein ausschlaggebend ist und die alleinige Berücksichtigung des Randwinkels (Kontaktwinkel) nicht ausreicht. Weiterhin betont er, dass weitere Ergebnisse zur Annahme führen, dass die Wasserfilmdicke geschwindigkeitsabhängig variieren könnte.

Die von CLAMROTH aufgebaute Versuchsanordnung ist für die durchgeführten Untersuchungen zum Einfluss der Oberflächenspannung (isolierte Betrachtung) auf die Reibung nur eingeschränkt einsetzbar, da sowohl die Geschwindigkeit als auch die Benetzungseigenschaften sowie die Viskosität des Zwischenmediums, die oberflächenenergetischen Eigenschaften der Schleifscheibe und auch des Vulkanisates die Wasserfilmdicke gleichzeitig beeinflussen. Würde das vorliegende Zwischenmedium beispielsweise die Schleifscheibe nicht bzw. schlecht benetzen (sehr großer Kontaktwinkel), dann würde die Schleifscheibe kein Zwischenmedium in den Kontakt (zwischen Gummi und Schleifscheibe) fördern und es läge trotz mit Flüssigkeit gefüllter Wanne trockener Reibkontakt vor. Ein ähnlicher Effekt dürfte für große Geschwindigkeiten auftreten. Hier würde selbst bei guter Benetzung der Schleifscheibe das Zwischenmedium durch die großen Fliehkräfte weggeschleudert werden und damit wäre auch hier nur wenig Zwischenmedium im Kontakt zu erwarten. Die beiden beschriebenen Fälle stellen zwar theoretische Grenzfälle dar, zeigen jedoch, dass die beschriebenen Einflussgrößen die Messergebnisse stark beeinflussen können. Um sicherzustellen, dass die in den Untersuchungsergebnissen erkennbaren Änderungen des Reibbeiwertes ausschließlich auf die durchgeführte Variation der Pril-Konzentration und den damit veränderten Benetzungszustand und nicht unter anderem auf unterschiedliche Wasserfilmdicken zurückgeführt werden kann, sollte die Prüfvorrichtung in der Art umgestaltet werden, dass unabhängig von der Prüfgeschwindigkeit und auch der gewählten Pril-Konzentration und dadurch veränderten Benetzungseigenschaften eine gleichmäßige Wasserfilmdicke im Kontakt erzeugt werden kann.

Des Weiteren führte MIZOTE [Miz 10] themenverwandte Untersuchungen zum Reibverhalten von Gummiprobe auf einer Glasoberfläche durch, um damit das Reibverhalten von Wischerblättern (Scheibenwischer am Fahrzeug) näher zu beleuchten. Bei diesen Untersuchungen wurde die Benetzbarkeit des Gummis durch Anlagerung von Monomeren (niedermolekulare, reaktionsfähige Moleküle) mittels Propfpolymerisation an die Oberfläche variiert und die Auswirkung auf den Reibbeiwert betrachtet. Die Untersuchungsergebnisse zeigen tendenziell, dass der Reibwert vom Benetzungszustand der Gummiprobe abhängt. Die Differenz zwischen dem Reibwert auf trockener und nasser Glasoberfläche fällt hierbei mit steigendem Kontaktwinkel kleiner aus.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass sich neben den hier vorgestellten Quellen eine Vielzahl weiterer Quellen mit dem Einfluss von Zwischenmedien (vereinzelt auch mit Zusatz eines Tensides) auf die Reibung zwischen Reifen bzw. Gummi und Fahrbahn bzw. Reibpartner beschäftigen (Auswahl: [Gen 67], [Kum 68], [Gey 71], [Bac 98], [Woh 01], [Li 04a], [Li 04b], [LeG 05], [Sam 07a], [Sam 07b], [Sam 08], [Ezz 08], [LeG 08], [Yin 11], [Cer 14]). Der Fokus lag hierbei allerdings meist auf dem Einfluss der Wasserfilmdicke in Kombination mit dem Textureinfluss, dem Reifenprofil, der Gummizusammensetzung, der Fahrgeschwindigkeit und weiteren Einflussgrößen. Die Untersuchungen zeigen, dass der Reibwert im trockenen Zustand im Vergleich zum nassen Zustand immer höhere Werte annimmt. Bei ansteigender Schichtdicke des Zwischenmediums Wasser bzw. bei einer Zugabe eines Tensids zum Zwischenmedium ist eine weitere Abnahme des Reibbeiwertes zu beobachten.

Der Einfluss der oberflächenenergetischen Eigenschaften des Zwischenmediums wurde bisher nicht in der in dieser Arbeit vorgestellten differenzierten Art und Weise betrachtet.

## **1.3 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit**

### **1.3.1 Zielsetzung**

In dieser Arbeit soll der Einfluss der Oberflächenspannung des Zwischenmediums „Wasser“ und damit dessen Benetzungseigenschaften auf den maximalen Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn differenzierter als bisher betrachtet werden. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die auf realen Fahrbahnoberflächen möglicherweise vorhandenen Verunreinigungen sich im Zwischenmedium „Wasser“ lösen oder dispergieren und dessen Oberflächenspannung zumindest teilweise verändern können. Die Auswirkungen einer Veränderung der Viskosität des Wassers durch die darin gelösten oder dispergierten Verunreinigungen und deren Auswirkung auf die Wechselwirkungen zwischen Reifen und Fahrbahn wird in dieser Arbeit durch eine geeignete Vorgehensweise größtenteils ausgeschlossen und nicht näher betrachtet.

### **1.3.2 Abgrenzung der Arbeit**

Die von CLAMROTH [Cla 67] durchgeführten Untersuchungen zeigen bereits erste Tendenzen zum Einfluss der Tensidkonzentration bzw. der Benetzungseigenschaften des Zwischenmediums Wasser auf die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn auf. Die vorgestellten Untersuchungsergebnisse wurden jedoch an einer Prüfumgebung ermittelt, die es nicht erlaubt, den Einfluss der Benetzungseigenschaften des Wassers isoliert (auch bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und dabei gleichbleibenden Wasserfilmdicken) auf den Reibwert untersuchen zu können. Bei Verwendung dieser Prüfanordnung ist nicht sichergestellt, dass unterschiedliche Tensidkonzentrationen ausschließlich die Benetzungseigenschaften und nicht auch gleichzeitig die Wasserfilmdicke beeinflussen, welche wiederum den Reibwert verändern.



Innerhalb dieser Arbeit wurde eine Prüfstandsumgebung entwickelt und aufgebaut, die es ermöglicht, einen definierten gleichbleibenden Volumenstrom des Zwischenmediums in den Reibkontakt zu fördern und damit eine vergleichsweise definierte Wasserfilmdicke zu erzeugen. Zur Variation der Oberflächenspannung des Wassers wurden analog zur Arbeit von CLAMROTH Tenside verwendet („Spülmittel“ mit anionischen und kationischen Tensiden). Während CLAMROTH die Zwischenmedien allerdings ausschließlich durch deren Tensidkonzentrationen und deren Kontaktwinkel charakterisierte, wurden die erzeugten Zwischenmedien in dieser Arbeit durch die Ermittlung der folgenden Parameter charakterisiert, um auch deren Einfluss quantifizieren bzw. bewerten zu können:

- Oberflächenspannung (dispenser und polarer Anteil)
- dynamische Viskosität

Zusätzlich wurden auch die oberflächenenergetischen Eigenschaften der beteiligten Festkörper (Gummiprobe & Fahrbahnprobe) ermittelt. Durch die oberflächenenergetischen Eigenschaften der beteiligten Festkörper und der erzeugten Zwischenmedien wurden schließlich die sich ergebenden Kontaktwinkel zwischen den unterschiedlichen Zwischenmedien und der Gummiprobe sowie zwischen den Zwischenmedien und der Fahrbahnoberfläche rechnerisch ermittelt und bei der Auswertung berücksichtigt.

Im Gegensatz zu den Untersuchungen von MIZOTE werden in dieser Arbeit nicht die oberflächenenergetischen Eigenschaften eines Reibpartners verändert, sondern die Benetzungseigenschaften des Zwischenmediums. Dieses Vorgehen spiegelt den Anwendungsfall der Reifen-Fahrbahn-Reibung realistischer wieder, da auch hier durch vorhandene (wasserlösliche) Verunreinigungen auf der Straße eher die physikalischen Eigenschaften des Zwischenmediums verändert werden, wobei die physikalischen bzw. chemischen Eigenschaften der Festkörperoberflächen gleichzeitig unverändert bleiben.

Da in dieser Arbeit der Einfluss der Oberflächenspannung des Zwischenmediums (hervorgerufen durch gelöste Verunreinigungen) betrachtet werden soll, ist hier die Variation der Benetzungseigenschaften des Zwischenmediums zielführender und lässt eine bessere Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die PKW-Reifen-Fahrbahn-Reibung erwarten.

## **1.4 Inhaltliche Strukturierung**

In Kapitel 2 werden zunächst allgemeine Grundlagen vorgestellt, auf die in den nachfolgenden Kapiteln der Arbeit referenziert wird. Hierzu werden zu Beginn die Grundlagen zur Übertragung von Seitenkräften am PKW-Reifen und im Anschluss daran Mechanismen der Gummireibung vorgestellt. Da der PKW-Reifen nur Kräfte im Kontakt mit der Fahrbahn überträgt, wird in diesem Kapitel auch auf den Aufbau der Straßen, deren Oberflächenstruktur sowie die verwendeten Materialien, eingegangen. Im thematisch zweiten Teil der allgemeinen Grundlagen werden gängige Labormessverfahren zur Untersuchung der Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn vorgestellt, wobei zwischen Reifen- und Gummiprüfständen unterschieden wird.

In Kapitel 3 wird eine Modellvorstellung und Forschungshypothese vorgestellt, welche den in dieser Arbeit durchgeführten empirischen Untersuchungen zugrunde liegt. Weiterhin beschreibt dieses Kapitel die Untersuchungsmethode, welche in dieser Arbeit verfolgt wurde.

In Kapitel 4 wird die in dieser Arbeit entwickelte und aufgebaute Prüfumgebung (Griffigkeits- und Abriebprüfstand „GAT“) vorgestellt. Hierbei handelt es sich um ein Prüfverfahren, mit welchem der Einfluss unterschiedlicher Parameter auf die Reibung zwischen Gummiprobe (Gummirad oder Gummigleitkörper) und Fahrbahn auch bei eventuell vorhandenen Zwischenmedien unter Laborbedingungen im kleinen Maßstab untersucht werden kann. Durch vergleichende Messungen zur Übertragbarkeit wird nachgewiesen, dass die am GAT gewonnenen

Erkenntnisse prinzipiell auf Reifenmessungen übertragen werden können.

Kapitel 5 befasst sich mit der Charakterisierung von Festkörperoberflächen (Reibpartner) und von Flüssigkeiten (flüssige Zwischenmedien). Zur Charakterisierung der Festkörperoberflächen werden deren oberflächen-energetische Eigenschaften näher betrachtet. Hierfür wird die gesamte freie Oberflächenenergie und auch deren Aufteilung in den polaren und dispersen Anteil bestimmt. Auf die Charakterisierung der Oberflächenstruktur (Textur) wird hier bewusst verzichtet, da diese in dieser Arbeit nicht von zentraler Bedeutung ist. Zur Charakterisierung von Flüssigkeiten werden ebenfalls deren oberflächen-energetische Eigenschaften (auch als Oberflächenspannung bezeichnet) und deren Aufteilung in den polaren und dispersen Anteil bestimmt. Aus der Kombination der oberflächen-energetischen Anteile der Festkörper und der Flüssigkeiten kann schließlich auf den Benetzungszustand der Festkörper rechnerisch rückgeschlossen werden. Die Charakterisierung der Flüssigkeiten schließt mit der Ermittlung der jeweiligen dynamischen Viskosität.

In Kapitel 6 werden die in dieser Arbeit durchgeführten Parameterstudien zur empirischen Untersuchung des Einflusses der Oberflächenspannung flüssiger Zwischenmedien auf den maximalen Reibschluss zwischen Reifen und Fahrbahn vorgestellt. Zu diesem Zweck werden Zwischenmedien mit unterschiedlichen Oberflächenspannungen erzeugt und bei Reibungsuntersuchungen am Griffigkeits- und Abriebprüfstand definiert in den Reibkontakt eingeleitet. Als Fahrbahnprobe wird eine Oberfläche mit schwach ausgeprägter Makro- bei gleichzeitig relativ stark ausgeprägter Mikrotexur verwendet (entschärfter SafetyWalk-Belag). Als Gummiprobe werden Gummiräder aus einer Gummi-Referenzmischung verwendet, die von der Continental Reifen Deutschland GmbH zu Forschungszwecken zur Verfügung gestellt wurden. Nach der Versuchsdurchführung wird jeweils der maximale Reibwert zwischen Gummi und Fahrbahn ausgewertet und der Einfluss der variierten

Einflussparameter durch mathematisch-statistische Modellbildung quantifiziert. Im Anschluss daran werden die beobachteten Ergebnisse diskutiert.

Kapitel 7 fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen. Weiterhin werden Ansätze für die weitere wissenschaftliche Untersuchung des Themengebietes gegeben.

## 2. Allgemeine Grundlagen

In dieser Arbeit soll der Einfluss des Zwischenmediums Wasser (im Speziellen der Einfluss dessen Oberflächenspannung) auf die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn untersucht werden. Im Folgenden wird zuerst auf die Kinematik und Kinetik des Reifens eingegangen. Anschließend wird am Beispiel der Kurvenfahrt dessen Seitenkraftcharakteristik exemplarisch vorgestellt, da in den experimentellen Parameterstudien dieser Arbeit vergleichbare Untersuchungen durchgeführt werden. Durch die vorgestellten grundlegenden Mechanismen der Gummireibung soll ein allgemeines Verständnis für die im Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn bzw. Gummi und dessen Reibpartner auftretenden Phänomene ermöglicht werden. Im thematisch zweiten Teil der Allgemeinen Grundlagen wird ein kurzer Überblick über die im deutschen Straßennetz verbauten Fahrbahnoberflächen gegeben, da die zwischen Reifen und Fahrbahn auftretenden Reibkräfte immer durch die Kombination aus beiden Reibpartnern und damit gleichermaßen von Reifen und Fahrbahn beeinflusst werden. Der dritte Teil behandelt den Einfluss des Zwischenmediums Wasser auf die Reifen-Fahrbahn-Reibung. Im thematisch vierten und letzten Teil der Allgemeinen Grundlagen wird eine Auswahl von Prüfständen vorgestellt, die zur Untersuchung der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn bzw. zwischen Gummi und dessen Reibpartner auch bei vorhandenen Zwischenmedien verwendet werden können. Die Grundlagen zur Charakterisierung der oberflächenenergetischen Eigenschaften von Festkörpern und Flüssigkeiten bzw. zum Benetzungsverhalten werden an späterer Stelle (siehe Kapitel 5) vorgestellt.

## 2.1 Grundlagen zur Kraftübertragung von PKW-Reifen

### 2.1.1 Kinematik und Kinetik des Reifens unter Schräglauf

PKW-Reifen übertragen während der Fahrt vorrangig die beim Bremsen und Antreiben auftretenden Umfangskräfte  $F_x$  in Längsrichtung (X-Richtung), die bei Kurvenfahrt auftretenden Seitenführungskräfte  $F_y$  in Querrichtung (Y-Richtung) sowie die Anpresskraft  $F_z$  in der Hochachse (Z-Richtung). In Abbildung 7 ist das nach UNRAU [Unr 97] und VAN OOSTEN [Van 97] definierte W-Achsen-Koordinatensystem nach TYDEX abgebildet, welches dieser Arbeit zugrunde gelegt wird. Der Ursprung dieses Koordinatensystems befindet sich bei stillstehendem Reifen in der Mitte der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn.

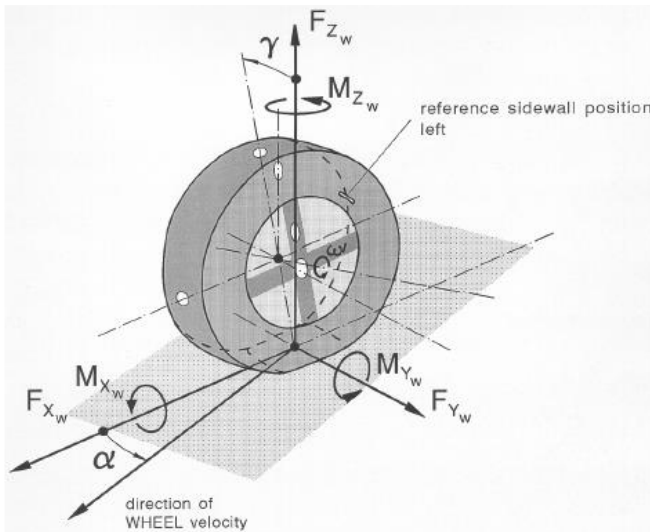
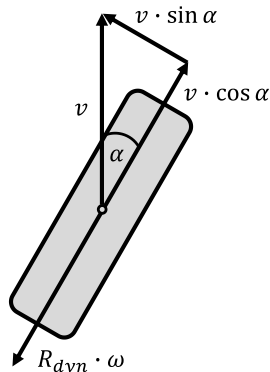


Abbildung 7: W-Achsen-Koordinatensystem [Unr 97], [Van 97]

In der praktischen Anwendung treten am Reifen neben der Anpresskraft meist nicht ausschließlich Seiten- oder Umfangskräfte isoliert auf, sondern Kombinationen daraus. So ist es beispielsweise möglich, dass ein PKW-Fahrer während einer Kurvenfahrt beschleunigt oder abbremsst, was gleichzeitig zu Kräften in Längsrichtung (durch Antreiben oder Bremsen), in Querrichtung (durch Seitenführungskräfte) und in der Hochachse (durch die Gewichtskraft und auftretende Gewichtsverlagerungen) führt.

In dieser Arbeit wird zur Vereinfachung ausschließlich der Fall des frei rollenden Reifens bei Kurvenfahrt betrachtet. Dies schließt die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Belastungen durch Umfangskräfte bzw. kombinierte Belastungen in keiner Weise aus, da die unterschiedlichen Belastungsfälle alle durch dieselben zugrunde liegenden Reibungsmechanismen entstehen und beeinflusst werden (Erläuterungen hierzu in Kapitel 2.1.3).

In Abbildung 8 ist der Reifen bei Kurvenfahrt nach HEIßING [Hei 13] skizziert (siehe auch [Weh 70]). Der Schräglaufwinkel  $\alpha$  ist hierbei der Winkel, der sich zwischen der Reifenhauptebene und der Hauptbewegungsrichtung ergibt.



**Abbildung 8:** Reifen bei Kurvenfahrt nach HEIßING [Hei 13]

Bei vorliegendem Schräglaufwinkel entsteht ein Quer-Gleiten der einzelnen Gummielemente im Reifen-Fahrbahnkontakt (auch als Latsch bezeichnet), was als Schlupfen bezeichnet wird. Dieser Schlupf ist die Grundvoraussetzung für die Entstehung von Reibkräften (siehe auch [Pac 12]), die als Seitenkraft wirken und die Kurvenfahrt ermöglichen (siehe Kapitel 2.1.3).

Der lokale Schlupf im Kontakt setzt sich hierbei aus zwei Anteilen zusammen, die als Verformungsschlupf und als Gleitschlupf bezeichnet werden (siehe [Bac 96] und [Kum 66]). Beim Eintreten des Gummielementes in den Kontakt tritt zunächst nur Verformungsschlupf auf (elastische Verformung der Gummielemente). Je weiter dieses Gummielement nun im Latsch nach hinten wandert umso weiter wird es in Querrichtung ausgelenkt und es addiert sich zum Verformungsschlupf ein Gleitschlupfanteil hinzu (Gummielemente beginnen zu gleiten). Die lokalen Schlupfwerte und Schlupfanteile werden hierbei vom Schräglaufwinkel von der Fahrgeschwindigkeit und von vielen weiteren Parametern beeinflusst. Die beschriebene Verteilung des Schlupfes über der Latschlänge führt zu einer charakteristischen Verteilung der Quer-Schubspannung im Latsch (siehe [Gna 15a]), aus welcher über Integrieren die im Latsch entstehende Seitenkraft bestimmt werden kann.

Im Weiteren werden die hier als lokale Schlupfanteile bezeichneten Anteile wieder zu einem mittleren Schlupf zusammengefasst und als „Schlupf“ bezeichnet.

Mit Kenntnis des Schräglaufwinkels kann über (1) der mittlere Querschlupf  $s_{quer}$  und mit weiterer Kenntnis der Reifengeschwindigkeit in Bewegungsrichtung  $v$  die mittlere Quergleitgeschwindigkeit  $v_{quer}$  des Reifens über (2) bestimmt werden.

$$s_{quer} = \sin(\alpha) \quad (1)$$

$$v_{quer} = \sin(\alpha) * v \quad (2)$$



Generell gilt zu beachten, dass der Schräglaufwinkel in der Regel nicht dem am PKW über die Lenkradstellung eingestellten Lenkwinkel entspricht (näheres hierzu in GNADLER [Gna 15b], [Gna 15c]). Für die in dieser Arbeit gezeigten Untersuchungsergebnisse muss jedoch nicht zwischen Lenk- und Schräglaufwinkel unterschieden werden, da die in dieser Arbeit verwendeten Prüfstandsumgebungen so konzipiert sind, dass Lenk- und Schräglaufwinkel betragsmäßig direkt übereinstimmen.

## 2.1.2 Seitenkraftcharakteristik von Reifen

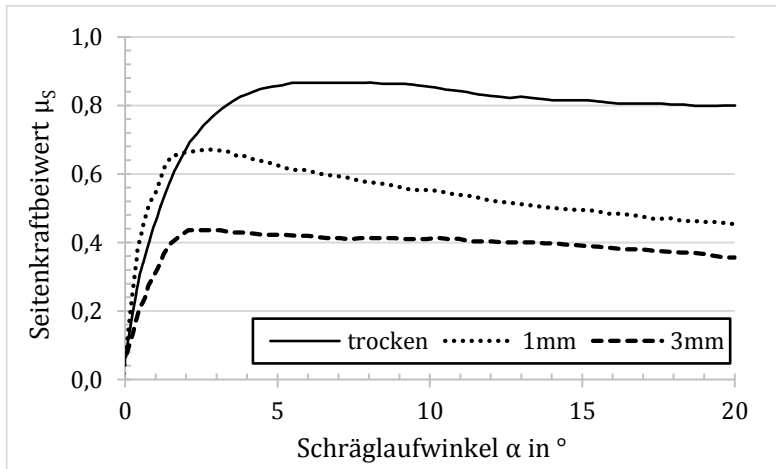
Zur Beschreibung der Seitenkraftcharakteristik von Reifen werden Kurven herangezogen, in denen der Seitenkraftbeiwert  $\mu_s$  über dem Schräglaufwinkel  $\alpha$  aufgetragen wird (S- $\alpha$ -Kurven). Der Seitenkraftbeiwert errechnet sich hierbei über (3) aus der vorliegenden Seitenkraft  $F_Y$  und gleichzeitig vorliegender Anpresskraft  $F_Z$ .

$$\mu_s(\alpha) = \frac{F_Y(\alpha)}{F_Z(\alpha)} \quad (3)$$

Der sich ergebende Kurvenverlauf veranschaulicht in sehr deutlicher Art und Weise, wie sich der untersuchte Reifen bei Kurvenfahrt verhält (siehe Abbildung 9). Analog wird bei der Bewertung der Umfangscharakteristik (Antreiben und Bremsen) von Reifen der Umfangskraftbeiwert über dem Schlupf aufgetragen (siehe hierzu GNADLER [Gna 96]).

In diesem Unterkapitel werden nun exemplarisch S- $\alpha$ -Kurven für einen PKW-Reifen bei unterschiedlichen Wasserfilmhöhen vorgestellt (siehe Abbildung 9). Bei den Messdaten, die den hier gezeigten Kurvenverläufen zugrunde liegen, handelt es sich nicht um Messdaten die innerhalb dieser Arbeit erhoben wurden, sondern um institutsinterne Messungen, die am Innentrommelprüfstand (IPS) des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik ermittelt und für die

Veranschaulichung aufbereitet wurden. Auf den Aufbau und die Funktionsweise des IPS wird im Kapitel 2.4.1 näher eingegangen.



**Abbildung 9:** Verlauf des Seitenkraftbeiwerts über dem Schräglaufwinkel (S- $\alpha$ -Kurven) für einen PKW-Reifen bei unterschiedlichen Wasserhöhen (Aufbereitung institutsinterner Messdaten)

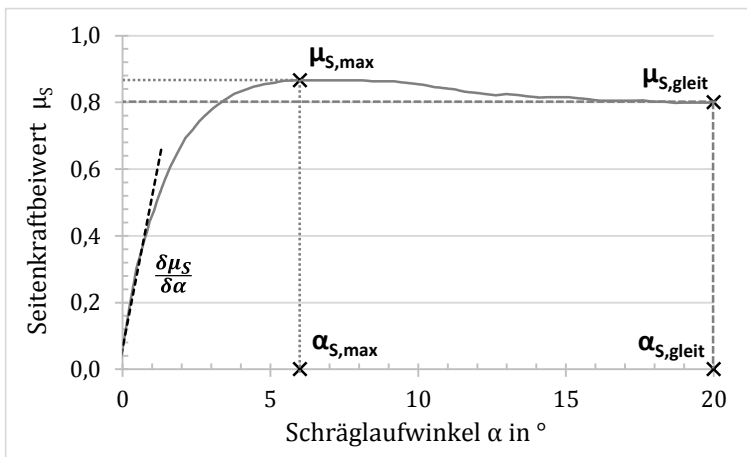
Bei der Betrachtung des Kurvenverlaufes für „trockene Fahrbahn“ zeigt sich, wie der Seitenkraftbeiwert vom Schräglaufwinkel und damit vom Querschlupf (unterschiedliche mittlere Gleitgeschwindigkeiten im Latsch) abhängt. Bei einem Schräglaufwinkel von  $0^\circ$  ist hier bereits ein Seitenkraftbeiwert von  $> 0$  zu erkennen. Dies kann dadurch begründet werden, dass durch den inneren Reifenaufbau (Winkellageneffekt) und/oder Konuseffekt des Reifens eine Seitenkraft bereits bei einem Schräglaufwinkel von  $0^\circ$  (auch als Nullseitenkraft bezeichnet) vorliegt. Mit steigendem Schräglaufwinkel steigt der Seitenkraftbeiwert dann zunächst nahezu linear an, was auf nahezu rein elastische Verformungen im Latsch und im Reifen deutet, d.h. im Bereich des linearen Anstiegs des Seitenkraftbeiwertes tritt näherungsweise kein Gleiten im Latsch auf. Die hier auftretenden elastischen Verformungen

werden wie bereits erwähnt als Verformungsschlupf bezeichnet. Ab größeren Schräglaufwinkeln (hier ab ca.  $0,5^\circ$ ) steigt der Seitenkraftbeiwert degressiv weiter an, bis ein Maximum erreicht wird. In diesem Bereich überlagert sich nun zum Verformungsschlupf ein Gleitschlupfanteil im Latsch. Bei einer weiteren Erhöhung des Schräglaufwinkels fällt der Seitenkraftbeiwert wieder ab und erreicht schließlich bei einem sehr großen Schräglaufwinkel annähernd einen konstanten Wert.

Werden nun die in Abbildung 9 abgebildeten Kurven für die trockene und nasse Fahrbahn (unterschiedliche Wasserhöhen) untereinander verglichen, ist zu erkennen, dass das Zwischenmedium Wasser, abhängig von dessen Höhe, den maximalen Seitenkraftbeiwert erheblich beeinflusst (hier absenkt). Weiterhin ist zu beobachten, dass nicht nur der maximale Seitenkraftbeiwert, sondern auch die gesamte Kurvenform verändert wird (Bsp. Steigung bei kleinen Schräglaufwinkeln, Ausprägung des Plateaus beim Maximalwert, Abfall des Seitenkraftbeiwertes nach dem Maximum, ...). Beim Vergleich der Kurven zeigt sich, dass die „1mm“-Kennlinie im Vergleich zur „trocken“-Kennlinie eine höhere Steigung bei kleinen Schräglaufwinkeln aufweist. Dieses Verhalten scheint auf den ersten Blick verwunderlich, kann aber auf die Kühlwirkung des Wassers zurückgeführt werden, die das Gummi des Reifens abkühlt und dadurch den Schermodul erhöht. Die gleichzeitige Absenkung des Reibbeiwertes im Kontakt, durch das vorliegende Zwischenmedium Wasser, wird durch diesen Effekt überkompensiert. Die „3mm“-Kennlinie hingegen zeigt wie zu erwarten einen niedrigeren maximalen Reibbeiwert sowie eine geringere Steigung bei kleinen Schräglaufwinkeln, da der Bereich in dem direkter Gummi-Fahrbahn-Kontakt vorliegt verkürzt wird und dies eine geringere Schersteifigkeit zur Folge haben dürfte.

Im Folgenden werden nun einige Kennwerte vorgestellt (siehe auch [Fis 00] und [DIN 13]), die zur Beschreibung und Charakterisierung der Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennlinie verwendet werden können (siehe Abbildung 10).

Der maximale Seitenkraftbeiwert  $\mu_{S,max}$  stellt hierbei eine sehr wichtige Größe dar, da dieser beispielsweise als Kenngröße verstanden werden kann, wie schnell ein Fahrzeug maximal eine Kurve durchfahren kann. Indirekt kann aus diesem Wert jedoch auch auf den maximalen Reibbeiwert in Längsrichtung geschlossen werden, d.h. bei einem sehr hohen maximalen Seitenkraftbeiwert, kann auch ein sehr hoher maximaler Reibbeiwert in Längsrichtung erwartet werden (bei Vernachlässigung der Reifenprofilunterschiede in Längs- und Querrichtung sowie bei Vernachlässigung der unterschiedlichen Pressungsverteilung bei Längs- und Querschlepp).



**Abbildung 10:** Veranschaulichung wichtiger Kenngrößen zur Charakterisierung von Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennlinien (Aufbereitung institutsinterner Messdaten nach [Fis 00] und [DIN 13])

Der maximale Seitenkraftbeiwert ist für die hier vorliegende Arbeit von zentraler Bedeutung, da dieser Wert bei den später durchgeführten empirischen Untersuchungen die Zielgröße zur Bewertung der maximalen Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn darstellt (In dieser Arbeit wird der Begriff maximaler Seitenkraftbeiwert bzw. maximaler Reibwert als Synonym verwendet). Weitere wichtige Kenngrößen sind

beispielsweise auch der zum maximalen Seitenkraftbeiwert zugehörige Schräglaufwinkel  $\alpha_{S,max}$ , der Gleitseitenkraftbeiwert bei sehr großen Schräglaufwinkeln  $\mu_{S,gleit}$  und der zugehörige Schräglaufwinkel  $\alpha_{S,gleit}$ . Die Schräglaufsteifigkeit  $\frac{d\mu_S}{d\alpha}$  stellt ebenfalls eine wichtige Kenngröße dar, da sie ein Maß dafür ist, wie schnell und wie stark ein Reifen auf eine Änderung des Schräglaufwinkels reagiert (Bsp. Niederquerschnittsreifen sind hier sehr steil und das führt dazu, dass das Fahrzeug stärker auf Lenkradeinschläge reagiert).

Außer den hier vorgestellten Kennwerten existieren noch weitere Kennwerte zur Charakterisierung der S- $\alpha$ -Kurven, auf die hier jedoch nicht weiter eingegangen wird.

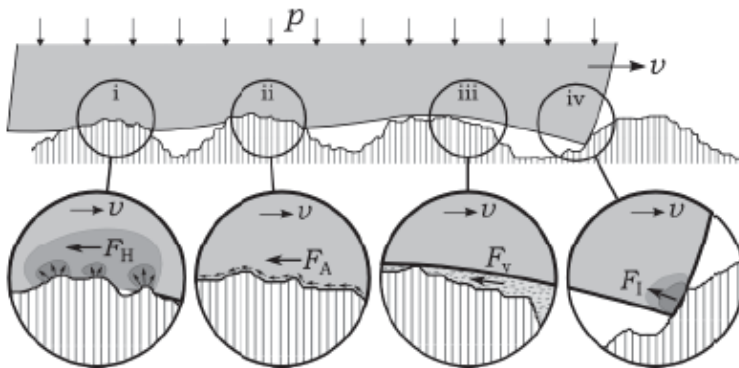
### 2.1.3 Mechanismen der Reibkraftübertragung

Im vorherigen Kapitel wurde das Kurvenverhalten (Seitenkraftabhängigkeit vom Schräglaufwinkel) von PKW-Reifen thematisiert. In diesem Kapitel werden nun verschiedene grundlegende Reibungsmechanismen vorgestellt, die für die Gummireibung und damit auch für die Kraftübertragung am Reifen von großer Bedeutung sind. Diese Mechanismen können herangezogen werden, um den Kurvenverlauf der zuvor vorgestellten S- $\alpha$ -Kurven nachzuvollziehen und auch den Einfluss unterschiedlicher Parameter auf den Kurvenverlauf und damit das Reibverhalten qualitativ abschätzen zu können.

KUMMER [Kum 64] erwähnt bereits im Jahr 1964, dass die klassischen Reibgesetze (Coulombsche Reibung) für Festkörper, jedoch nicht für viskoelastische Stoffe (wie beispielsweise Gummi) anwendbar sind. Diese Gesetze besagen, dass der Reibbeiwert nicht von der Anpresskraft, der Berührfläche, der Gleitgeschwindigkeit und der Temperatur abhängig ist. Weiterhin besagt die Theorie der klassischen Reibgesetze, dass der Reibwert in Ruhe (Haftbeiwert) betragsmäßig größere Werte annimmt als der Reibwert in Bewegung (Gleitbeiwert). Dieses beschriebene Verhalten kann bei der Gummireibung nicht

beobachtet werden und daher sind die klassischen Reibgesetze nicht anwendbar.

Laut KUMMER [Kum 66] kann der Reibbeiwert  $\mu_{Gesamt}$  in die Einzelkomponenten Adhäsionsreibung  $\mu_{Adh.}$ , Hysteresereibung  $\mu_{Hyst.}$ , Kohäsionsreibung  $\mu_{Koh.}$ , viskose Reibung  $\mu_{Visk.}$  und den Verzahnungseffekt  $\mu_{Verzahn.}$  unterteilt werden.



**Abbildung 11:** Skizze eines Gummiblocks, der über eine raue Oberfläche gleitet. Hierbei sind die folgenden Reibmechanismen veranschaulicht: (i) Hystereseverlust durch Deformation des Gummis, (ii) Adhäsionsverlust durch molekulare Wechselwirkungen, (iii) viskoser Verlust durch Scherung eines Zwischenmediums, (iv) Verzahnungseffekt (aus [Tor 15] nach [Kum 66])

Sind die Beträge der einzelnen Komponenten bekannt, kann der Gesamtreibwert durch die Superposition aller Einzelkomponenten bestimmt werden (siehe auch GEYER [Gey 71], CLARK [Cla 81] und TORBRÜGGE [Tor 15]). Damit ergibt sich der Gesamtreibwert über (4) zu:

$$\mu_{Gesamt} = \mu_{Adh.} + \mu_{Hyst.} + \mu_{Koh.} + \mu_{Visk.} + \mu_{Verzahn.} \quad (4)$$

In Abbildung 11 ist die Funktionsweise der Reibmechanismen Hysteresereibung (i), Adhäsionsreibung (ii), viskose Reibung (iii) und der Verzahnungseffekt (iv) graphisch veranschaulicht.

Laut KUMMER stellen die Anteile der Adhäsion und der Hysterese die wichtigsten Reibanteile dar, wobei der Kohäsionsanteil und der viskose Anteil in den meisten Anwendungsfällen vernachlässigt werden können. Weiterhin geben KUMMER [Kum 67] und GEYER [Gey 71] aber zu bedenken, dass die Gesamtreibung zwar, wie angeführt, in die Einzelanteile aufgeschlüsselt werden kann, dies aber gleichzeitig nicht bedeutet, dass zwischen den Einzelanteilen keine Wechselwirkungen bestehen. Im Folgenden wird zunächst auf die viskoelastischen Eigenschaften des Gummis eingegangen, da diese Eigenschaften für die Gummireibung von essenzieller Bedeutung sind. Im Anschluss daran werden die Reibmechanismen im Einzelnen näher vorgestellt.

Gummi ist ein Material, das sowohl elastische als auch viskose Eigenschaften aufweist. Das bedeutet, dass bei der Verformung eines Gummivolumens abhängig von der Verformungsgeschwindigkeit (Anregungsfrequenz und Anregungsamplitude) und den vorliegenden Temperaturbedingungen ein bestimmter Anteil der Verformungsenergie elastisch reversibel gespeichert und der restliche Anteil durch die viskosen Eigenschaften irreversibel in Wärmeverlust umgewandelt wird (siehe auch MICHELIN [Mic 05] und POPOV [Pop 09]). Dieses Verhalten spiegelt sich im komplexen E-Modul  $E^*$  wider, der sich entsprechend aus einem elastischen Teil, dem Speichermodul  $E'$ , und einem viskosen Teil, dem Verlustmodul  $E''$ , zusammensetzt. Die Verläufe der angegebenen Module ( $E'$  und  $E''$ ) sind jeweils frequenz-, deformations- und temperaturabhängig (siehe auch [Gna 15a]) und können durch die Zusammensetzung der Gummimischung (Zugabe von ausgewählten Zusätzen und Füllstoffen) und vor allem durch den Vernetzungsgrad der Elastomerketten für unterschiedliche Anwendungsfälle optimiert bzw. eingestellt werden.

### 2.1.3.1 Adhäsionsanteil

Der Adhäsionsanteil  $\mu_{Adh.}$  ist nach KUMMER [Kum 67] der Anteil der Reibung, der durch die Scherung molekularer Wechselwirkungen zwischen dem Gummi (bzw. Reifen) und dem Reibpartner (bzw. Fahrbahn) entsteht. Kommt es beim Gleitvorgang zwischen den beiden Reibpartnern zum direkten Kontakt, dann bilden sich Bindungen zwischen den freien Enden der Gummimoleküle und der Fahrbahnoberfläche aus. Gleitet der Gummikörper nun relativ zur Fahrbahnoberfläche weiter, dann werden diese Gummimoleküle solange verlustbehaftet gedehnt, bis es schließlich zum Versagen der Bindung zwischen Gummi und Fahrbahn kommt (siehe auch [Eic 94], [Per 06], [Lor, 15]). Nach dem Zerreißen der Bindung entspannt sich das Gummimolekül und kehrt verlustbehaftet in seine Ausgangslage zurück. Dieser Prozess wiederholt sich zyklisch und führt zu einer molekularen oberflächennahen Schwingungsanregung (Frequenzspektrum  $10^6$  bis  $10^9$  Hz nach [Mic 05]) und durch die viskoelastischen Eigenschaften des Gummis schließlich zu einem Energieverlust, welcher sich in einer Reibkraft entgegen der Bewegungsrichtung äußert.

Die Ausprägung dieses Reibanteils verhält sich proportional zur realen Berührfläche zwischen den beteiligten Reibpartnern [Gey 71]. Untersuchungen von KUMMER [Kum 66] zeigen, dass die reale Kontaktfläche nur einem Bruchteil der scheinbaren Kontaktfläche entspricht. In späteren Untersuchungen konkretisiert PERSSON [Per 04a], [Per 04b] in Auswertung von PERSSON [Per 01] und KLÜPPEL [Klü 00] die reale Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn auf einen Anteil von ca. 1 % der scheinbaren Kontaktfläche. Hierbei ist zu beachten, dass der Adhäsionsanteil ausschließlich von der Fläche des realen Kontakts verursacht wird.

Nach PERSSON [Per 98] steigt der Reibwert hierbei mit einer größer werdenden freien Oberflächenenergie (nach KUMMER [Kum 66] auch elektrische Rauheit) der Reibpartner an. Dies zeigt sich beispielsweise an Reibuntersuchungen zwischen Gummi und Teflon. Der



außergewöhnlich niedrige Reibwert kann hierbei vermutlich durch die niedrige freie Oberflächenenergie des Teflons erklärt werden<sup>1</sup>. Die Oberflächenkräfte werden oftmals durch schwache anziehende van der Waals-Wechselwirkungen dominiert [Per 04b]. Oberflächen, die mehr als 10 Å (1 Å = 10<sup>-10</sup> m) voneinander entfernt sind, tragen nach PERSSON extrem wenig zur Reibkraft bei [Per 99] (vgl. [Mic 05]).

Nach KUMMER [Kum 64] wird der Adhäsionsanteil stark von Verunreinigungen im Kontakt beeinflusst. LORENZ [Lor 15] merkt an, dass dieser Reibanteil sehr sensibel gegenüber Schmutzpartikeln und Flüssigkeiten ist und damit sehr stark vom Reinigungszustand der beteiligten Oberflächen abhängt. Dies belegt LORENZ durch Untersuchungen, bei denen Reibungsversuche auf Oberflächen durchgeführt wurden, die zuvor sehr lange mit Seifen-Wasser gereinigt wurden. Nach diesen Reibungsversuchen wurden die Oberflächen erneut gereinigt, danach einige Tage unter normaler Atmosphäre gelagert und dann wiederholt. Beim Gegenüberstellen der Ergebnisse zeigt sich, dass die Lagerung an normaler Atmosphäre zu einem Abfall des Reibwertes führt. Nach PERSSON [Per 98] lagert sich auf Oberflächen unter normaler Atmosphäre bereits nach wenigen Stunden eine Schmutzschicht von ca. 10 Å Dicke an. PERSSON folgert, dass die Adhäsionskomponente ausschließlich auf sehr sauberen Gummioberflächen von Bedeutung ist [Per 98] und dass bei Vorhandensein von Oberflächennässe die Adhäsionskräfte unterbunden werden [Per 99].

Da reale Fahrbahnoberflächen relativ stark verschmutzt sein werden, kann in der Realität von einem vergleichsweise kleineren Adhäsionsanteil ausgegangen werden, da zwischen den Gummimolekülen und der Fahrbahnoberfläche in den meisten Fällen keine direkten Wechselwirkungen stattfinden. Der Gummi kann jedoch mit der Schmutzschicht, die meistens durch physikalische Kräfte mit der

---

<sup>1</sup> Hinweis: Teflon wird durch die meisten organischen Flüssigkeiten nicht benetzt

Fahrbahn verbunden ist, wechselwirken und damit einen Anteil zur Reibung beitragen (siehe [Lor 15], [Per 98], [Per 99], [Per 00a]).

Zum Einfluss der Fahrbahnrauheit auf den Adhäsionsbeiwert führte FULLER [Ful 75] Untersuchungen durch und schließt daraus, dass bereits eine relativ kleine Oberflächenrauheit ausreicht, um die Adhäsion auf einen sehr kleinen Betrag zu reduzieren (siehe auch [Per 02]). PERSSON [Per 04a] erwähnt, dass der Anteil der adhäsiven Wechselwirkungen auf sehr rauen Oberflächen (abhängig von der Rauhtiefe) vernachlässigbar ist und es demnach bei derartigen Oberflächen auch bedeutungslos ist, ob ein Wasserfilm im Reifen-Fahrbahn-Kontakt vorhanden ist oder nicht.

### 2.1.3.2 Hystereseanteil

Der Hystereseanteil  $\mu_{Hyst.}$  ist nach KUMMER [Kum 67] der Anteil der Reibung, der durch die Verformung des Gummikörpers bzw. dessen Volumen entsteht, während dieser über Fahrbahnunebenheiten (Mikro- und Makrotextur der Fahrbahnoberfläche) gleitet und sich diesen dabei geometrisch anpasst. Hierbei wird das Gummivolumen zum einen verformt, wenn das Texturelement in den Gummi eindringt, und auch dann, wenn dieses das Gummivolumen wieder verlässt. Dieser Prozess wiederholt sich stochastisch und führt zu einer Schwingungsanregung (Frequenzspektrum  $10^2$  bis  $10^6$  Hz nach [Mic 05]). Die Größe und Gestalt des verformten Gummivolumens hängt hierbei von der Fahrgeschwindigkeit, der Fahrbahnstruktur, der Flächenpressung, den lokal vorliegenden Temperaturbedingungen und weiteren Einflussgrößen ab. Die Verformung des Gummivolumens führt (analog zum Adhäsionsanteil) aufgrund der viskoelastischen Eigenschaften des Gummis zu Verlusten, die sich wiederum als Reibkraft äußern und der Bewegungsrichtung entgegengerichtet sind (siehe auch [Per 01], [Klü 00], [Per 04b]).

Nach MOFIDI [Mof 08] gibt es im Hinblick auf die Gleitreibung eine Asymmetrie zwischen der Rauheit des Gummiblocks und der des harten Reibpartners. Demnach wirkt sich auf den Hystereseanteil nur die

Rauheit des harten Reibpartners aus. Die Rauheit der Gummioberfläche kann die Gleitreibung jedoch durch Einfassen von Schmiermittel mindern.

Nach PERSSON kann die Reibung auf trockener Fahrbahn ziemlich genau berechnet werden, wenn angenommen wird, dass die Reibung ausschließlich auf die interne Dämpfung des Gummis zurückgeführt werden kann. Die Theorie berücksichtigt dabei pulsierende und auf den Gummi wirkende Kräfte, die durch Fahrbahnunebenheiten in allen Längenskalen ( $1 \mu\text{m} - 1 \text{cm}$ ) verursacht werden. Noch kürzere Wellenlängen scheinen nach PERSSON [Per 04b] unwichtig zu sein. Auch MOFIDI bestätigt durch seine Untersuchungen, dass der größte Anteil der Gleitreibung durch die zeitabhängigen Deformationen des Gummis erklärt werden kann. Er zeigt in seinen Studien, dass selbst eine hochpolierte Oberfläche (selbst im geschmierten Zustand), die augenscheinlich als spiegelglatt erscheint, genügend Oberflächenrauheit aufweist um einen großen Teil zur Gummireibung beizutragen [Mof 08].

Nach KUMMER [Kum 64] wird die Ausprägung dieses Reibanteils im Gegensatz zum Adhäsionsanteil von Verunreinigungen und eventuell vorhandenen Zwischenmedien (Bsp. Wasser) im Kontakt kaum beeinflusst, solange das Wasser durch den Gleitkörper aus dem Kontakt größtenteils verdrängt wird und sich damit die Verformung des Gummivolumens nicht ändert. PERSSON [Per 98] nimmt jedoch auch an, dass der hier beschriebene Hystereseanteil durch die Adhäsion zwischen Gummi und Fahrbahn direkt beeinflusst wird. Die Adhäsionskräfte wirken hierbei hystereseverstärkend, da diese den Gummi durch dessen niedrigen Elastizitätsmodul in die „kurzwellige“ Oberflächenrauheiten ziehen können und diese dadurch erst ausgefüllt werden. Durch die vorhandene Adhäsionskomponente, vergrößert sich, das potenziell verformbare Gummivolumen und dadurch auch der Hystereseanteil. Bei Raumtemperatur kann Gummi solche Texturen vollständig ausfüllen, deren charakteristische Wellenlänge  $D$  und deren

Höhenschwankung  $D$  kleiner als  $\sim 1000 \text{ \AA}$  ist (siehe hierzu auch [Per 02], [Per 04b], [Per 04c]).

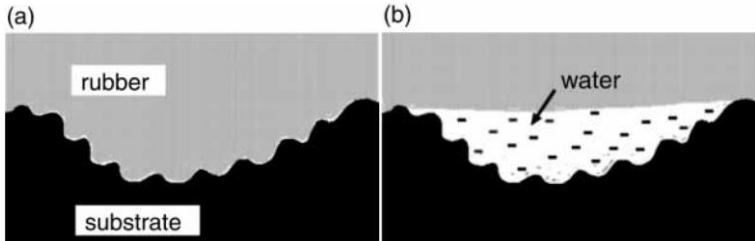
Eine Reduktion des Adhäsionsanteils führt daher nach PERSSON [Per 98] gleichzeitig zur Reduktion des Hystereseanteils, wenn dadurch vorhandene „kurzwellige“ Oberflächenrauheiten nicht mehr ausgefüllt werden können. Dies kann der Fall sein, wenn Flüssigkeiten oder Festkörper als Zwischenmedium auftreten.

In weiteren Untersuchungen stellt PERSSON [Per 11] zwei weitere Effekte vor, die sich auf die Reibung (hauptsächlich auf den Anteil der Hysterese) zwischen Reifen und Fahrbahn auswirken. Die Effekte werden zum einen als „Flash-Temperatur“ und zum zweiten als „Sealing-Effekt“ bezeichnet.

Der erste Effekt (Flash-Temperatur) kann als „Gedächtniseffekt des Gummis“ verstanden werden. Hierbei verursacht der viskoelastische Verlust, welcher der Ursprung der Gummireibung ist, während des Reibprozesses im Gummivolumen eine lokale Erwärmung (in exakt dem Bereich, in dem der Verlust entsteht). Dieser lokale und zeitabhängige Temperaturanstieg (Flash-Temperatur) äußert sich bereits bei der nächsten zyklischen Verformung in einem veränderten viskoelastischen Verlust (aufgrund der Temperaturabhängigkeit der viskoelastischen Eigenschaften) und damit auch in einem veränderten Beitrag zum Gesamtreibwert. Die „Flash“-Temperatur hat einen äußerst wichtigen Einfluss auf die Gummireibung (Bei Gleitgeschwindigkeiten von  $v > 0,001 \text{ m/s}$  senkt die Flash-Temperatur den Gleitreibwert. Bei Geschwindigkeiten von  $v < 0,001 \text{ m/s}$  kann dieser Effekt vernachlässigt werden, da die erzeugte Energie schnell genug abgeleitet werden kann.).

Der zweite Effekt wird von PERSSON als „Sealing-Effekt“ bezeichnet (siehe hierzu [Per 98], [Per 99], [Per 00a], [Per 04a], [Per 04b], [Per 05], [Sca 12]). Bei diesem Effekt wird davon ausgegangen, dass

Oberflächenhohlräume in der Fahrbahntextur, die mit Wasser gefüllt sind, durch den Reifen abgedichtet werden (siehe Abbildung 12).



**Abbildung 12:** Funktionsweise des „Sealing-Effekt“ aus [Per 04a]

Durch die Inkompressibilität des Wassers ist es beim Reibvorgang daher nicht möglich, dass der Gummi in diese mit Wasser gefüllten Fahrbahnunebenheiten eindringt, was gewissermaßen zu einer Glättung der Fahrbahnoberfläche führt (siehe Abbildung 12b). Dies führt schließlich im Vergleich zur trockenen Fahrbahn (siehe Abbildung 12a) effektiv zu einer Glättung der Fahrbahntextur, damit zu einer Reduktion der viskoelastischen Verformungen und schließlich zu einem Herabsetzen des Reibwertes.

Letztlich ist allerdings zu erwarten, dass auf realen Fahrbahnoberflächen das Wasser nicht absolut dicht in den Unebenheiten eingeschlossen wird, da der obere Rand der mit Wasser gefüllten Unebenheiten, welcher direkt mit dem Gummi in Kontakt ist, nicht perfekt glatt sein wird und Rauheiten in vielen Längenbereichen aufweist. Es ist daher auch zu erwarten, dass das Wasser zeitabhängig durch schmale Kanäle abfließen kann. Somit dürfte dieser Effekt zeit- und damit geschwindigkeitsabhängig sein und den Reibwert bei hohen Geschwindigkeiten stärker negativ beeinflussen als bei niedrigen Geschwindigkeiten.

### 2.1.3.3 Kohäsionsanteil

Der Kohäsionsanteil  $\mu_{Koh.}$  ist nach BACHMANN [Bac 96] der Anteil der Reibung, der durch Verschleiß und Rissbildung im Gummi entsteht. Kommt es beispielsweise beim Gleiten des Gummis zur Rissbildung bzw. zu Verschleiß, dann entstehen neue Oberflächen im Gummikörper durch Aufbrechen von chemischen Bindungen. Dies ist mit Verlusten verbunden, die ebenfalls als Anteil zum Gesamtreibwert beitragen.

### 2.1.3.4 Viskoser Anteil

Der viskose Anteil  $\mu_{visk.}$  ist nach BACHMANN [Bac 96] der Anteil der Reibung, der nur bei Nässe (d.h. beim Vorhandensein eines flüssigen Zwischenmediums) auftreten kann. Bildet sich zwischen der Oberfläche des Gummis und der Fahrbahn, wenn auch nur lokal, ein Flüssigkeitsfilm aus, können über diesen ausschließlich die Scherkräfte in der Flüssigkeit übertragen werden. Dieser Anteil ist im Verhältnis zu den anderen Reibanteilen sehr gering und meist als vernachlässigbar zu betrachten.

### 2.1.3.5 Verzahnungseffekt

Der Verzahnungseffekt  $\mu_{verzahn.}$  tritt nach TORBRÜGGE [Tor 15] beispielsweise auf, wenn die Kante eines Reifenprofilblocks gegen Unebenheiten der Fahrbahnoberfläche gleitet und dabei eine Widerstandskraft erzeugt. TORBRÜGGE vermutet, dass dieser Effekt auf relativ „ebenen“ rauen Oberflächen nicht von vorrangiger Bedeutung ist.

## 2.2 Straßenoberfläche

Bei der Untersuchung der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn stellt die Fahrbahn neben dem Reifen den zweiten Reibpartner dar. In diesem Kapitel soll deshalb auf die Fahrbahnoberfläche eingegangen werden. Hierbei beschränkt sich die Betrachtung der Fahrbahn auf deren

Deckschicht, da nur diese im direkten Kontakt mit dem Reifen steht (Näheres siehe: [Vel 13], [Wie 05], [Ric 08]).

Im deutschen Straßennetz werden hauptsächlich die folgenden Fahrbahndeckschichten verbaut:

- Asphaltdecken [TLA 14], [ZTV 13]
- Betondecken [TLB 08], [ZTV 08]
- Pflasterdecken und Plattenbeläge [TLP 06], [ZTV 06]
- Deckschichten ohne Bindemittel [TLG 08], [DIN 12]

Im Weiteren wird allerdings ausschließlich auf den Aufbau von Asphaltdecken und Betondecken eingegangen, da hauptsächlich diese beiden Fahrbahndecken im deutschen Straßennetz (Bundesautobahnen und Bundesstraßen) verbaut sind. Autobahndecken bestehen zu 72 % aus Asphalt und zu 28 % aus Beton, während Bundesstraßen zu 98,5 % aus Asphalt und zu 1 % aus Pflaster bestehen (vgl. [Ric 08], Stand 1999).

### 2.2.1 Fahrbahnaufbau / -material

Fahrbahndecken aus Asphalt bestehen je nach gewünschter Asphaltart (Bsp. Asphaltbeton, Offenporiger Asphalt, ...) aus einer festgelegten abgestuften Korngrößenverteilung und aus dem Bindemittel Bitumen. Das verwendete Gestein wird im Hinblick auf dessen Polierresistenz, zur Sicherstellung hoher Griffigkeitswerte für eine möglichst lange Lebensdauer, gewählt. Als Bitumen kommen Straßenbaubitumen und polymermodifizierte Bitumen zum Einsatz. Der Einbau, die Verdichtung und die Nachbehandlung der Asphaltdecken werden so durchgeführt, dass verkehrssichere und widerstandsfähige Fahrbahnoberflächen entstehen (Näheres hierzu siehe auch [ZTV 13], [TLA 14], [Bür 12]).

Fahrbahndecken aus Beton werden auch als hydraulisch gebundene Decken bezeichnet und bestehen, wie Asphaltdecken auch, aus einer festgelegten abgestuften Korngrößenverteilung (ungebrochenes

und/oder gebrochenes Gestein) und einem Bindemittel. Als Bindemittel kommen hier hydraulische Bindemittel zum Einsatz. Die Oberflächen von Betondecken werden nach dem Einbau strukturiert, was eine hohe Griffigkeit bei gleichzeitig lärmtechnisch günstigen Eigenschaften gewährleisten soll (Näheres hierzu siehe auch [ZTV 08], [TLB 08], [Vel 13], [Bür 12]).

Aus der materiellen Zusammensetzung der Asphalt- und Betondecken ist bereits ersichtlich, dass diese chemisch aus grundlegend unterschiedlichen Bestandteilen aufgebaut sind. Zum einen unterscheiden sich die Bindemittel erheblich (Bitumen zu polymermodifiziertem Bitumen bzw. zu hydraulischem Bindemittel) und zum anderen werden gleichzeitig auch sehr unterschiedliche Gesteinsarten (auch innerhalb der einzelnen Asphalt- bzw. Betondecken) verwendet. Dies kann bedeuten, dass einem offenporigen Asphalt in Norddeutschland, im Vergleich zu einem in Süddeutschland, zwar grundsätzlich die gleiche Rezeptur zugrunde liegt, die chemische Zusammensetzung jedoch aufgrund der lokalen unterschiedlich verfügbaren Gesteinsarten grundlegend unterschiedlich ist.

Da, nach PERSSON [Per 98], der Reibbeiwert mit einer größer werdenden freien Oberflächenenergie der Reibpartner ansteigt, ist zu erwarten, dass die in den Fahrbahnoberflächen verwendeten Materialien den Reibbeiwert (insbesondere dessen Adhäsionsanteil) unterschiedlich beeinflussen werden.

Untersuchungen in dieser Arbeit bestätigen, dass die Materialien in den vorgestellten Fahrbahndecken signifikant unterschiedliche freie Oberflächenenergien aufweisen können (siehe Kapitel 5.1).

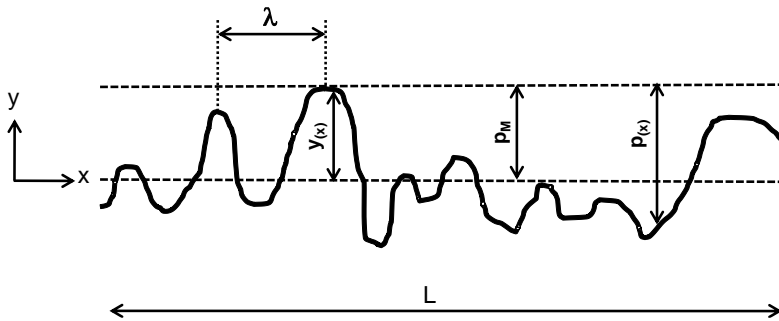
### **2.2.2 Fahrbahntextur**

In diesem Kapitel wird auf die Oberflächenstruktur von Fahrbahndecken eingegangen, da diese den Reibbeiwert (insbesondere



dessen Hystereseanteil) maßgebend beeinflusst. In Abbildung 13 ist exemplarisch die Textur einer Fahrbahnoberfläche veranschaulicht.

Die Textur (Rauheit) kann hierbei als die Feingestalt der Oberfläche verstanden werden, die sich auf die Griffigkeit und auch auf weitere Gebrauchseigenschaften auswirkt (siehe hierzu auch [Vel 13], [DIN 04a], [DIN 04b]).



**Abbildung 13:** Textur einer Fahrbahnoberfläche in Anlehnung an [Vel 13], [DIN 04a] und [DIN 04b]

Nach VELSKE [Vel 13] kann die mittlere Profiltiefe  $p_M$ , welche auch als MPD (Mean Profile Depth) bezeichnet wird, über (5) bestimmt werden. Der Betragsmittelwert des Profils  $R_a$ , der auch als Arithmetischer Mittenrauwert des Rauheitsprofils bezeichnet wird, bestimmt sich über (6) [DIN 04b].

$$p_M = MPD = \frac{1}{L} * \int_0^L p(x) dx \quad (5)$$

$$R_a = \frac{1}{L} * \int_0^L |y(x)| dx \quad (6)$$

In Tabelle 1 wird die Fahrbahntextur in unterschiedliche Wellenlängenbereiche unterteilt und deren Wirkung u. a. auf das Reifen- bzw. Fahrzeugverhalten verdeutlicht (siehe [Vel 13], [DIN 04b]).

**Tabelle 1:** Unterscheidung der Rauheitsbereiche / Texturbereiche aus [Vel 13] (siehe hierzu auch [DIN 04b])

	<b>Wellenlängenbereich</b>	<b>Wirkung</b>
<b>Mikrorauheit</b>	$\lambda < 0,5$ mm	Haftreibung
<b>Makrorauheit</b>	$\lambda = 0,5$ bis 50 mm	Dränage, Sprühfahnen, Rollgeräusche, Farbe
<b>Megaraueheit</b>	$\lambda = 50$ bis 500 mm	Rollgeräusche, Rollwiderstand
<b>Unebenheit</b>	$\lambda = 500$ mm bis 50 m	Rollwiderstand, Fahrzeugschwingungen
<b>Längsprofil</b>	$\lambda > 50$ m	Gradiente

Da der Einfluss der Fahrbahntextur auf die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn in dieser Arbeit jedoch nicht Hauptgegenstand der Untersuchungen ist, wird hier nicht weiter auf deren Charakterisierung eingegangen.

Im Allgemeinen gilt jedoch zu beachten, dass dieser Einflussparameter für die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn von herausragender Bedeutung ist (siehe auch [Bac 96]).

## 2.3 Zwischenmedien

In diesem Kapitel soll der Einfluss von Zwischenmedien auf die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn phänomenologisch näher betrachtet werden. Zwischenmedien können alle unterschiedlichen Aggregatzustände (fest, flüssig oder auch gasförmig) aufweisen. Die Betrachtung in dieser Arbeit beschränkt sich auf das flüssige Zwischenmedium „Wasser“, da dieses im realen Anwendungsfall am

häufigsten als „Kontaminationsquelle“ im Kontakt vorliegt (Wasser weist eine niedrige Viskosität und eine polare Struktur auf [Ken 05]). Es gilt jedoch zu beachten, dass in der Praxis, d.h. auf realen Fahrhahnoberflächen meist nicht reines Wasser, sondern ein Wasser-Schmutz-Gemisch vorliegt, was Auswirkungen auf dessen physikalisches und chemisches Verhalten und damit letztlich auch auf die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn haben kann.

An dieser Stelle wird eine Modellvorstellung zur Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche vorgestellt, welche von MOORE [Moo 65] entwickelt und in der Literatur seither mehrfach aufgegriffen wurde (siehe hierzu auch [Sch 69], [Moo 72], [Hor 83], [Har 91], [Bac 96], [Kok 98], [Cer 14]). Diese vereinfachte Modellvorstellung geht davon aus, dass die Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche beim Abrollen über eine mit Wasser bedeckte Fahrbahn in drei Bereiche aufgeteilt werden kann (siehe Abbildung 14).

In der Einlaufzone (A-B) bildet sich zwischen Reifen und Fahrbahn ein Wasserkeil (geschlossene Wasserschicht  $> 1$  mm) aus. In diesem Bereich können nur Reibkräfte übertragen werden, die aus der Scherung und der Überwindung der Trägheitswirkung der Flüssigkeit resultieren. Der sich hier ergebende Reibanteil ist aufgrund der Dicke des Wasserfilms allerdings vernachlässigbar gering. Die Ausprägung dieses Flächenanteils hängt im Wesentlichen von der Geschwindigkeit, der Wasserfilmdicke (d.h. der Massenträgheit des Wassers), der Makrotextur der Fahrbahn und des Reifens (Reifenprofil und -innendruck) ab. Nimmt die Einlaufzone die gesamte Latschfläche ein, d.h. ist der Reifen vollständig vom Wasserkeil unterwandert, dann wird im Allgemeinen von Aqua- bzw. Hydroplaning gesprochen und es können nur noch geringe Kräfte vom Reifen auf die Fahrbahn übertragen werden.

In der Übergangzone (B-C) ist die Wasserschicht teilweise durchbrochen, was bedeutet, dass bereits so viel Wasser aus dem Kontakt verdrängt wurde, dass lokal bereits direkter Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn auftritt, d.h. es kommt bereits teilweise zur

Grenzschichtreibung. Allerdings existieren auch noch sehr viele Stellen (Wassernester) an denen die beiden Reibpartner noch durch eine Wasserschicht vollständig voneinander getrennt sind. Die Dicke des Wasserfilms variiert in diesem Bereich zwischen 0,01 mm und 1 mm. Die Ausprägung dieses Flächenanteils wird im Wesentlichen durch die Mikrotextur der Fahrhahnoberfläche und den physikalischen Eigenschaften des Zwischenmediums (d.h. der Viskosität) bestimmt.

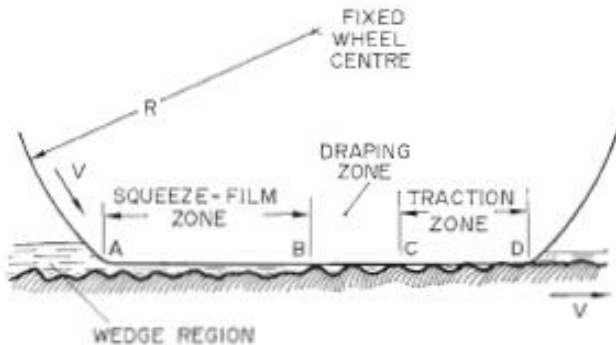


Abbildung 14: Drei-Zonen-Modell der Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche aus [Moo 72]

In der Kontaktzone (C-D) wird davon ausgegangen, dass physikalisch „trockener“ Kontakt vorliegt, d.h. in diesem Bereich liegt zum Großteil Grenzschichtreibung vor. Hier wird davon ausgegangen, dass die noch vorhandene Restfeuchte in der Kontaktzone durch die hohen Druckgradienten an den scharfen Texturkanten und -spitzen durchbrochen wird. In diesem Bereich des Reifen-Fahrbahn-Kontaktes entsteht der Hauptanteil des Reibbeiwertes.

PERSSON [Per 99] bemerkt im Allgemeinen (Querverweis zur Stribeck-Kurve, hydrodynamische Reibung), dass Zwischenmedien sehr schnell aus dem Kontakt gefördert werden, wenn die Gleitgeschwindigkeit und/oder die Viskosität sehr gering sind. Dies führt zu einem Vorgang, der auch als Grenzschmierung oder Grenzschichtschmierung bezeichnet wird, und zu einem erheblich höheren Reibwerten. Der

Reibwert ist hier typischerweise bis zu 100-mal höher als im hydrodynamisch geschmierten Bereich. Weiterhin bemerkt er, dass die Viskosität im Bereich der hydrodynamischen Schmierung den wichtigsten Einflussparameter darstellt, gleichzeitig aber im Bereich der Grenzschmierung vollkommen unbedeutend ist. Im Bereich der Grenzschmierung dominieren die Effekte der direkten Wechselwirkungen zwischen den Festkörperoberflächen und den Molekülen des Schmiermittels.

## **2.4 Labor-Messverfahren zur Kraftübertragung zwischen Reifen/Gummi und Fahrbahn**

Die Reibung zwischen Reifen/Gummi und Fahrbahn wird von sehr vielen Parametern, Umgebungs- und Betriebsbedingungen beeinflusst (siehe auch Kapitel 1.2). Daher ist es bei empirischen Untersuchungen von großem Vorteil, den Komplexitätsgrad soweit als möglich zu reduzieren, indem unter Laborbedingungen immer nur wenige Einflussparameter gemeinsam betrachtet werden. Neben den Laborverfahren gibt es ebenfalls eine Vielzahl weiterer Verfahren, um die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn auch im Außenversuch untersuchen zu können. Auf diese Verfahren wird in dieser Arbeit jedoch nicht näher eingegangen.

In der Literatur wird eine Vielzahl von Prüfstandsumgebungen vorgestellt, die für Reibungsuntersuchungen unter Laborbedingungen herangezogen werden können. Hierbei handelt es sich zum einen um Prüfstände, bei denen der Reifen als Ganzes untersucht werden kann (vgl. [Tor 14], [Hüs 11], [Sch 09], [Bol 06], [Gna 96]), und zum anderen um Prüfstände, an denen einzelne Elemente bzw. Teile des Reifens, beispielsweise Gummigleitkörper (vgl. [Lin 14], [Mih 13], [Con 12], [Fri 13]) und/oder Gummirädchen (vgl. [Hei 07], [Gro 96]), untersucht werden können.

In diesem Kapitel soll zunächst der Innentrommelprüfstand des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) am KIT vorgestellt werden, da dieser für Untersuchungszwecke in dieser Arbeit verwendet wurde. Im Anschluss daran wird der Aufbau des Prüfstandes nach GROSCH [Gro 96] vorgestellt (auch als LAT100 bezeichnet), da sich die Funktionsweise des in dieser Arbeit aufgebauten und verwendeten Prüfstandes (siehe Kapitel 4.1) eng an diesen anlehnt.

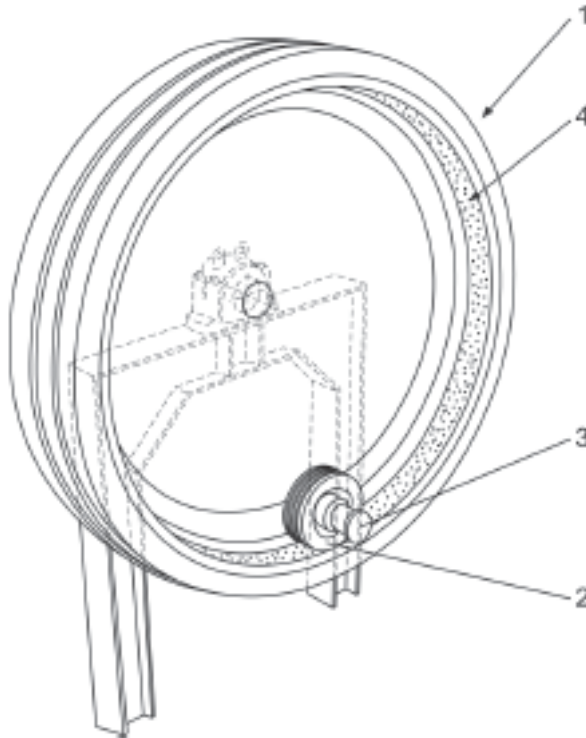
### 2.4.1 Innentrommelprüfstand (IPS) am FAST

Der Innentrommelprüfstand (IPS) des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) stellt eine Prüfumgebung dar, an der unter sehr realitätsnahen Bedingungen (Umgebungsbedingungen sowie Betriebsbedingungen) Fahrzeugreifen als Ganzes auf ihr Verhalten unter anderem bezüglich Kraftschlussseigenschaften, Abrieb und Schwingungsverhalten (Komfort und Akustik) untersucht werden können. Der prinzipielle Aufbau wurde von GÜTLINGER [Gül 15] veranschaulicht und ist in Abbildung 15 ersichtlich (vgl. auch [Bol 06]).

Diese Prüfumgebung kann grob in die drei Bereiche: Reifen, Fahrbahn und Umgebung unterteilt werden.

Die Fahrbahnseite umfasst hierbei die Innentrommel (1) mit einem Innendurchmesser von 3,80 m, in welche unterschiedliche Fahrbahnbeläge (4) mit einer Breite von bis zu 275 mm eingebaut werden können. Diese Fahrbahnbeläge können beispielsweise Oberflächen sein, wie sie auch als reale Fahrbahndecken im deutschen Bundesstraßennetz vorkommen (Asphalt- und Betondecken).

Weiterhin können auch spezielle Fahrbahnoberflächen wie beispielsweise SafetyWalk installiert bzw. Schnee oder Eisoberflächen definiert reproduzierbar erzeugt werden.



**Abbildung 15:** Prinzipskizze des Innentrommelprüfstands (IPS) des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) aus [Gül 15], dargestellt ohne Radführung

Der SafetyWalk-Belag stellt hierbei eine standardisierte Prüfoberfläche dar, die eine stark ausgeprägte Mikrotextur bei gleichzeitig schwach ausgeprägter Makrotextur aufweist. Diese künstliche Fahrbahnoberfläche besteht aus dem Füllstoff Korund und dem Bindemittel Kunstharz und zeichnet sich durch eine sehr hohe Polierresistenz aus.

Zur Durchführung von Untersuchungen kann die Prüfstandstrommel über einen elektrischen Antrieb auf die gewünschte Geschwindigkeit (bis max. 200 km/h) beschleunigt werden.

Die Reifenseite besteht aus dem zu untersuchenden Reifen, der durch unterschiedliche Radführungen zeitabhängig definiert geführt (Schräglaufwinkel, Sturz, Anpresskraft) und mit der Fahrbahn in Kontakt (2) gebracht wird. Als Radführungen stehen eine „starre“ Radführung (vgl. [Bol 06]), eine „elastische“ Radführung (vgl. [Arm 15]) sowie eine Radaufhängung mit einem McPherson-Feder-Dämpfer-System (vgl. [Zho 15]) zur Verfügung. Bei Verwendung der „starren“ Radführung kann der Reifen mit einem Antriebs- oder Bremsmoment (mittels Hydraulikantrieb) beaufschlagt werden. Die auftretenden Kräfte und Momente werden je nach gewählter Radführung mit geeigneter Messtechnik (3) erfasst und aufgezeichnet.

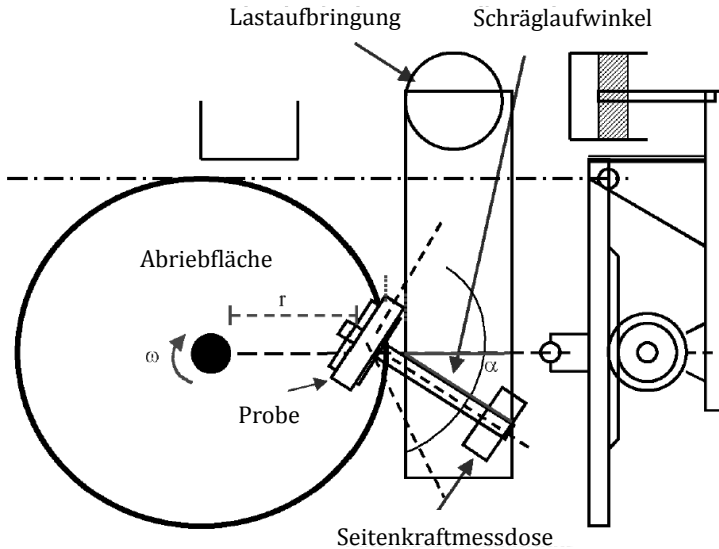
Den dritten Bereich des Prüfstandes stellt die direkte Umgebung des Reifens dar, in welchem die Temperatur der Luft eingestellt und überwacht werden kann (- 20 °C bis + 30 °C). Dieser Bereich umfasst ebenso die Konditionierung, die Einleitung und Überwachung von Wasser als flüssigem Zwischenmedium (Wasserhöhen sind bis 4 mm möglich), der Zuführung von Schnee oder der Erzeugung von Eisoberflächen.

### 2.4.2 Prüfstand nach GROSCH / LAT100

Der LAT100 ist eine Prüfumgebung, die von GROSCH zur Untersuchung des Abrieb- und auch des Griffigkeitsverhaltens von Reifenlaufflächenmischungen entwickelt und aufgebaut wurde. Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 16 ersichtlich und wird im Weiteren näher beschrieben [Gro 96], [Hei 07].

Bei diesem Prüfstand werden vulkanisierte Vollgummirädchen ( $\varnothing_A \approx 80$  mm,  $B \approx 18$  mm) unter Schräglaufwinkel, mit vorgegebener Anpresskraft gegen eine vertikal orientierte, flache und mit definierter Drehzahl betriebene Abriebfläche gepresst und die dabei auftretende Seitenkraft gemessen. Hierzu wird das Vollgummirädchen frei rollend gelagert. Ebenso ist es jedoch auch möglich, Untersuchungen mit blockiertem Rad durchzuführen.





**Abbildung 16:** Prinzipskizze der Messeinrichtung nach GROSCH (auch als LAT100 bezeichnet) nach [Gro 96] & [Hei 07]

Als Abriebflächen stehen beispielsweise Korund-Oberflächen mit unterschiedlichen Schärfegraden oder auch sandgestrahlte Glasoberflächen zur Verfügung. Der Schräglaufling kann manuell zwischen  $\pm 45^\circ$  eingestellt werden. Der Winkel wird elektronisch gemessen und angezeigt, es können jedoch keine vollautomatischen Winkelprozeduren durchgeführt werden. Die Anpresskraft (10 bis 150 N), die Geschwindigkeit (0,0002 bis 100 km/h) und die Messdauer werden über einen PC gesteuert. Weiterhin kann temperiertes Wasser (0 bis  $+ 80^\circ\text{C}$ ) in der Nähe der Gummiprobe auf die Scheibe gepumpt werden.



## **3. Forschungsansatz und -methode**

Im ersten Teil dieses Kapitels wird die Abstraktion vom Reifen bis zum Gummigleitkörper veranschaulicht. Es werden zwei Modellvorstellungen zum Einfluss des Benetzungsverhaltens des Zwischenmediums Wasser auf den Kontakt zwischen Reifen/Gummi und Fahrbahn vorgestellt. Die erste Modellvorstellung behandelt den gleitenden Kontakt und die zweite den rollenden Kontakt. Anschließend wird die Forschungshypothese vorgestellt, die dieser Arbeit zugrunde liegt. Im zweiten Teil dieses Kapitels wird die Struktur bzw. die Methode, der in dieser Arbeit gewählten Vorgehensweise, näher erläutert.

### **3.1 Modellvorstellungen und Forschungshypothese**

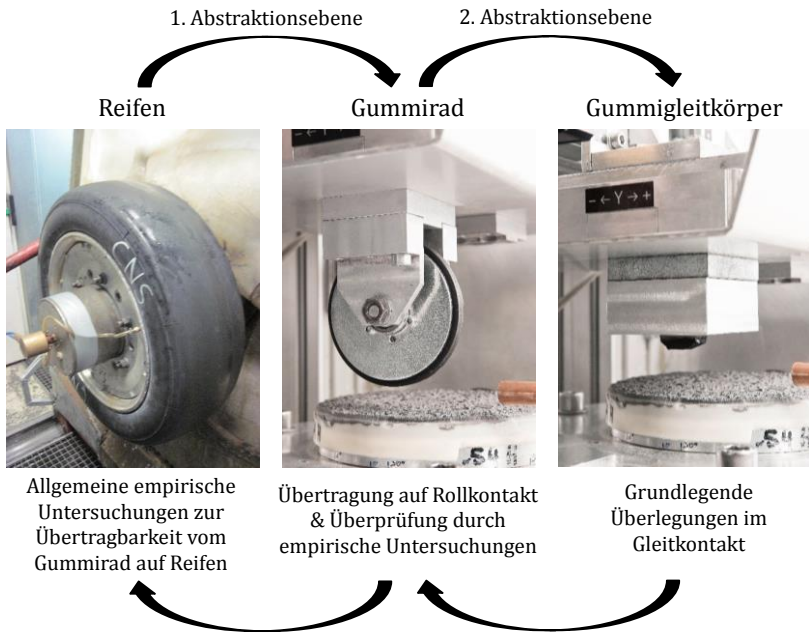
Auf realen Fahrbahnoberflächen können durch Umwelteinflüsse oberflächenaktive Substanzen (Bsp. Detergenzien/Tenside) entstehen (vgl. [Ken 05]). Lösen sich diese Substanzen bei einsetzendem Regen im Wasser auf, kann das abhängig von der lokal vorliegenden Konzentration dazu führen, dass dort die lokale Oberflächenspannung des Wassers (Zwischenmedium zwischen Reifen und Fahrbahn) im Vergleich zu reinem Wasser herabgesetzt wird.

Dies wiederum führt unter anderem dazu, dass sich die Eigenschaft des Wassers, an Oberflächen zu adsorbieren, grundlegend ändert, was sich schließlich auch auf den Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn auswirken kann. Viele Untersuchungsergebnisse zeigen bisher, dass sich die Zugabe von Tensiden (oberflächenaktive Substanz) zum

Zwischenmedium Wasser in einer Reduzierung des zu erwartenden Reibbeiwertes äußert (siehe hierzu Kapitel 1.2).

### 3.1.1 Vom Reifen zum Gummigleitkörper

Um den Einfluss der Oberflächenspannung des Zwischenmediums auf die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn isoliert (vom Reifenprofil, dem Reifennendruck, dem Reifenaufbau, usw.) betrachten zu können, wird der Reifen auf Modellebene in der ersten Abstraktionsstufe zum Gummirad und in der zweiten Abstraktionsstufe zum Gummigleitkörper reduziert (siehe Abbildung 17).



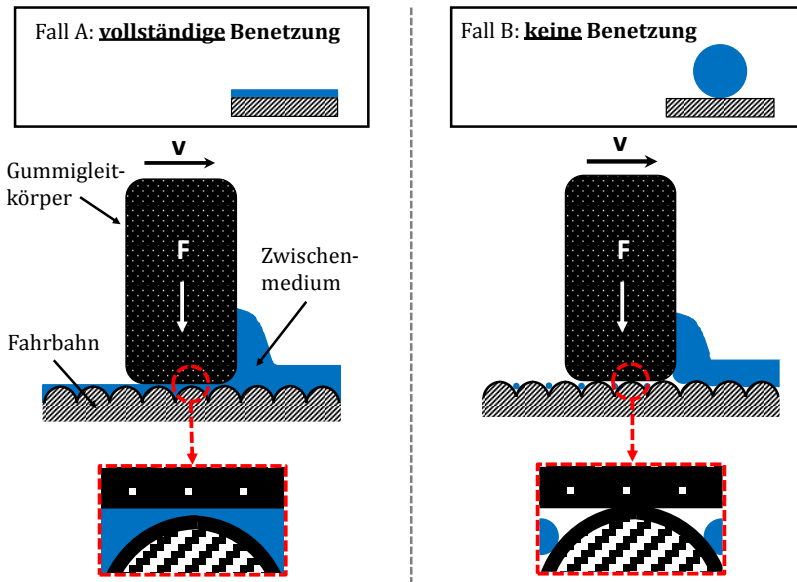
**Abbildung 17:** Abstraktion vom Reifen über Gummirad zum Gummigleitkörper, Übertragung grundlegender Überlegungen vom Gummikörper über Gummirad zum Reifen

Im nächsten Schritt werden dann grundlegende Überlegungen im gleitenden Kontakt (Gummigleitkörper) angestellt und diese anschließend zurück auf den rollenden Kontakt übertragen. Durch Untersuchungen am Gummirad (im kleinen Maßstab) soll die anschließend formulierte Forschungshypothese empirisch überprüft werden. Um sicherzustellen, dass die am Gummirad ermittelten Untersuchungsergebnisse zumindest prinzipiell auf PKW-Reifenmessungen übertragen werden können, werden allgemeine empirische Untersuchungen zur Übertragbarkeit zwischen Gummirad und Reifen durchgeführt.

#### 3.1.2 Modellvorstellung am Gummigleitkörper

In Abbildung 18 ist eine Modellvorstellung abgebildet, die den Einfluss des Benetzungszustandes (Erläuterung in Kapitel 5) auf den Kontakt zwischen Reifen (bzw. Gummi) und Fahrbahn im gleitenden Kontakt veranschaulicht. In dieser Modellvorstellung wird ein Gummigleitkörper mit einer konstanten Anpresskraft  $F$  beaufschlagt, während dieser mit der Geschwindigkeit  $v$  relativ zur Fahrbahn gleitet.

In Abbildung 18 sind die zwei unterschiedlichen Grenzfälle abgebildet. Beide Fälle veranschaulichen den Kontakt zwischen dem Gummigleitkörper und der Fahrbahnoberfläche, jedoch bei Vorliegen unterschiedlicher Zwischenmedien. Im Fall A liegt ein Zwischenmedium vor, das die Festkörperoberflächen vollständig benetzt. Fall B veranschaulicht den Einfluss eines Zwischenmediums, das die Festkörperoberflächen nicht bzw. schlecht benetzt. An dieser Stelle wurde vereinfachend davon ausgegangen, dass beide Festkörperoberflächen (Gummi und Fahrbahn) den gleichen Benetzungszustand aufweisen.



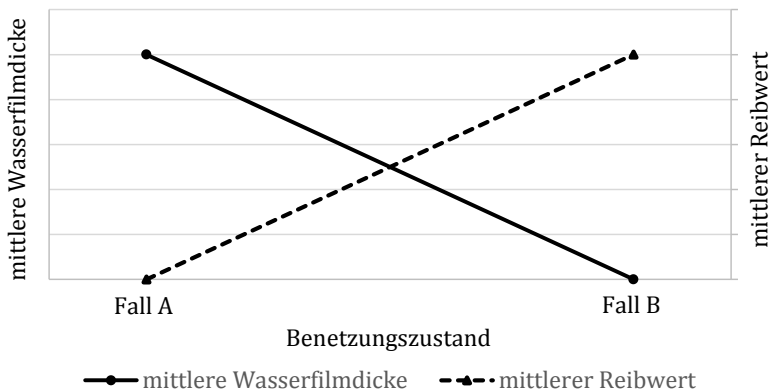
**Abbildung 18:** Einfluss des Benetzungszustandes auf den Kontakt zwischen Gummi und Fahrbahn

Es ist zu erkennen (siehe vergrößerte Bildbereiche in Abbildung 18), dass im Fall A zwischen Reifen und Fahrbahn flüssiges Zwischenmedium vorliegt, kein direkter Festkörperkontakt (zwischen Gummi und Fahrbahn) und damit auch keine reale Kontaktfläche existiert. Die Reibkräfte, die in diesem Bereich entstehen, sind auf die Scherverluste im Zwischenmedium, auch abhängig von dessen Schichtdicke, zurückzuführen (vgl. viskoser Reibanteil, Kapitel 2.1.3.4). Zusätzlich wird es auch einen Reibanteil geben, der auf den Hysteresemechanismus zurückgeführt werden kann, da die Benetzung zu einem geschlossenen Schmierfilm führen wird, die Fahrbahn dadurch jedoch nicht vollständig geglättet sein wird.

Im Fall B bildet sich lokal Festkörperkontakt aus, d.h. es entsteht zusätzlich zu den im Fall A beschriebenen Mechanismen eine reale

Kontaktfläche zwischen den beiden Festkörpern und damit sind erheblich höhere Reibkräfte möglich (molekulare Wechselwirkungen zwischen den Festkörpern, siehe Adhäsionsanteil im Kapitel 2.1.3.1). Durch die nun vorhandenen molekularen Wechselwirkungen zwischen Gummi und Festkörperoberfläche sollte sich, wie bereits von PERRSON [Per 98] beschrieben, auch der Hystereanteil vergrößern, da nun auch kurzweilig Texturanteile vom Gummi ausgefüllt werden.

Zwischen den beiden veranschaulichten Grenzfällen ist eine Vielzahl weiterer Benetzungszustände möglich, bei denen sich der Benetzungszustand auf die mittlere Filmdicke im Kontakt und damit schließlich auch auf den mittleren Reibbeiwert auswirken kann (siehe hierzu Abbildung 19).



**Abbildung 19:** Hypothese zum Einfluss des Benetzungszustandes auf die Wasserfilmdicke und den lokalen Reibwert beim Gummi-Gleitkörper-Modell (vereinfachte Darstellung)

An dieser Stelle wird zur Veranschaulichung vereinfachend von linearen Zusammenhängen zwischen dem Benetzungszustand und der mittleren Filmdicke im Kontakt sowie dem mittleren Reibbeiwert ausgegangen. Die Abbildung zeigt, dass erwartet wird, dass Zwischenmedien mit guten Benetzungseigenschaften auf den

vorliegenden Festkörperoberflächen im Vergleich zu schlechten Benetzungseigenschaften des Zwischenmediums zu größeren Filmdicken im Kontakt führt. Beim Reibbeiwert ist entsprechend ein umgekehrter Zusammenhang zu erwarten.

Weiterhin ist hier zu bemerken, dass sich nicht nur die Benetzungseigenschaften des Zwischenmediums in Kombination mit den Oberflächeneigenschaften der Festkörper, sondern auch weitere Einflussparameter auf den Reibbeiwert auswirken können. Bei texturierten Fahrbahnen könnte sich zum einen zusätzlich die Kapillarwirkung, die sich aus der Kombination der Eigenschaften des Zwischenmediums (Bsp. Oberflächenspannung, Dichte, ...) und den vorliegenden Fahrbahnunebenheiten (geometrische Form und Größe) ergibt, auf den Reibbeiwert auswirken.

Zum anderen könnten sich an Stellen, an denen sich nur noch sehr wenige molekulare Schichten des Zwischenmediums zwischen den beiden Festkörpern befinden, physikalische Wechselwirkungen auf den Reibwert auswirken. Würde beispielsweise nur noch eine molekulare Schicht des Zwischenmediums zwischen den beiden Festkörpern vorliegen, wäre es nicht mehr möglich diese Schicht zu scheren und damit einen geringen Verlust der viskosen Komponente der Reibung zu erzeugen. Es wäre dabei jedoch denkbar, dass auch diese dünne Schicht den Reibbeiwert stark beeinflusst, da nicht die Reibpaarung Gummi-Fahrbahn sondern die zwei Reibpaarungen Gummi-Zwischenmedium und Zwischenmedium-Fahrbahn vorliegen. Zusätzlich könnten auch Anziehungskräfte vom Gummi über das vorhandene Zwischenmedium hinweg auf die Fahrbahn wirken.

Zu bemerken ist jedoch auch, dass die Ausbildung des Flüssigkeitsfilms zwischen den beiden Festkörpern von einer Vielzahl weiterer Einflussgrößen abhängig sein wird (Bsp. Gleitgeschwindigkeit, Anpressdruck, Fahrbahnmakro- und -mikrotextur), auf die an dieser Stelle jedoch nicht weiter eingegangen wird.



### 3.1.3 Modellvorstellung für den abrollenden Reifen bzw. das abrollende Gummirad

Die in Abbildung 18 vorgestellte Modellvorstellung wird im nächsten Schritt vom Gummigleitkörper auf das abrollende Rad erweitert (rollender Kontakt). Hierzu wird das in Abbildung 14 vorgestellte Drei-Zonen-Modell nach MOORE [Moo 72] als Basis herangezogen und zum Vier-Zonen-Modell weiterentwickelt.

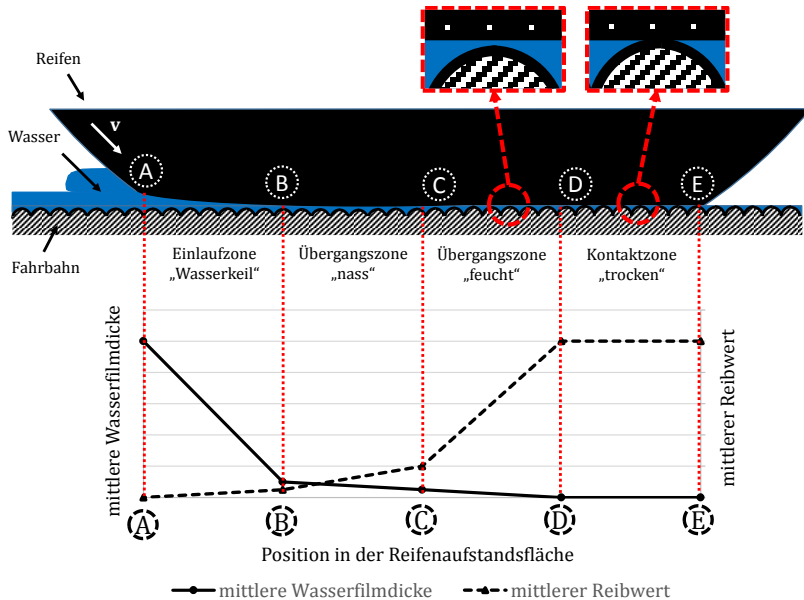
In der erweiterten Modellvorstellung wird die Übergangszone in die zwei Bereiche Übergangszone „nass“ und Übergangszone „feucht“ aufgeteilt (siehe Abbildung 20). Zusätzlich sind in dieser Abbildung die Verläufe der mittleren Wasserfilmdicke und des mittleren Reibwertes über der Position in der Reifenaufstandsfläche vereinfacht qualitativ aufgetragen.

Bei der folgenden Erläuterung der einzelnen Zonen werden hauptsächlich die Auswirkungen, die durch das Zwischenmedium begründet werden, näher betrachtet. Es gilt jedoch zu beachten, dass weitere Einflussparameter, unter anderem die Fahrbahntextur (Makro- und Mikrotextrur), das Reifenprofil (Profilrillen quer & längs, Lamellierung), die Reifengummimischung sowie die vorliegenden Umgebungsbedingungen und Betriebsbedingungen die Ausprägung der verschiedenen Zonen in großem Maße beeinflussen können.

In der **Einlaufzone** (A-B) schiebt sich aufgrund der Trägheit des Wassers ein Wasserkeil zwischen Reifen und Fahrbahn. Hierbei handelt es sich um geschlossene Wasserschichten mit einer Filmdicke  $> 1$  mm. In diesem Bereich können nur Reibkräfte übertragen werden, die durch die Scherung der Flüssigkeit entstehen. Aufgrund der relativ dicken Wasserschicht sind diese jedoch vernachlässigbar gering (siehe auch Kapitel 2.3).

In der **Übergangszone „nass“** (B-C) befindet sich aufgrund der Viskosität des Wassers noch Wasser, mit einer mittleren Filmdicke von

0,01 mm bis 1 mm, im Kontakt. In diesem Bereich ist der Wasserfilm bereits teilweise durchbrochen und es kann lokal zum „trockenen“ Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn, d.h. zur Grenzschichtreibung kommen. An den meisten Stellen ist der Reifen und die Fahrbahn allerdings noch durch einen geschlossenen Wasserfilm voneinander getrennt (siehe auch Kapitel 2.3).



**Abbildung 20:** Erweiterung des Drei-Zonen-Modells (aus [Moo 72]) um den Einfluss des Benetzungszustandes zum Vier-Zonen-Modell

In der **Übergangszone „feucht“** (C-D) wurde bereits so viel Wasser aus dem Kontakt verdrängt, dass sich zwischen Reifen und Fahrbahn aufgrund der Benetzungseigenschaften des Wassers und der Benetzbarkeit der Festkörperoberflächen (Reifen und Fahrbahn) noch Wasser mit einer Filmdicke von „0,00 mm“ bis 0,01 mm befindet. „0,00 mm“ kann hier, zum einen, absolut trockenen Kontakt bedeuten.

In diesem Fall würde der Gummi lokal den vorliegenden Wasserfilm vollständig verdrängen (Scheibenwischereffekt) und die beiden Festkörper würden sich im direkten Kontakt befinden. Zum anderen könnte „0,00 mm“ aber auch bedeuten, dass im Kontakt noch Wasser, mit Schichtdicken von wenigen Molekülen, vorliegt und damit den Reibbeiwert beeinflussen kann.

Nach PERSSON [Per 99] gilt im Allgemeinen, dass ein Flüssigkeitsfilm, welcher sich zwischen zwei gegeneinander gepressten Festkörperoberflächen befindet, nie vollständig verdrängt wird. Wenn lokale Drücke vorliegen, die nicht zu hoch sind, können hier Filmdicken zwischen 10 Å und 100 Å ( $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$ ) erwartet werden.

In der realen Anwendung ist zu erwarten, dass beide Fälle (absolut trockener Kontakt und dünne molekulare Wasserschichten im Kontakt) abhängig von den lokalen Bedingungen (Fahrbahntextur, Gummieigenschaften und viele weitere Einflussgrößen) auftreten können. Diese Annahme begründet sich darin, dass die lokalen Drücke im Kontakt sehr stark variieren, teilweise lokale Drücke entstehen die zur vollständigen Entnetzung ausreichen und dadurch beide Zustände ermöglicht werden.

Die **Kontaktzone „trocken“** (D-E) beschreibt den Bereich der Reifenaufstandsfläche, in dem „trockener“ Kontakt (bzw. eine Filmdicke von „0,00 mm“ vorliegt, siehe auch Erklärungen zu Übergangszone „feucht“). In diesem Bereich entsteht der größte Anteil des Reibbeiwertes (bezogen auf die relative Fläche). Das Verhältnis von Flächenbereichen, mit absolut trockenem Kontakt, und Flächenbereichen, mit einer molekularen Schicht des Zwischenmediums, wird hier unter anderem vermutlich durch die direkten molekularen Wechselwirkungen zwischen den beiden beteiligten Festkörperoberflächen und dem flüssigen Zwischenmedium beeinflusst (siehe auch Ausführungen in 3.1.2).

Es bleibt allerdings zu beachten, dass die Aufteilung des Reifenlatsches in die vier vorgestellten Zonen nur zur leichteren Nachvollziehbarkeit durchgeführt wurde. Es kann jedoch auch bereits in der ersten und auch zweiten Zone teilweise zur Grenzschichtreibung kommen, wenn beispielsweise Texturanteile lokal mit dem Gummi des Rades in Kontakt treten (Bsp. Gesteinsspitze ragt weit aus der Fahrhahnoberfläche). Genauso ist es möglich, dass in der Kontaktzone „trocken“ Bereiche existieren, in denen noch ein geschlossener Wasserfilm vorliegt. Dies könnte beispielsweise durch den von PERSSON beschriebenen Sealing-Effekt (siehe Kapitel 2.1.3.2) begründet sein. Die vorgestellten 4 Zonen sollten daher eher als Phasen bzw. Klassen verstanden werden, in denen die beschriebenen Mechanismen maßgeblich wirken.

### **3.1.4 Forschungshypothesen**

In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass sich die Eigenschaften des Zwischenmediums (beispielsweise dessen Benetzungseigenschaften) auf die in Kapitel 3.1.3 erwähnten vier Zonen bezüglich deren Ausprägungen (siehe Abbildung 20) und damit auch auf den maximalen Reibwert zwischen Reifen und Fahrhahh signifikant auswirken. Hierzu werden die Eigenschaften des Zwischenmediums Wasser mittels Zugabe von Tensiden gezielt beeinflusst (Absenkung der Oberflächenspannung), dessen Eigenschaften charakterisiert und die Auswirkungen auf den maximalen Reibbeiwert, auf Basis empirischer Untersuchungen, analysiert.

Der Einfluss auf den Reibbeiwert kann dabei vermutlich auf die Grenzflächenwechselwirkungen zwischen dem Zwischenmedium und den vorliegenden Festkörpern zurückgeführt und zum Teil durch die drei folgenden Mechanismen erklärt werden:

1. Durch die Variation der Oberflächenspannung verändert sich das Benetzungsverhalten des Zwischenmediums und damit bei unveränderten Festkörperoberflächen (Gummi & Fahrhahh) auch jeweils deren Benetzungszustände. Hierbei wird erwartet,

dass sich die Ausprägung der Zone 3 im vorgestellten Vier-Zonen-Modell abhängig von den Benetzungszuständen der Festkörperoberflächen verändert. Umso besser eine Oberfläche benetzt ist, desto aufwendiger gestaltet sich auch deren Entnetzung (siehe Definition der Adhäsionsarbeit in Kapitel 5.4.2.1). Bezogen auf das vorgestellte Vier-Zonen-Modell ist zu erwarten, dass ein besserer Benetzungszustand (d.h. zwischen den Oberflächen und dem flüssigen Zwischenmedium ergeben sich kleinere Kontaktwinkel) der Gummi- bzw. auch der Fahrbahnoberfläche gleichermaßen die Zone 3 verlängert, was damit erwartungsgemäß unmittelbar zur Verkürzung der Zone 4 führt und dadurch den Reibbeiwert reduziert. Die Verkürzung der Zone 4 ergibt sich dabei aus dem Sachverhalt, dass die Gesamtlatschlänge über die Anpresskraft und das Steifigkeitsverhalten der Reifens (bzw. auch des Gummirades) vorgegeben ist. Verlängert sich nun bedingt durch unterschiedlichste Gründe die Ausprägung einer Zone, hat dies durch die festgelegte Gesamtlänge des Latsches unmittelbar Einfluss auf die verbleibenden Zonen. Hier bleibt jedoch zu beachten, dass jede Zone die nachfolgenden beeinflussen kann, aber nicht umgekehrt. Am Beispiel des Aquaplanings nimmt die Zone 1 bereits die gesamte Latschlänge ein und verhindert dadurch die Entstehung aller weiteren Zonen.

2. Die Variation der Oberflächenspannung des Zwischenmediums wirkt sich weiter auf die Kapillarwirkung zwischen dem vorliegenden Zwischenmedium und den Oberflächenstrukturen der beteiligten Festkörper aus. In diesem Kontext wird erwartet, dass Zwischenmedien mit hohen Oberflächenspannungen durch die höhere Kapillarwirkung leichter und vor allem schneller in das Reifenprofil, die aufgrund der Fliehkräfte nicht mit Wasser gefüllt sind, eindringen, damit die Drainagewirkung erhöhen und somit leichter aus dem Kontakt gefördert werden können. (Diese These setzt voraus, dass die Flüssigkeit die Reifenoberflächen

benetzt, da ansonsten der Effekt durch die beschriebene Kapillarwirkung nicht eintritt.) Da die Fahrbahntextur hingegen bereits mit Wasser gefüllt ist, ist hier eine derartige Auswirkung nicht anzunehmen. Bei höherer Kapillar- und der dadurch verbesserten Drainagewirkung ist zu erwarten, dass die Zone 2 verkürzt wird. Dies führt dazu, dass sich die Zonen 3 nach vorne verschiebt und dadurch die Zone 4 vergrößert, was wiederum zur Erhöhung des Reibbeiwertes führt.

3. In den Zonen 3 und 4 im vorgestellten Vier-Zonen-Modell könnte weiter erwartet werden, dass das in das Zwischenmedium eingebrachte Tensid, bei Filmdicken von ca. „0,00 mm“, die molekularen Wechselwirkungen zwischen Reifen/Gummi und Fahrbahn sowie dem Zwischenmedium direkt beeinflussen und sich damit ebenfalls auf den Reibbeiwert auswirken kann (siehe auch Ausführungen in 3.1.2). Dabei ist zu erwarten, dass die molekularen Wechselwirkungen nicht die Ausprägungen der beiden Zonen beeinflussen. Es ist vielmehr zu erwarten, dass sich dieser Einfluss in einer Veränderung des maximal vorliegenden Reibbeiwertes äußert, der in diesen Zonen erreicht werden kann.

Die in diesem Kapitel vorgestellten Forschungshypothesen werden im Kapitel 6 bezüglich ihrer Auswirkungen auf den Reibwert durch empirische Untersuchungen überprüft. Hierzu werden zur Charakterisierung des Benetzungszustandes der Fahrbahnoberfläche bzw. der Gummioberfläche bzw. zur Charakterisierung der Kapillarwirkung geeignete Kenngrößen ermittelt (siehe Kapitel 5.4.2).

## **3.2 Untersuchungsmethode**

Dieses Unterkapitel beschreibt die Struktur bzw. die gewählte Methode in dieser Arbeit (siehe Abbildung 21).

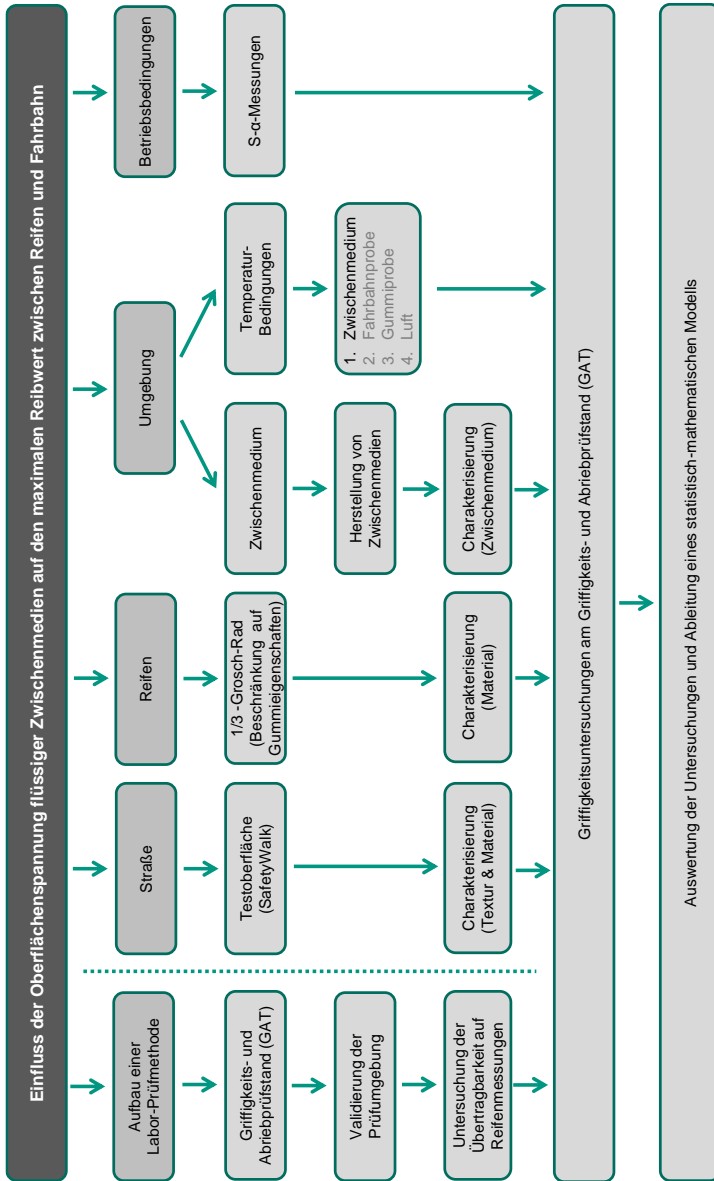


Abbildung 21: Methodisches Vorgehen dieser Arbeit

Die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn wird im realen Betrieb von Kraftfahrzeugen im Allgemeinen von sehr vielen, zum Teil schwer kontrollier- und überwachbaren Parametern in erheblichem Maße beeinflusst. Aus diesem Grund ist es ratsam, grundlegende Untersuchungen zum Reibverhalten unter Laborbedingungen durchzuführen, um aussagekräftige, reproduzierbare und belastbare Ergebnisse zu erhalten.

Ein wesentlicher Teil dieser Arbeit besteht deshalb darin, eine Prüfumgebung (Griffigkeits- und Abriebprüfstand) zu konzipieren und aufzubauen, die es ermöglicht, die notwendigen empirischen Untersuchungen unter Laborbedingungen durchführen zu können (siehe Kapitel 4.1).

Durch Untersuchungen zur Übertragbarkeit wurde sichergestellt, dass die mit dieser Prüfumgebung ermittelten Untersuchungsergebnisse prinzipiell auf Reifenmessungen übertragen werden können. Die Parameter, die die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn beeinflussen, wurden innerhalb dieser Arbeit in die vier Hauptkategorien Straße, Reifen, Umgebungs- und Betriebsbedingungen unterteilt. Im Folgenden werden die vorgestellten Hauptkategorien, in Bezug auf die hier entwickelte Prüfumgebung, näher erläutert (siehe Abbildung 21).

Die Hauptkategorie „Straße“ stellt den Reibpartner zum „Reifen“ dar. In der hier aufgebauten Prüfumgebung können Proben aus realen Fahrbahndecken (Bohrkerne) oder auch künstlich hergestellte Fahrbahnproben eingebaut und untersucht werden. Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurde eine polierresistente Testoberfläche (SafetyWalk 3M) verwendet, die in vielen Reifenprüfständen als Standardfahrbahn eingesetzt wird. Diese Fahrbahnoberfläche weist nahezu keine Makrotextur bei gleichzeitig stark ausgeprägter Mikrotextur auf und besteht aus den beiden Materialien Korund und Kunstharz. Das Korund (kristalliner Festkörper) stellt hierbei den texturgebenden Füllstoff dar und das



Kunstharz das verwendete Bindemittel. Vor der Durchführung der eigentlichen Untersuchungen wurde die Oberflächenstruktur sowie das Oberflächenmaterial mittels geeigneter Verfahren charakterisiert (siehe Kapitel 4 und Kapitel 5).

Die Hauptkategorie „Reifen“ stellt den Reibpartner zur „Straße“ dar. Bei den hier durchgeführten Untersuchungen bildet ein Vollgummirad ohne Profil (modifiziertes Grosch-Rad, Breite 6 mm, Durchmesser 70 mm) den Reifen ab. Durch die Verwendung von Vollgummirädern ist der Einfluss vieler Einflussgrößen (beispielsweise des Reifenprofils, des Reifenfülldrucks, des Unterbaus, ...) auf die Untersuchungsergebnisse größtenteils ausgeschlossen. Damit ist es möglich den Einfluss der Gummieigenschaften (viskoelastisches Verhalten) isoliert betrachten zu können. Bei den Untersuchungen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse wurden drei unterschiedliche Gummimischungen verwendet, wogegen bei den Hauptuntersuchungen nur eine Gummimischung zum Einsatz kam. Deren Charakterisierung erfolgte ausschließlich über die Bestimmung der Shorehärte (Shore A), da die Werte für den komplexen E-Modul vom Hersteller nicht zur Veröffentlichung freigegeben wurden.

Die Hauptkategorie „Umgebung“ lässt sich in die Unterpunkte „Zwischenmedium“ und „Temperaturbedingungen“ unterteilen. Unter „Zwischenmedium“ werden hier flüssige Zwischenmedien verstanden, die in den Kontakt zwischen Gummi und Fahrbahn eingeleitet werden können. Hierbei kann es sich um Wasser, aber auch um speziell für Untersuchungszwecke hergestellte Flüssigkeiten handeln. In dieser Arbeit wurden reines Wasser und wässrige Tensidlösungen als Zwischenmedien verwendet, die zuvor mit geeigneten Verfahren charakterisiert (siehe Kapitel 5.3.2) wurden. Unter „Temperaturbedingungen“ kann hier die Temperatur des Zwischenmediums, der Umgebung, des Gummis und der Fahrbahnoberfläche verstanden werden. Da in dieser Arbeit ausschließlich Messungen auf nasser Fahrbahn durchgeführt wurden, wurde hier ausschließlich die Temperatur des Wassers berücksichtigt, da erwartet werden kann, dass diese aufgrund der zur Luft

vergleichsweise hohen spezifischen Wärmekapazität und vergleichsweise sehr hohen Wärmeleitfähigkeit die anderen angeführten Temperatureinflüsse dominieren wird.

Die Hauptkategorie „Betriebsbedingungen“ beschreibt die Bedingungen während der Durchführung der Reibuntersuchungen. In dieser Arbeit werden zur Charakterisierung des Reibverhaltens zwischen Reifen bzw. Gummirad und Fahrbahn Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennlinien ermittelt und bezüglich des maximalen Seitenkraftbeiwertes ausgewertet.

Schließlich wurden an der konzipierten und aufgebauten Prüfumgebung Untersuchungen zum Reibverhalten zwischen Gummirad und Fahrbahn durchgeführt. Hierbei wurde im Speziellen der Einfluss der Oberflächenspannung flüssiger Zwischenmedien auf den maximalen Reibwert (bei Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Messungen) ermittelt.

Durch die Ableitung eines mathematisch-statistischen Modells (siehe Kapitel 6.4) wurden die Einflüsse der unterschiedlichen Parameter quantifiziert.

## **4. Versuchseinrichtung und Messverfahren**

### **4.1 Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT)**

In diesem Kapitel wird im ersten Teil der Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT) vorgestellt, der innerhalb dieser Arbeit entwickelt und aufgebaut wurde (siehe auch [Gri 10], [Got 11], [Bür 11], [Bür 12], [Koc 13], [Wei 13]). Hierbei wurde zum Teil auf institutsinterne Vorarbeiten zurückgegriffen (siehe [Hip 07], [Ant 09], [Zal 09]).

Zur Reduzierung des Komplexitätsgrades des Gesamtsystems „Reibung“ wurde diese Prüfumgebung so konzipiert, dass reproduzierbare Untersuchungen zum Reibverhalten im kleineren Maßstab (mit Gummirädern oder Gummigleitkörpern) durchgeführt werden können. Durch die horizontale Anordnung der Fahrbahnprobe sowie die vorhandene Bewässerungsvorrichtung sind auch Messungen auf nassen Fahrbahnoberflächen unter Laborbedingungen möglich. Weiterhin wurde darauf geachtet, dass diese Prüfumgebung nicht ausschließlich für die Untersuchungen innerhalb dieser Arbeit, sondern auch für weitere grundlegende Untersuchungen zum Themengebiet „Reibung“ und auch zu Themenstellungen bezüglich „Abrieb“ einsetzbar ist.

Im thematisch zweiten Teil dieses Kapitels werden Untersuchungen zur Übertragbarkeit der Messergebnisse vom GAT auf Reifenmessungen vorgestellt.

### 4.1.1 Konstruktiver Aufbau

In diesem Kapitel wird der konstruktive Aufbau des Griffigkeits- und Abriebprüfstandes (GAT) vorgestellt. Die Funktionsweise bzw. der Ablauf einer Untersuchung variiert je nach Untersuchungsziel und wird daher im Kapitel „Versuchsdurchführung und Auswertung“ (siehe Kapitel 4.1.3) bezogen auf die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen vorgestellt.

Zunächst wird der Gesamtaufbau (Abbildung 22) und im Anschluss daran das Innere des Prüfstandes, die „Prüfkapsel“, vorgestellt (Abbildung 23).



**Abbildung 22:** Gesamtaufbau bzw. Außenansicht des Griffigkeits- und Abriebprüfstands (GAT)

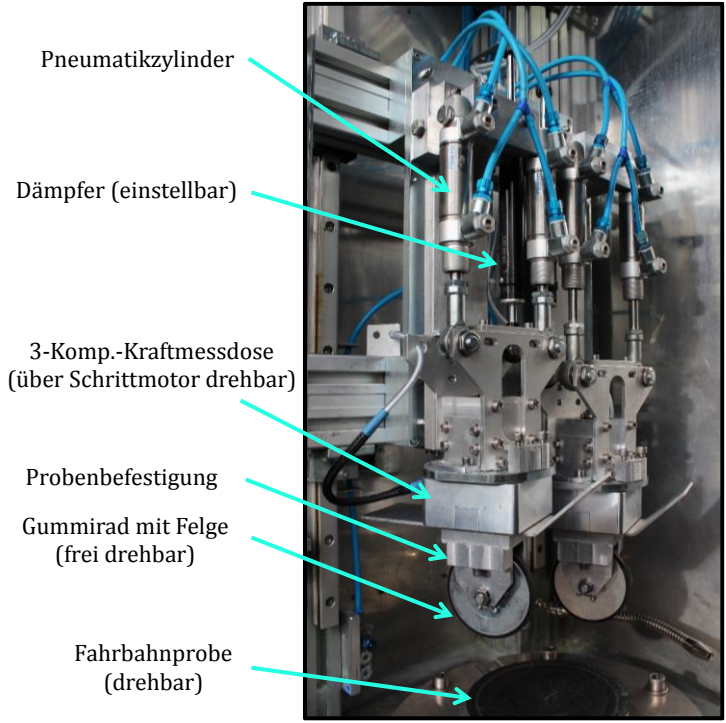
In der linken Abbildung ist an der linken Seite der Steuerbereich der Prüfstands pneumatik erkennbar. An dieser Stelle werden die gewünschten Anpresskräfte sowie die Position (abgehoben & abgesetzt) der Gummiprobe eingestellt bzw. ausgewählt. Auf der rechten Seite der rechten Abbildung ist der Bewässerungsteil des Prüfstandes erkennbar. In diesem Bereich kann der Volumenstrom des in den Kontakt eingeleiteten flüssigen Zwischenmediums eingestellt und gemessen sowie dessen Temperatur erfasst werden. Auf der Rückseite des Prüfstandes (hier nicht abgebildet) befinden sich die Verteilerkästen für die Stromversorgung, die Sicherheitstechnik und die Messtechnik.

In Abbildung 23 ist die Prüfstandskapsel des GAT abgebildet. Das Innere dieser Kapsel kann grob in die drei unterschiedlichen Bereiche: Fahrbahnseite, Gummiprobenseite und den Umgebungsteil unterteilt werden, die im Folgenden jeweils erläutert werden.

Die Fahrbahnseite wird hier durch die „drehbare Fahrbahnprobe“ abgebildet und befindet sich im unteren Teil der Prüfstandskapsel. Zur Durchführung von Reibuntersuchungen kann die Fahrbahnprobe über einen Drehstrommotor in Rotation versetzt werden. Über die Drehzahl und die Kontaktstelle zwischen Gummi- und Fahrbahnprobe (siehe Abrolldurchmesser in Abbildung 26) ergibt sich die Untersuchungsgeschwindigkeit. An dieser Stelle ist es möglich, unterschiedliche Fahrbahnproben zu montieren und damit den Einfluss der Fahrbahn (Fahrbahnmaterial und Fahrbahntextur) auf die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn untersuchen zu können. In der vorliegenden Ausbaustufe können Fahrbahnproben über eine Schraub- oder Klemmvorrichtung montiert werden.

Über die Schraubvorrichtung können künstlich erzeugte Fahrbahnproben montiert werden. Hierbei kann es sich zum einen beispielsweise um glatte Metalloberflächen handeln, in die eine spezielle Oberflächenstruktur eingearbeitet bzw. auf die der gewünschte Reibbelag aufgeklebt wurde. Weiterhin können

Fahrbahnproben verwendet und untersucht werden, deren Herstellung in [Bür 11] und [Bür 12] vorgestellt wird. Die Verwendung dieser Oberflächen für Reibungsuntersuchungen kann in [Got 11], [Bür 11], [Bür 12] und [Wei 13] nachvollzogen werden.

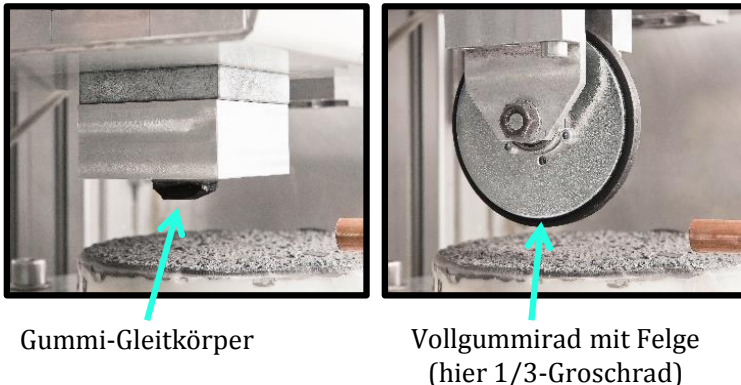


**Abbildung 23:** Prüfstandskapsel des GAT

Mit der Klemmvorrichtung ist es beispielsweise möglich, zylindrische Fahrbahnstücke (Außendurchmesser bis 160 mm, Höhe < 60 mm) aus realen Fahrbahnoberflächen (Obere Schichten von Kontrollbohrkernen aus Fahrbahndecken) im Prüfstand zu befestigen (vgl. [Bür 12]).

Die in dieser Arbeit durchgeführten und vorgestellten Untersuchungen wurden ausschließlich auf einer ebenen Metalloberfläche durchgeführt, auf die ein künstlicher Reibbelag (3M-SafetyWalk, Körnung 80) aufgeklebt wurde.

Die Gummiprobenseite beschreibt den oberen Bereich des Prüfstandsinneren (oberhalb der Gummi-Fahrbahn-Kontaktstelle). Dieser Teil umfasst die Gummiprobe (Gummirädchen oder Gummigleitkörper, siehe Abbildung 24), deren vertikale Führung (nach Wunsch auch gedämpft), die Aufbringung der Anpresskraft über den Pneumatikzylinder sowie die Sensorik zur Erfassung der auftretenden Kräfte (3-Komponenten-Kraftmessdose).

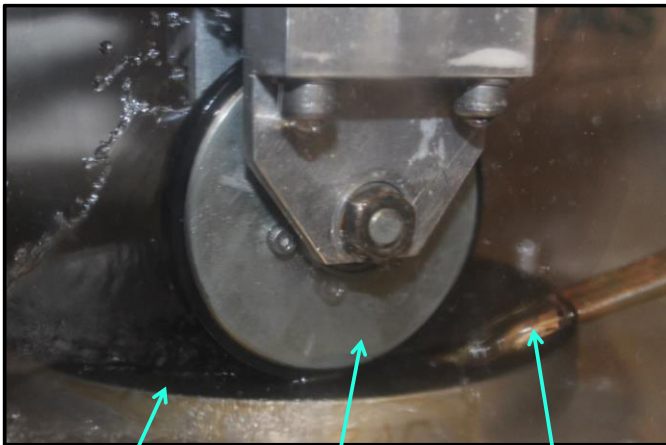


**Abbildung 24:** Gummiprüfstände für Untersuchungen am GAT

Weiterhin befindet sich in diesem Bereich ein Schrittmotor mit Inkrementalgeber (in Abbildung 23 zur Übersichtlichkeit demontiert), über welchen die Gummiprobe definiert um die Hochachse gedreht werden kann. Der sich ergebende Drehwinkel kann hier direkt als Schräglaufwinkel aufgefasst werden (vgl. [Gna 15b]) und wird während den Untersuchungen messtechnisch erfasst.

Als Gummiprüfstände werden in dieser Arbeit Grosch-Räder verwendet (vgl. Gummiprüfstände beim LAT100 [Gro 96], [Hei 07]) deren Dimension

jedoch modifiziert wurde (Außendurchmesser = 70 mm, Breite = 6 mm). Die Veränderung der geometrischen Breite wurde vorgenommen, da die Fahrbahnproben einen im Verhältnis zu Rädchenbreite relativ kleinen Durchmesser aufweisen. Durch die Reduzierung der Rädchenbreite ergeben sich unter anderem quer zur Kontaktfläche geringere Unterschiede im Längsschlupf (vgl. Kapitel 4.1.3.2).



Fahrbahnprobe  
(3M-SafetyWalk)

Vollgummirad mit Felge  
(1/3-Groschrad)

Wasseraufbringung  
(4 l/min)

**Abbildung 25:** Fahrbahnprobenbewässerung am GAT

Der Umgebungsteil beschreibt den Teil des Prüfstandsinneren, der die vorliegenden Umgebungsbedingungen bei der Versuchsdurchführung direkt beeinflusst bzw. vorgibt. Hier stehen in erster Linie die Temperaturbedingungen und die Förderung flüssiger Zwischenmedien im Vordergrund. In der hier vorgestellten Ausbaustufe des GAT ist es derzeit nicht möglich, die Temperatur der umgebenden Luft zu konditionieren. Die Beeinflussung der Umgebungsbedingungen beschränkt sich auf die Temperierung sowie die Steuerung und



Überwachung des Volumenstroms des eingeleiteten flüssigen Zwischenmediums. Dies stellt jedoch innerhalb dieser Arbeit keine Einschränkung dar, da alle Untersuchungen auf nasser Fahrbahn durchgeführt wurden. Es ist nicht zu erwarten, dass die Temperatur der umgebenden Luft die Ergebnisse signifikant beeinflussen wird. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass durch das vorhandene flüssige Zwischenmedium die Temperaturänderungen der Gummiprobe und der Fahrbahn während der Reibungsuntersuchungen vernachlässigt werden können. In Abbildung 25 ist ein Vollgummirad und eine Fahrbahnprobe während einer Versuchsdurchführung im nassen Zustand abgebildet (Volumenstrom 4 l/min).

### 4.1.2 Datenerfassung / Spezifikationen

In Tabelle 2 sind die technischen Spezifikationen des GAT sowie der verbauten Sensorik angeführt.

**Tabelle 2:** Technische Spezifikationen des GAT

Messgröße / Einstellgröße	Messbereich / Einstellbereich	Messgenauigkeit
Kraft in x-, y- und z-Richtung	- 200 N bis + 200 N	Linearität: $\pm 0,5\%$ Übersprechen: $\leq 1\%$
Fahrbahnprobendrehzahl	$\pm 1500$ U/min ( $\triangleq$ ca. $\pm 35$ km/h)	$\pm 1\%$
Fahrbahnprobendrehwinkel (Drehstrommotor)	0 .. 360 °	
Lenkwinkel der Gummiprobe (Schrittmotor)	- 38 .. + 38 °	$\pm 0,18^\circ$ (2000 Inkremente / Umdrehung)
Einfederung der Gummiprobe (Laser-Distanzsensor)	30 .. 50 mm	0,01 mm Auflösung $\pm 0,03$ mm Linearität
Dämpfungsfaktor gegen Einfederung (in der Hochachse)	stufenweise	
Wasservolumenstrom (Ultraschalldurchflussmesser)	0,08 .. 20 l/min	$\pm (0,7\%$ des momentanen Messwertes + $0,7\%$ des Endwertes)
Wassertemperatur (Pt100 "IEC751 Klasse B")	6 bis 60 °C	$\pm 0,3^\circ\text{C}$ + 0,005 * momentaner Messwert
Fahrbahnprobentemperatur (Hochleistungs-pyrometer)	0 .. 100 °C	$\pm 1\%$

Abtastfrequenzen bis 10 kHz sind möglich

Zur Steuerung des Prüfstandes sowie zur Erfassung der Sensorsignale wird ein NI-PXI-System eingesetzt. Die notwendige Softwareumgebung

wurde in NI-LabVIEW umgesetzt. In der derzeitigen Konfiguration können die Signale wahlweise mit Abtastfrequenzen von bis zu 10 kHz erfasst und aufgezeichnet werden.

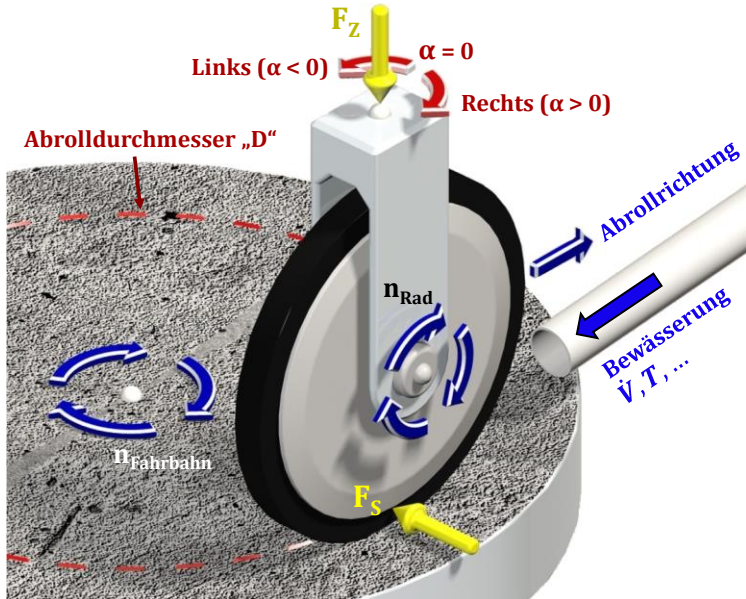
### **4.1.3 Versuchsdurchführung / -auswertung**

In diesem Kapitel wird zum einen die Versuchsprozedur für die am GAT durchgeführten Untersuchungen vorgestellt und Hinweise zur Auswertung der Einzeluntersuchungen gegeben. Zum anderen werden Untersuchungen vorgestellt, die zum Einfahrverhalten der verwendeten Fahrbahnprobe (SafetyWalk) sowie der verwendeten Gummiräder (Vollgummiräder) durchgeführt wurden.

#### **4.1.3.1 Versuchsprozedur/ -ablauf**

In diesem Kapitel wird die Versuchsprozedur vorgestellt, die in dieser Arbeit zur Charakterisierung der maximalen Reibung zwischen Reifen und nasser Fahrbahn herangezogen wurde. Hierzu wurden Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennlinien am GAT aufgezeichnet, wobei die Prüfanordnung wie in Abbildung 26 veranschaulicht konfiguriert war.

Die Fahrbahnprobe (hier ebene Metalloberfläche mit aufgeklebtem 3M-SafetyWalk) wird über einen Drehstrommotor auf die Soll-Drehzahl  $n_{\text{Fahrbahn}}$  beschleunigt, so dass sich auf der Fahrbahn am Abrolldurchmesser  $D$  die gewünschte tangentielle Prüfgeschwindigkeit ergibt. Der Abrolldurchmesser liegt hierbei in der Mitte der Kontaktfläche zwischen der Gummiprobe und der Fahrbahnprobenoberfläche (im quasistatischen Zustand). Die Gummiprobe ist hier als freirollendes Vollgummirad ausgeführt und wird von oben mit definierter Anpresskraft  $F_z$  gegen die Fahrbahnoberfläche gepresst. Die Drehzahl des Rades ergibt sich aus dem Abrolldurchmesser  $D$  und dem Außendurchmesser des Vollgummirades.



**Abbildung 26:** Prinzipielle Versuchsanordnung am GAT

Über einen Schrittmotor (hier nicht abgebildet) kann der Schräglaufwinkel  $\alpha$  von  $+38^\circ$  bis  $-38^\circ$  variiert werden, wobei sich bei einer Lenkbewegung nach rechts positive Werte und bei einer Lenkbewegung nach links negative Werte des Schräglaufwinkels ergeben (vgl. TYDEX-W-Achsen-Koordinatensystem [Unr 97], [Van 97]). Die im Kontakt auftretenden Kräfte (alle drei Koordinatenrichtungen) werden über eine 3-Komponenten-Kraftmessdose erfasst.

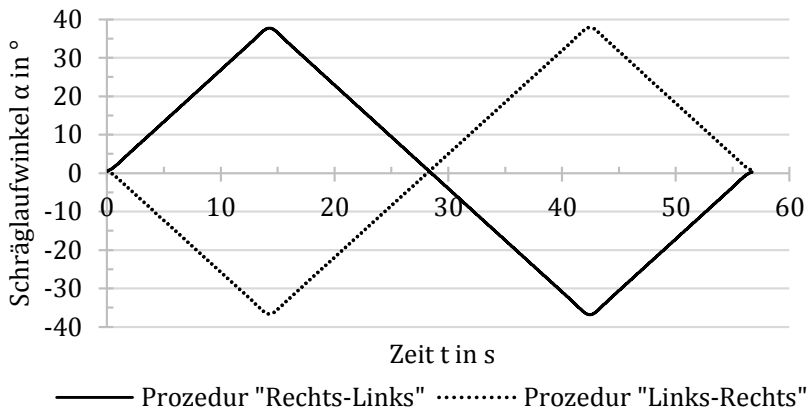
Im rechten Teil der Abbildung ist eine Vorrichtung zur Bewässerung abgebildet, mit der flüssige Zwischenmedien definiert in den Kontakt eingeleitet werden können. Der Volumenstrom und die Temperatur der flüssigen Zwischenmedien werden hierbei eingestellt und kontinuierlich messtechnisch erfasst.

Bei den Untersuchungen in dieser Arbeit wurde eine Versuchsprozedur durchgeführt, die sich vereinfacht am einfachen Spurwechsel mit dem PKW orientiert (vgl. [Gna 15c]) und in die folgenden Schritte unterteilt werden kann:

1. Einbau der gewünschten Fahrbahn- und Gummiprobe (Gummirad: Aussendurchmesser = 70 mm, Breite = 6 mm; Felgenscheibe: Aussendurchmesser = 67 mm)
2. Einstellung der Untersuchungsparameter wie Volumenstrom und Temperatur des Zwischenmediums, der Fahrbahnprobendrehzahl  $n_{\text{Fahrbahn}}$  (entspricht der Fahrgeschwindigkeit) und der Anpresskraft  $F_z$
3. Geradeausfahrt ( $\alpha = 0^\circ$ ) für ca. 10 Minuten, um die Temperatur der Gummiprobe und der Fahrbahnoberfläche auf die Temperatur des Zwischenmediums zu konditionieren.
4. Überprüfung der Untersuchungsparameter und Aktivierung der Datenaufzeichnung
5. Starten der vollautomatischen kontinuierlichen Schräglaufwinkelabfolge von  $0^\circ$  bis auf  $+38^\circ$  (lenken nach rechts) mit einer Verstellgeschwindigkeit von ca.  $2,5^\circ/\text{s}$ . Bei Erreichen des Maximalwinkels wird der Schräglaufwinkel unmittelbar kontinuierlich von  $+38^\circ$  über  $0^\circ$  auf  $-38^\circ$  und danach wieder zurück auf  $0^\circ$  verstellt. Die vorgestellte Winkelabfolge wird im Folgenden als „Rechts-Links“-Prozedur, die spiegelsymmetrisch umgekehrte Abfolge bezüglich des Schräglaufwinkels als „Links-Rechts“-Prozedur bezeichnet (siehe Abbildung 27).
6. Ende der Messprozedur und der Datenaufzeichnung

Die Auswertung der Messdaten jedes Einzelversuches erfolgte vollautomatisch über eine in dieser Arbeit entwickelte und umgesetzte Auswerteroutine in NI-DIADDEM. Hierbei wurden zunächst alle aufgezeichneten Kanäle mit dem gleichen digitalen Filter gefiltert (Filterart: Tiefpassfilter, Grenzfrequenz: 0,5 Hz, Filtertyp: Butterworth,

Filtergrad: 4). Bei dem gewählten Filter in der verwendeten Konfiguration zeigte sich, dass die auf den Rohdaten überlagerten hochfrequenten Störungen entfernt werden konnten, ohne gleichzeitig den Mittelwert der Kurvenverläufe zu verfälschen. Da alle erfassten Kanäle mit denselben Filterparametern konditioniert wurden, ist eine filterbedingte Phasenverschiebung zwischen den Kanälen ausgeschlossen.

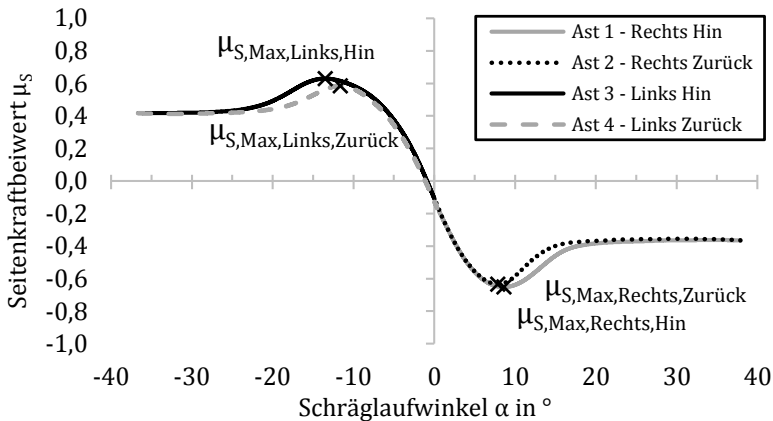


**Abbildung 27:** Winkelabfolge der beiden am GAT angewandten Untersuchungsprozeduren „Rechts-Links“ & „Links-Rechts“

In Abbildung 28 ist exemplarisch der Verlauf des Seitenkraftbeiwertes  $\mu_s$  über dem Schräglaufwinkel  $\alpha$  („Rechts-Links“-Prozedur) aus Untersuchungen am GAT abgebildet. Der Seitenkraftbeiwert  $\mu_s$  entspricht hierbei dem Reibwert des Gummirades normal zur Radhauptebene und ergibt sich aus dem Quotienten der Seitenkraft  $F_S$  und der Anpresskraft  $F_Z$  bei vorliegendem Schräglaufwinkel  $\alpha$  (Bestimmung über (7)).

$$\mu_s(\alpha) = \frac{F_S(\alpha)}{F_Z(\alpha)} \quad (7)$$

Der Kurvenverlauf lässt sich, wie in der Abbildung 28 erkennbar, in vier Bereiche (Ast 1 bis Ast 4) aufteilen. Die Äste 1 und 3 stehen hierbei jeweils für das Einlenken von der Nulllage ( $\alpha = 0^\circ$ ) heraus zum Maximalwert des Schräglaufwinkels (positiv & negativ), die Äste 2 und 4 jeweils für die Lenkbewegung zurück zur Nulllage.



**Abbildung 28:** Exemplarischer Verlauf einer  $\mu_S$ - $\alpha$ -Kennlinie am GAT

In den Kurvenverläufen der Äste 1 bis 4 wurde jeweils der Punkt des betragsmäßig maximalen Seitenkraftbeiwertes markiert. Beim Vergleich der markierten Punkte fällt auf, dass jeweils der Reibwert der Hin-Äste (Ast 1 und Ast 3) im Vergleich zu den Zurück-Ästen (Ast 2 und Ast 4) minimal einen betragsmäßig höheren Wert aufweist. Dieser Effekt kann auf Erwärmungseffekte des Gummis zurückgeführt werden, da der Hin-Ast jeweils den Gummi erwärmt und damit den Reibwert des Rück-Astes beeinflusst (siehe hierzu auch „Gedächtniseffekt des Gummis“ nach PERSSON [Per 11]).

In dieser Arbeit wird für jede Einzeluntersuchung der arithmetische Mittelwert  $\mu_{S,max,mittel}$ , aus den vier markierten maximalen Reibwerten (vgl. Abbildung 28) berechnet, als Kennwert für den maximalen

Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn (beispielsweise beim einfachen Spurwechsel eines PKW) angesehen und für die weiteren Auswertungen herangezogen.

#### **4.1.3.2 Konditionierung der Gummi- und Fahrbahnprobe**

Aus allgemeinen Untersuchungen zum Thema Gummireibung ist bekannt, dass sowohl der Reifen als auch die Fahrbahnoberfläche ein charakteristisches Einfahrverhalten zeigen. Um reproduzierbare Untersuchungsergebnisse zu erhalten, ist es deshalb eine notwendige Voraussetzung, den Reifen als auch die Fahrbahnoberfläche vor den eigentlichen Parameterstudien einzufahren bzw. zu konditionieren. Durch die Erfassung der Sensorsignale während der Einfahrprozedur ist es möglich, einen überlagerten Einfluss des Einfahreffektes zu quantifizieren und damit rechnerisch bei der Auswertung der Untersuchungsergebnisse korrigieren zu können.

Im Folgenden werden Untersuchungen zum Einfahrverhalten von Vollgummirädern sowie einer Fahrbahnoberfläche am GAT vorgestellt.

Auf der Fahrbahnprobenseite wurde für die Untersuchungen zum Einfahrverhalten eine SafetyWalk-Oberfläche verwendet, da diese auch bei den späteren Parameterstudien die Fahrbahnseite darstellt. Diese Oberfläche weist im neuen Zustand allerdings eine sehr große Schärfe (stark ausgeprägte Mikrotexur) und damit einen im Vergleich zu realen Fahrbahnoberflächen unrealistisch hohen Reibwert auf. Weiterhin verursacht diese sehr scharfe Oberflächenstruktur bei Reibuntersuchungen sehr großen Gummiverschleiß an den Vollgummirädern (Vernachlässigung des Kohäsionsanteils vermutlich nicht möglich, siehe Kapitel 2.1.3.3). Aus diesem Grund wurde deren Oberflächenstruktur vor Versuchsbeginn gleichmäßig manuell mittels leichtem Abschleifen entschärft (bzw. abgestumpft), was sich gleichermaßen bei bisherigen Untersuchungen am Innentrommelprüfstand bewährt hat.

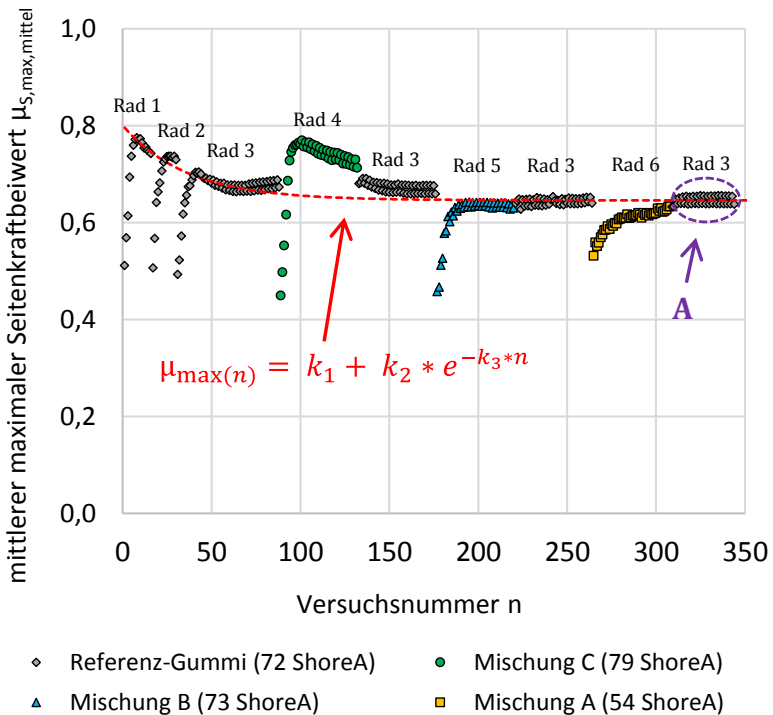
Auf der Gummiprobenseite wurden unterschiedliche profillose Vollgummiräder verwendet, die von der Continental Reifen Deutschland GmbH zu Forschungszwecken zur Verfügung gestellt wurden. Die Gummiprüben weisen unterschiedliche Zusammensetzungen auf und wurden innerhalb dieser Arbeit über ihren Härtewert nach Shore A charakterisiert. Die Räder 1, 2 und 3 (siehe Abbildung 29) bestehen alle aus derselben Referenzgummimischung und weisen die Shorehärte 72 auf. An dieser Stelle wurden drei unterschiedliche Räder aus derselben Mischung verwendet, um die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse innerhalb einer Mischung jedoch mit unterschiedlichen Gummirädern bewerten zu können. Die Räder 4, 5 und 6 bestehen aus anderen Zusammensetzungen und weisen Härtewerte von 79, 73 und 54 auf.

Die Umgebungs- bzw. Betriebsbedingungen wurden bei den durchgeführten Untersuchungen konstant gehalten, um ausschließlich den Einfluss auftretender Einfahreffekte (Fahrbahn und Rädchen) zu beleuchten. Die Untersuchungen wurden bei einer Prüfgeschwindigkeit von 15 km/h und einer Anpresskraft von 20 N (entspricht einer mittleren Flächenpressung von ca. 0,5 N/mm<sup>2</sup>) auf nasser Fahrbahn durchgeführt. Als Zwischenmedium wurde reines Leitungswasser mit einem Volumenstrom von 4 l/min und einer Temperatur von 20 °C vor dem Kontakt auf die Fahrbahnoberfläche aufgebracht. Über die Wasserfilmhöhe (in „mm“) kann innerhalb dieser Arbeit leider keine exakte Aussage getroffen werden, da kein Weg gefunden werden konnte, diese reproduzierbar messtechnisch zu erfassen. Da der Volumenstrom und die Viskosität des Zwischenmediums jedoch konstant gehalten wurden, wird davon ausgegangen, dass über alle Versuche hinweg eine gleichmäßige Wasserfilmdicke vorlag und daher dieser Einfluss bei den hier durchgeführten Untersuchungen am GAT vernachlässigt werden kann. Durch den gewählten Volumenstrom des flüssigen Zwischenmediums, der unmittelbar vor der Kontaktstelle auf die Fahrbahnoberfläche aufgebracht wurde, ist sichergestellt, dass reproduzierbar die sichere Benetzung der Fahrbahnoberfläche mit



Wasser gewährleistet ist (siehe hierzu Abbildung 25). Die Untersuchungsergebnisse sind damit untereinander vergleichbar.

In Abbildung 29 sind die Untersuchungsergebnisse zum Einfahrverhalten der Fahrbahnoberfläche sowie der Gummiräder abgebildet. Die Untersuchungen wurden nach der zuvor beschriebenen Versuchsprozedur durchgeführt (vgl. Kapitel 4.1.3.1), wobei die Winkelabfolge zwischen den Einzelmessungen so gewählt wurde, dass auf eine Messung mit der „Rechts-Links“-Prozedur, immer eine Messung mit der „Links-Rechts“-Prozedur (usw.) folgte.



**Abbildung 29:** Einlaufverhalten am GAT von Gummirädchen (unterschiedlicher Zusammensetzungen) und der Fahrbahnoberfläche (entschärfter SafetyWalk)

Damit ergibt sich bezüglich der Winkelabfolge ein symmetrischer Versuchsablauf, was systematische Fehler, die hierauf zurückzuführen sind, erkennen lässt. Die Einzelmessungen wurden wie bereits vorgestellt vollautomatisch ausgewertet. Jeder Messpunkt in Abbildung 29 steht dementsprechend für den Mittelwert  $\mu_{S,max,mittel}$  der vier Maximalwerte innerhalb (siehe Abbildung 28) des jeweils zugehörigen Einzelversuches.

Die ersten Reibuntersuchungen wurden mit dem Rad 1 (im Neuzustand) auf der vorbereiteten Fahrbahnoberfläche (im Neuzustand, jedoch entschärft) durchgeführt.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass der mittlere maximale Seitenkraftbeiwert zu Beginn, von Untersuchung zu Untersuchung, stark ansteigt. Dieser Effekt kann unter anderem darauf zurückgeführt werden, dass die obersten Schichten des Gummis, die noch durch den Herstellungsprozess (Bsp. Trennmittel) kontaminiert sein können, abgetragen werden. Weiterhin unterliegt der Gummi während der ersten Untersuchungen einem Einwalkprozess, was den Reibwert ebenfalls beeinflussen kann. Dieses charakteristische Ansteigen des Reibwertes lässt sich bei allen Gummirädchen im Neuzustand beobachten, wenn auch in unterschiedlicher Ausprägung. Wird ein Rad, das bereits eingefahren wurde, für weitere Untersuchungen verwendet, zeigt sich dieses charakteristische Verhalten nicht erneut (siehe wiederholte Verwendung des Rades 3 in Abbildung 29). Stattdessen befindet sich dieses Rad bereits nach wenigen Untersuchungen (zur Erwärmung des Gummis auf Betriebstemperatur) auf dem erwarteten Reibniveau und strebt asymptotisch gegen einen Grenzwert.

Der globale Abfall des Reibwertes (siehe Abbildung 29, rot gestrichelte Linie) kann auf Einfahreffekte der Fahrbahnoberfläche zurückgeführt werden. Dieser Effekt lässt sich vor allem auf nassen Fahrbahnoberflächen beobachten. Hierbei wird die Oberflächenstruktur (Anteile der Mikrotexur) poliert und dadurch der maximale Reibwert vermindert (vgl. hierzu auch [Tor 14], [Rie 15]). Das Reibwertpotenzial

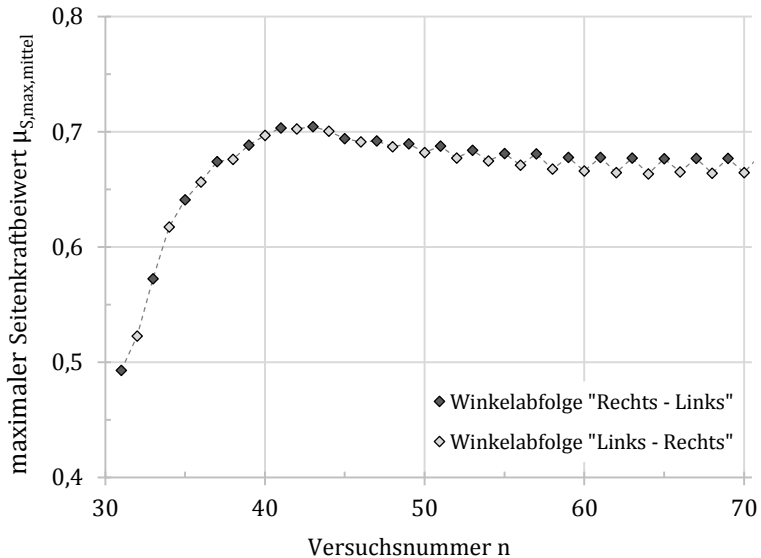
der Fahrbahnoberfläche lässt sich in erster Näherung sehr gut mit einer e-Funktion annähern. Nach dieser Einfahrprozedur lag damit eine Fahrbahnoberfläche vor, die ein stabiles Griffigkeitsniveau bei den Folgeuntersuchungen erwarten lässt.

Der in Abbildung 29 als „A“ markierte Bereich wird zur Bewertung der Reproduzierbarkeit (siehe Kapitel 4.1.4) näher betrachtet.

Neben dem Poliereffekt ist es zusätzlich möglich, dass Anteile der Fahrbahntextur durch Gummiabrieb zugesetzt werden, was sich auf den Hysterese-Anteil des Reibbeiwertes auswirken kann (siehe Kapitel 2.1.3.2). Weiterhin könnten sich dünne Schichten des Gummiabriebes auf der Fahrbahnoberfläche anlagern, was die Oberflächenphysik der Fahrbahnoberfläche verändert und damit auch den Adhäsionsanteil des Reibbeiwertes beeinflussen kann (siehe Kapitel 2.1.3.1). Die beiden beschriebenen Effekte lassen im Allgemeinen erwarten, dass jede durchgeführte Untersuchung zum Reibverhalten durch die vorhergehenden Untersuchungen direkt beeinflusst wird. Der Grad und die Richtung der Beeinflussung werden hierbei unter anderem von der Fahrbahnoberfläche (Material und Textur), der verwendeten Gummizusammensetzung (vorherige und aktuelle Zusammensetzung) und den vorliegenden Umgebungs- und Betriebsbedingungen abhängig sein. Die beiden beschriebenen Effekte werden in dieser Arbeit als „Gedächtniseffekt der Fahrbahnoberfläche“ zusammengefasst, im Weiteren jedoch theoretisch nicht näher betrachtet.

In den Untersuchungsergebnissen zum Einfahrverhalten der Vollgummiräder und der Fahrbahnoberfläche auf der Kreisscheibe ist bezüglich der Vollgummiräder, neben dem Anstieg des Reibbeiwertes zu Beginn und dem Streben gegen einen Grenzwert zu höheren Versuchsnummern, ein weiterer Effekte zu erkennen. Hierzu wurde das Einfahrverhalten des Rades 3 (erste Verwendung) in Abbildung 30 vergrößert dargestellt.

Bei der differenzierten Betrachtung der aufgetragenen Messpunkte für die beiden unterschiedlichen Winkelabfolgen zeigt sich, dass der maximale Reibbeiwert mit steigender Versuchsnummer gegen zwei unterschiedliche Grenzwerte strebt, obwohl die einzelnen Winkelabfolgen immer abwechselnd durchfahren wurden.



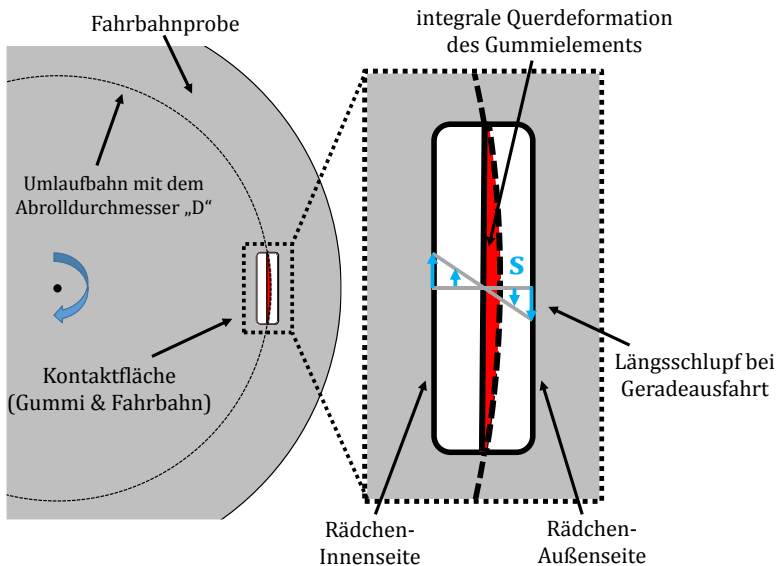
**Abbildung 30:** Vergrößerte Darstellung des Einfahrverhaltens von Rad 3 (bei der ersten Verwendung im Neuzustand in Abbildung 29)

Die Winkelabfolge „Rechts-Links“ führt hierbei zu höheren mittleren maximalen Seitenkraftbeiwerten. Dieses Verhalten deutet darauf hin, dass das Vollgummirad auf der Kreisscheibe ungleichmäßig verschleißt und sich dies auf den mittleren maximalen Reibbeiwert, abhängig von der Winkelabfolge, auswirkt.

Die ungleichmäßige Abnutzung des Gummirades kann vermutlich auf zwei Effekte zurückgeführt werden, die jeweils durch die Rotationsbewegung der Fahrbahnprobe und den relativ kleinen

Abrolldurchmesser auf der Kreisscheibe begründet werden (vgl. hierzu Abbildung 31).

Der erste Effekt wird als „lokaler Querschub bei Geradeausfahrt“ bezeichnet. Die Geradeausfahrt ist in dieser Arbeit in der Art definiert, dass die Hauptebene des Vollgummirades tangential zur Umlaufbahn auf der Fahrbahn orientiert ist. Der Querschub bei Geradeausfahrt tritt auf, da die Gummielemente des Vollgummirades, die in die Kontaktfläche zwischen Gummirad und Fahrbahnprobe eintreten, sich reibungsbedingt nicht entlang der Hauptebene des Gummirades, sondern entlang eines Kreisbogens durch die Kontaktfläche bewegen.



**Abbildung 31:** Lokale Quer-Deformation des Gummielementes während des Durchlaufs durch die Kontaktfläche bei Geradeausfahrt am Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT)

Dadurch werden die Gummielemente quer zur Hauptebene des Vollgummirades ausgelenkt, was eine Querschubspannung im Latsch und dies wiederum eine Seitenkraft verursachen. Die entstandene

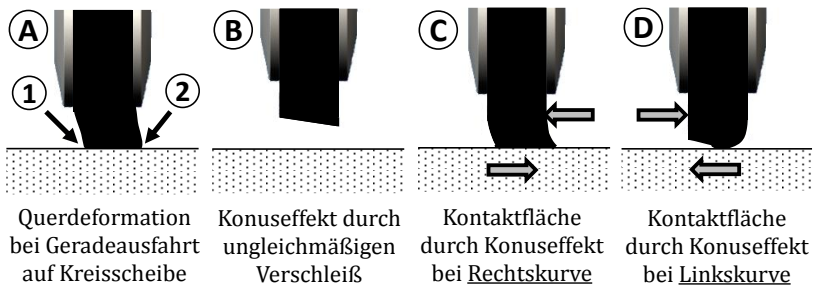
integrale Querdeformation eines Gummielementes ist in Abbildung 31 mit einer roten Fläche veranschaulicht und bewirkt eine Seitenkraft bei Geradeausfahrt ( $\alpha = 0^\circ$ ).

Der zweite auftretende Effekt wird als „lokaler Längsschub bei freirollendem Rad“ bezeichnet. Dieser Effekt kann dadurch erklärt werden, dass die Gummielemente über der Rädchenbreite auf unterschiedlichen Abrolldurchmessern mit der Fahrbahnprobe in Kontakt treten. Die Gummielemente auf der Innenseite des Rädchens rollen daher auf kleineren und auf der Außenseite des Rädchens auf größeren Abrolldurchmessern (bezgl. Fahrbahnprobe) ab. Wird angenommen, dass das Gummielement in der Rädchenmitte, ohne Längsschlupf, frei auf der Fahrbahnoberfläche mit der Tangentialgeschwindigkeit abrollt, die sich aus der Fahrbahnprobendrehzahl und dem Abrolldurchmesser ergibt, dann wirkt die Fahrbahn auf der Rädchenaußenseite bezüglich der Rädchenabrollgeschwindigkeit beschleunigend, während die Fahrbahn auf der Rädcheninnenseite bremsend wirken. Dadurch ergibt sich über der Rädchenbreite eine ungleichmäßige Längsschubverteilung. Der dadurch lokal auftretende Längsschlupf wird in Abbildung 31 mit hellblauen Pfeilen skizziert.

Die beiden beschriebenen Effekte treten gleichzeitig auf und führen auch bei Geradeausfahrt zum Verschleifen des Gummirades.

Der Effekt des „lokalen Längsschlupfes bei freirollendem Rad“ lässt erwarten, dass das Rädchen gleichmäßig auf der Rädcheninnen- und -außenseite stärker verschleißt als in der Rädchenmitte. Dieses Verschleißbild ist bei den verwendeten Vollgummirädchen augenscheinlich erkennbar (abgerundete Rädchenkanten), liefert jedoch keinen Erklärungsansatz für den in Abbildung 30 erkennbaren Effekt der beiden unterschiedlichen Grenzwerte für die unterschiedlichen Winkelabfolgen.

Der Effekt des „lokalen Querschubs bei Geradeausfahrt“ führt dazu, dass am Vollgummirad bereits bei Geradeausfahrt Verschleiß auftritt, der zu einer Konusbildung führt. In Abbildung 32 ist die Entstehung des Konus am Vollgummirad (Teilbilder „A“ und „B“) veranschaulicht. Im Teilbild „A“ rollt das Rädchen ohne Schräglaufwinkel geradeaus ( $\alpha = 0^\circ$ ) und wird aufgrund des „lokalen Querschubs bei Geradeausfahrt“ in Richtung Rädchenaußenseite (hier nach rechts) deformiert. Bei diesem Deformationszustand ist zu erwarten, dass an der Rädcheninnenseite „1“ im Vergleich zur Rädchenaußenseite „2“ eine höhere Flächenpressung und damit auch höherer Verschleiß vorliegt, wodurch sich ein Konus ausbildet. Der Konuseffekt ist bei den verwendeten Vollgummirädern augenscheinlich erkennbar, aber nur sehr schwach ausgeprägt und wurde zur Veranschaulichung in dieser Abbildung in extremer Form dargestellt.



**Abbildung 32:** Entstehung und Einfluss des Konuseffektes auf die Kontaktfläche bei Reibungsuntersuchungen am GAT bei Rechts- und Linkskurve (Ansicht von hinten in Fahrtrichtung)

Bei Untersuchungen mit Vollgummirädern mit der dreifachen Breite (Grosch Rad, Breite 18 mm) zeigt sich dieser Effekt in größerem Ausmaß, was auch ein Grund war, die Rädchenbreite, für die Untersuchungen in dieser Arbeit, zu reduzieren.

Weiterhin veranschaulicht die Abbildung 32 (Teilbilder „C“ und „D“) den Einfluss des Konuseffektes auf den Kontakt zwischen Rädchen und

Fahrbahn und damit auf den maximalen Reibwert bei den unterschiedlichen Lenkrichtungen (rechts, links). Teilbild „C“ zeigt den Fall des Lenkens nach rechts. In diesem Fall ist der Konus in der Art ausgebildet, dass die Kontaktfläche zwischen Gummirad und Fahrbahnoberfläche selbst im Vergleich zum unverschlissenen Rad größere Werte annimmt, was erwarten lässt, dass sich bei gleicher Anpresskraft eine vergleichsweise geringere Flächenpressung ergibt, was zu einem höheren Reibwert führt. Beim Lenken nach links (Teilbild „D“) wird das Gummirad in der Art verformt, dass die Kontaktfläche zwischen dem Vollgummirad und der Fahrbahnoberfläche im Vergleich zum unverschlissenen Rad kleinere Werte annimmt. Damit ist zu erwarten, dass sich bei gleicher Anpresskraft vergleichsweise eine höhere Flächenpressung ergibt, was wiederum zu einem niedrigeren Reibwert führt. Durch den vorgestellten Konuseffekt ergeben sich also höhere Reibbeiwerte beim Lenken nach rechts im Vergleich zum Lenken nach links.

Weiterhin ist aufgrund der unterschiedlichen Ausprägungen der Größe der Kontaktflächen auch zu erwarten, dass die Differenz des Reibbeiwertes zwischen Hin- und Rückast beim Lenken nach rechts weniger stark ausgeprägt sein wird als beim Lenken nach links, da die eingetragene Energie (Reibenergie) bei kleineren Kontaktfläche zu größeren Temperaturerhöhungen und damit unterschiedlicheren Reibwerten führen wird.

Die unterschiedlichen Grenzwerte in Abbildung 30 zwischen den beiden Winkelabfolgen (Rechts-Links & Links-Rechts) können vermutlich auf die unterschiedlichen zeitabhängigen Temperaturbedingungen (aufgrund des zeit- und winkelabhängigen Energieeintrages, vergleiche hierzu auch Flash-Temperatur in [Per 11]) innerhalb einer Untersuchung zurückgeführt werden, die sich aufgrund der unterschiedlichen Winkelabfolgen im Inneren des Gummivolumens ausbilden. Hierbei ist zu beachten, dass das Rädchen zwischen einer „Rechts-Links“- und „Links-Rechts“-Prozedur eine gewisse Zeit geradeaus rollt um wieder einen definierten Temperaturzustand zu



erlangen. Es wird hier daher davon ausgegangen, dass das innere Gummivolumen bei der Winkelabfolge „Rechts-Links“ durch den ersten Lenkeinschlag nach rechts erwärmt und dadurch elastischer wird. Wird im Anschluss daran das Rad nach links gelenkt (Abbildung 32, Fall D), kann sich das wärmere und damit elastischere Gummi (trotz Konuseffekt) geometrisch besser an die Fahrbahnoberfläche anpassen, was zu einer größeren Kontaktfläche, damit niedrigeren Flächenpressung und schließlich höheren Reibbeiwert führt. Wird das Rad während einer „Links-Rechts“ Winkelabfolge zuerst nach links eingeschlagen, fehlt der beschriebene innere Aufwärmprozess, was in einem niedrigeren mittleren Reibwert resultiert.

In [Gna 95] wurden Untersuchungen zur Auswirkung eines Sägezahnprofils an den Profilklotzen eines PKW-Reifens (infolge von Verschleiß) auf die Umfangs- und auch Seitenkraftcharakteristik durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich ein Sägezahnprofil bezüglich des Reibwertes in die eine Belastungsrichtung vorteilhaft und in die entgegengesetzte Richtung nachteilig auswirken kann. Aus diesem Grund empfehlen die Autoren bei Untersuchungen zum Reibverhalten grundsätzlich ein symmetrisches Versuchsprogramm durchzuführen, um die Bildung eines Sägezahnprofils soweit als möglich zu unterbinden.

Der Sägezahneffekt lässt sich auf die hier durchgeführten Untersuchungen übertragen, da der Konuseffekt in Querrichtung wie der beschriebene Sägezahneffekt wirkt. Es ist weiterhin denkbar, dass der Sägezahneffekt durch den Poliereffekt auch fahrbahnseitig auftreten kann.

Die Versuchsanordnung des hier entwickelten Prüfstandes führt daher systematisch zum beschriebenen Verschleiß der Gummirädchen und damit unweigerlich auch zur Bildung des Konuseffektes. Daher sollte bei der Auswertung der Einzeluntersuchungen immer der Mittelwert aus den in Abbildung 28 markierten maximalen Reibwerten für beide Winkelabfolgen zu einem Mittelwert zusammengefasst werden, da sich

der Konuseffekt auf die beiden unterschiedlichen Lenkrichtungen und Winkelabfolgen in entgegengesetzter Richtung auswirkt. Durch die Bildung des Mittelwertes wird der Einfluss des Konuseffektes auf die Untersuchungsergebnisse gemindert.

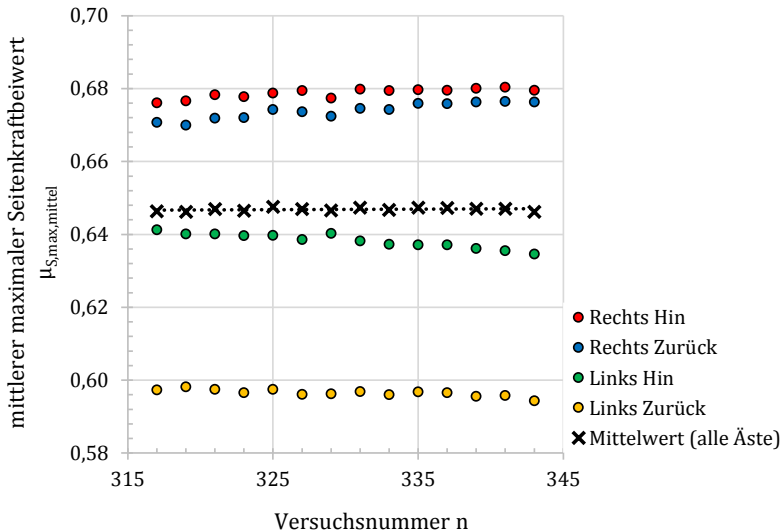
Abschließend führen die Untersuchungen zum Einfahrverhalten von Fahrbahn und Vollgummirad zu der Erkenntnis, dass es für reproduzierbare Untersuchungsergebnisse am GAT unabdingbar ist, die Fahrbahnoberfläche vor den eigentlichen Parameterstudien einzufahren. Alternativ bzw. zusätzlich kann durch Referenzmessungen der Fahrbahnverschleißzustand kontinuierlich erfasst und damit bei der Auswertung berücksichtigt werden (siehe globaler Trend in Abbildung 29). Beim Einfahrverhalten der Vollgummirädchen zeigt sich, dass dieses auch stark von der Gummizusammensetzung abhängig ist. Daher wird empfohlen, dass jedes Rädchen (im Neuzustand) solange eingefahren wird, bis der ermittelte „mittlere maximale Reibwert“ nicht mehr merklich ansteigt.

#### **4.1.4 Reproduzierbarkeit / Erwartete Genauigkeit**

An dieser Stelle werden die in Abbildung 29 (Markierung A) durchgeführten Untersuchungen zum Einfahrverhalten zur Bewertung der Reproduzierbarkeit der Untersuchungsergebnisse am Griffigkeits- und Abriebprüfstand ausgewertet. Diese Messwerte werden zur Bewertung der Reproduzierbarkeit herangezogen, da an dieser Stelle die Fahrbahn sowie auch das Vollgummirad weitestgehend eingefahren sind und Einfahreffekte daher die Bewertung der Reproduzierbarkeit nicht maßgeblich beeinflussen werden.

Um zu verhindern, dass der im Kapitel zuvor beschriebene konusbedingte Einfluss der Winkelabfolge (Rechts-Links & Links-Rechts) die Bewertung der Reproduzierbarkeit der Untersuchungsergebnisse beeinflusst, wurden die aus den beiden aufeinanderfolgenden aber zusammengehörenden Untersuchungen (Rechts-Links & Links-Rechts) ermittelten Kennwerte (siehe

Abbildung 28) zu Mittelwerten (getrennt für die Äste 1 bis 4) zusammengefasst. Die so ermittelten Kennwerte sind betragsmäßig in Abbildung 33 über der Versuchsnummer abgebildet. Zusätzlich ist in dieser Abbildung der gemittelte maximale Reibwert (über die maximalen Seitenkraftbeiwerte aller Äste) über der Versuchsnummer aufgetragen.



**Abbildung 33:** Bewertung der Reproduzierbarkeit der Untersuchungsergebnisse am GAT mit der „Referenz-Gummimischung“ auf der Fahrbahn „SafetyWalk“ (jeweils im eingefahrenen Zustand)

Der Verlauf der Messpunkte „Rechts Zurück“ weist im Vergleich zu „Rechts Hin“ geringere maximale Seitenkraftbeiwerte auf, was, wie im Kapitel zuvor, mit der Erwärmung des Gummivolumens erklärt werden kann. Derselbe Effekt zeigt sich bei der vergleichenden Betrachtung der Messpunkte „Links Zurück“ und „Links Hin“. Der jedoch hier vergleichsweise größere Reibwertabfall zwischen dem Hin- und Rückast kann beim Lenken nach links, wie bereits erwähnt, vermutlich auch auf den Konuseffekt zurückgeführt werden. Da die sich

ausbildende Kontaktfläche beim Lenken nach links kleiner ist (als beim Lenken nach rechts) erhöht sich die Gummitemperatur bei gleich angenommenem Energieeintrag (Reibleistung) stärker, da sich dadurch eine höhere Energieleistungsdichte (Reibleistungsdichte) im Kontakt ergibt, was zur Reduzierung des maximalen Reibbeiwertes führt.

Weiterhin zeigt sich bei den Messpunkten zu größeren Versuchsnummern hin jeweils näherungsweise ein linearer Trend.

Der maximale Seitenkraftbeiwert steigt über der Versuchsnummer für die Lenkrichtung „Rechts“ (beide Äste) leicht an, während dieser bei der Lenkrichtung „Links“ (beide Äste) zu größeren Versuchsnummern leicht abnimmt. Dieser Trend kann ebenfalls wie im Unterkapitel zuvor beschrieben auf den Konuseffekt zurückgeführt werden. Damit zeigt sich, dass der Einfahreffekt (Entstehung des Konuseffektes) des Vollgummirades auch nach einer größeren Anzahl an Einzeluntersuchungen (> 180) nicht abgeschlossen ist. Bei der Betrachtung der Abbildung 33 ist die Skalierung zu beachten, die etwaige Trends verhältnismäßig steil erscheinen lässt.

Im Folgenden wird der Verlauf des Mittelwertes über der Versuchsnummer (siehe Abbildung 33, schwarze Kreuze) näher betrachtet und statistisch ausgewertet. Es zeigt sich, dass sich die Versuchsnummer nicht signifikant auf den Verlauf des Mittelwertes auswirkt (bei linearem Ansatz, „schwarz gepunktete Linie“). Dies kann wie bereits erwähnt darauf zurückgeführt werden, dass sich die Konuswirkung auf den Reibbeiwert der beiden unterschiedlichen Lenkrichtungen betragsmäßig ähnlich stark, jedoch mit umgekehrtem Vorzeichen auswirkt. Die vorgestellte Art der Auswertung (Bildung des Mittelwertes über alle vier Äste) ist daher bezüglich des Konuseffektes als weitestgehend robust anzusehen. Weiterhin ergibt sich bezüglich des Mittelwertes ein arithmetisches Mittel von 0,6468 bei einer mittleren quadratischen Abweichung (RMSE-Wert) von 0,0016. Bezogen auf das arithmetische Mittel ergibt sich damit eine relative mittlere quadratische Abweichung von 0,2399 %.

Bei den weiteren Auswertungen in dieser Arbeit werden die Untersuchungsergebnisse ausgewertet und der Mittelwert aus allen acht einzelnen maximalen Reibwerten (alle vier Äste für beide Winkelabfolgen) bestimmt. Auf eine Betrachtung der einzelnen maximalen Seitenkraftbeiwerte wird im Weiteren verzichtet.

### **4.1.5 Bewertung und Abgrenzung zu bestehenden Verfahren**

Mit der in dieser Arbeit entwickelten und aufgebauten Prüfumgebung können, wie bereits beschrieben, sehr vielfältige Untersuchungen zum Themengebiet „Reibung“ unter Laborbedingungen durchgeführt werden. Hierbei können unterschiedliche Fahrbahnproben und unterschiedliche Gummiprobe (mit frei rollenden Vollgummirädern als auch Gummigleitkörpern) zu Untersuchungszwecken verwendet werden.

Bei der Verwendung von Gummirädern kann der Schräglaufwinkel kontinuierlich vollautomatisch verstellt werden, wodurch es möglich ist, Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennlinien wie beim Reifen-Innentrommelprüfstand (siehe Kapitel 2.4.1) durchzuführen. Durch die Vorrichtung zur automatischen Verstellung des Schräglaufwinkels können die Schräglaufwinkelprozeduren in weiten Bereichen (Verstellrichtung, Maximalwinkel, Verstellgeschwindigkeit, ...) frei definiert werden. Diese Vorrichtung stellt zusätzlich eine Teilautomatisierung des Prüfstandes dar und reduziert damit den Einfluss des Prüfstandsbedieners auf die Messergebnisse.

Durch die horizontale Anordnung der Fahrbahnprobe sollte es weiterhin möglich sein, einen gleichmäßigeren Wasserfilm vor der Kontaktfläche zwischen Gummi- und Fahrbahnprobe aufzubringen, wobei dieser derzeit noch nicht messtechnisch erfasst und exakt spezifiziert werden kann.

Die mit dem GAT mögliche Versuchsanordnung aus drehendem Rad, waagerechter Fahrbahn und damit möglicher Aufbringung eines gleichmäßigen Wasserfilms sowie der kontinuierlichen Verstellung des Schräglaufwinkels steht so bisher mit keiner in der Literatur bekannten Prüfumgebung zur Verfügung.

## **4.2 Untersuchung der Übertragbarkeit der Messergebnisse auf Reifenmessungen**

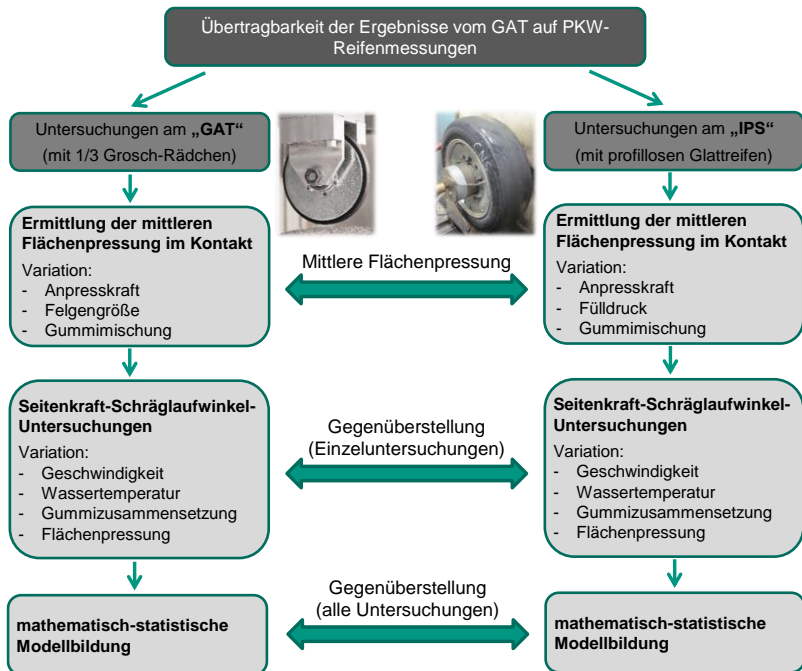
In diesem Kapitel werden Untersuchungen vorgestellt, die zur experimentellen Überprüfung der Übertragbarkeit von GAT-Messergebnissen auf PKW-Reifenmessungen durchgeführt wurden. Durch die vorgestellten Untersuchungen wird der Nachweis erbracht, dass die am GAT ermittelten Erkenntnisse prinzipiell auf PKW-Reifenmessungen übertragen werden können.

### **4.2.1 Untersuchungsmethode**

In diesem Unterkapitel wird die Methode zur Untersuchung der Übertragbarkeit der Ergebnisse vom GAT auf PKW-Reifenmessungen vorgestellt (siehe Abbildung 34).

Die beiden eingesetzten Prüfumgebungen (GAT & IPS) weisen in ihrer Funktionalität gewisse Ähnlichkeiten auf, die es jeweils gestatten, Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennlinien ermitteln zu können. Am Innentrommelprüfstand können Untersuchungen mit luftgefüllten PKW-Reifen, am Griffigkeits- und Abriebprüfstand mit kleinen Vollgummirädern durchgeführt werden.

Zur Untersuchung der Übertragbarkeit werden am IPS profillose Glattreifen (Dimension 205/55 R16) und am GAT Vollgummiräder (1/3-Grosch-Rädchen), die unterschiedliche Gummizusammensetzungen aufweisen, verwendet.



**Abbildung 34:** Methode zur Untersuchung der Übertragbarkeit der Messergebnisse vom GAT auf PKW-Reifenmessungen

Durch die unterschiedliche Größe der beiden zu untersuchenden Räder (PKW-Reifen & 1/3 Grosch Rad) ist es leicht nachvollziehbar, dass nicht exakt dieselben Untersuchungsparameter an beiden Prüfständen verwendet werden können, um vergleichbare Ergebnisse erwarten zu können. Während der Einfluss der Prüfgeschwindigkeit, der Temperatur des Zwischenmediums und auch der Zusammensetzung des Gummis an beiden Prüfständen gleichermaßen untersucht werden können, ist dies bei der Anpresskraft nicht direkt möglich. Bei PKW-Reifen treten in der praktischen Anwendung statische Radlasten von ca. 4.000 N (Annahme: Fahrzeugmasse 1.600 kg) auf, die zu einer mittleren Flächenpressung von ca.  $0,26 \text{ N/mm}^2$  führen (profilloser Glattreifen, Reifenfülldruck 2,4 bar). Da der Reibwert von Elastomeren stark von

der vorhandenen Flächenpressung im Kontakt abhängt, ist es zur Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse notwendig, die Anpresskraft am GAT so zu wählen, dass die auftretenden Flächenpressungen (IPS & GAT) möglichst vergleichbar sind.

Aus diesem Grund wurden vor der Ermittlung der Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennlinien an beiden Prüfständen Voruntersuchungen (statische „Footprint“-Messungen) durchgeführt, um die mittlere Flächenpressung im Kontakt zwischen PKW-Reifen (am IPS) bzw. 1/3-Grosch-Rädchen (am GAT) und der Fahrbahnoberfläche (glatte Metalloberfläche) abhängig von unterschiedlichen Parametern zu ermitteln. Bei den Voruntersuchungen zur Ermittlung der mittleren Flächenpressung wurden am Innentrommelprüfstand die Anpresskraft, der Reifenfülldruck und die Shorehärte (Shore-A) der verwendeten Gummimischungen variiert. Bei den Untersuchungen am GAT wurde die Anpresskraft, die Felgengröße (Metallscheiben, die das seitliche Wegknicken des Vollgummirades bei Kurvenfahrt unterbinden, siehe Abbildung 25) und die Shorehärte (Shore-A) der verwendeten Gummimischungen variiert.

Mit dieser Kenntnis konnte schließlich die Soll-Anpresskraft, die für die Untersuchungen am GAT benötigt wird, bestimmt werden, um eine vergleichbare Flächenpressung zu erreichen und damit die Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse sicherzustellen.

Im Anschluss an die Voruntersuchungen wurden die eigentlichen Untersuchungen (Ermittlung der Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennlinien) zur Untersuchung der Übertragbarkeit an beiden Prüfumgebungen durchgeführt, wobei jeweils der Einfluss der Geschwindigkeit, der Wassertemperatur, der Gummizusammensetzung und der Flächenpressung untersucht wurde. Die Flächenpressung wurde aus den Erkenntnissen der Voruntersuchungen für die jeweilige Parameterkombination ermittelt (siehe Kapitel 4.2.2.1).



Die Bewertung der Übertragbarkeit wird zum einen durch die Gegenüberstellung von Einzeluntersuchungen und zum anderen durch die Gegenüberstellung für die am GAT und am IPS ermittelten mathematisch-statistischen Modelle durchgeführt.

## **4.2.2 Versuchsdurchführung**

Im Folgenden werden die Vorversuche („Footprint“-Messungen zur Ermittlung der mittleren Flächenpressungen am GAT & IPS) und Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Untersuchungen vorgestellt. Aufgrund der großen Untersuchungsumfänge wird das Vorgehen exemplarisch an ausgewählten Einzelergebnissen veranschaulicht.

### **4.2.2.1 Ermittlung der mittleren Flächenpressung**

Die Ermittlung der mittleren Flächenpressung wird an dieser Stelle für Untersuchungen am IPS und GAT exemplarisch vorgestellt. Das Vorgehen an beiden Prüfumgebungen ist direkt vergleichbar, es unterscheiden sich lediglich die zu variierenden Parameter (siehe Abbildung 34) und der Ansatz zur mathematisch-statistischen Modellbildung.

#### **4.2.2.1.1 Ermittlung der mittleren Flächenpressung am IPS**

Zur Ermittlung der mittleren Flächenpressung im Kontakt werden für unterschiedliche Parameterkombinationen die Kontaktflächen zwischen Reifen und Fahrbahn bestimmt. Dies geschieht, indem die Reifenoberfläche mit schwarzer Farbe eingefärbt und von oben gegen eine glatte Metalloberfläche (mit der Krümmung der Fahrbahn im IPS), auf die zuvor ein weißes Blatt Papier gelegt wurde, gepresst wird. Nach dem Abheben des Reifens verbleibt auf dem Papier ein schwarzer Abdruck, der die Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn abbildet. Dieses Vorgehen wurde für unterschiedliche Radlasten, Reifenfülldrücke und Gummihärten durchgeführt (3 Radlasten von 3000 bis 5000 N; 2 Reifenfülldrücke von 2,4 und 3,5 bar; 4 Gummihärten nach Shore-A von 54 bis 79). Der Versuchsplan weist

hierbei ein vollfaktorielles Design auf und damit ergibt sich ein Stichprobenumfang von  $N = 24$ .

Anschließend wurde die Größe der Kontaktfläche rechnergestützt ausgewertet und aus der Größe der Kontaktfläche und der zugehörigen Anpresskraft die sich ergebende mittlere Flächenpressung bestimmt.



**Abbildung 35:** „Footprint“-Messungen am Innentrommelprüfstand für die Referenz-Gummimischung (Shore-A 72) für unterschiedliche Anpresskräfte bei unterschiedlichen Reifenfülldrücken

In Abbildung 35 sind exemplarisch „Footprint“-Flächen für unterschiedliche Anpresskräfte (3000, 4000 und 5000 N) und Reifenfülldrücke (2,4 und 3,5 bar) für die Referenz-Gummimischung bei Umgebungstemperatur (ca. 25 °C) abgebildet. Es zeigt sich, dass mit dem Ansteigen der Anpresskraft sowie mit dem Abfallen des Reifenfülldruckes die Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn erwartungsgemäß größer wird. Eine Erhöhung der Shorehärte äußert sich in einer Reduzierung der Kontaktflächengröße (hier nicht abgebildet).

Im Folgenden werden alle gemessenen Einzelversuche bezüglich der vorliegenden mittleren Flächenpressung in einem mathematisch-statistischen Modell zusammengeführt. Bei der statistischen Auswertung (lineare multiple Regressionsanalyse) zeigt sich, dass sich die Anpresskraft, wie auch zu erwarten, nicht signifikant auf die mittlere Flächenpressung auswirkt. Aus diesem Grund wird dieser Parameter bei der Modellbildung nicht weiter berücksichtigt. Weiterhin zeigt sich, dass sich der Reifenfülldruck näherungsweise linear und die Shorehärte (Shore A) näherungsweise quadratisch auf die mittlere Flächenpressung auswirken. Der gewählte Modellansatz bzw. der mathematische Zusammenhang zwischen den Parametern ( $X_1$  Reifenfülldruck,  $X_2$  Shorehärte,  $X_3 = X_2^2$ ) und der mittleren Flächenpressung  $p_{Latsch,mittel,IPS}$  in  $[N/mm^2]$  ist in (8) angeführt. Die Regressionskoeffizienten  $a_i$  wurden mittels der Methode der kleinsten Fehler-Quadrate geschätzt.

$$p_{Latsch,mittel,IPS} = a_0 + a_1 * X_1 - a_2 * X_2 + a_3 * X_3 \quad (8)$$

Die geschätzten Regressionskoeffizienten sowie die Kenngrößen zur Bewertung der Modellgüte sind in der Tabelle 3 ersichtlich. An dieser Stelle sei erwähnt, dass die einzelnen Regressionskoeffizienten  $X_i$  in dieser Arbeit nicht fest einzelnen physikalischen Parametern zugeordnet sind.

Die Auswertung zeigt, dass sich die berücksichtigten Parameter alle signifikant (Vertrauensbereich von 95 %) auf die mittlere Flächenpressung auswirken. Das Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,9665$  sowie die relativ kleine mittlere quadratische Abweichung  $RMSE = 0,0099$  sprechen für die hohe Güte des ermittelten mathematischen Zusammenhangs. Die hohe Güte des modellierten Zusammenhangs wird ebenfalls durch die Betrachtung der parameterabhängigen Einflussresiduen bestätigt.

**Tabelle 3:** Regressionskoeffizienten und Kenngrößen zur Bewertung der Modellgüte für die Voruntersuchungen am IPS

Einflussparameter / Regressoren	Regressionskoeffizienten	
	Koeffizient	Betrag
<i>Achsenabschnitt</i>	$\mathbf{a}_0$ in $\frac{N}{mm^2}$	+0,5455
$X_1$ ... <i>Reifenfülldruck in bar</i>	$\mathbf{a}_1$ in $\frac{N}{mm^2} * \frac{1}{bar}$	+0,0806
$X_2$ ... <i>Gummihärte in ShA</i>	$\mathbf{a}_2$ in $\frac{N}{mm^2 * ShA}$	+0,0173
$X_3 = X_2^2$ ... <i>Gummihärte in ShA<sup>2</sup></i>	$\mathbf{a}_3$ in $\frac{N}{mm^2 * ShA^2}$	+0,000146
Bewertung der Modellgüte: Mittelwert = 0,3049; $R^2 = 0,9665$ ; RMSE = 0,0099; N = 24		

Für die vorliegenden Reifenfülldrucke sowie die vorliegenden Gummizusammensetzungen ergeben sich mittlere Flächenpressungen, die zwischen  $0,233 \text{ N/mm}^2$  und  $0,375 \text{ N/mm}^2$  liegen.

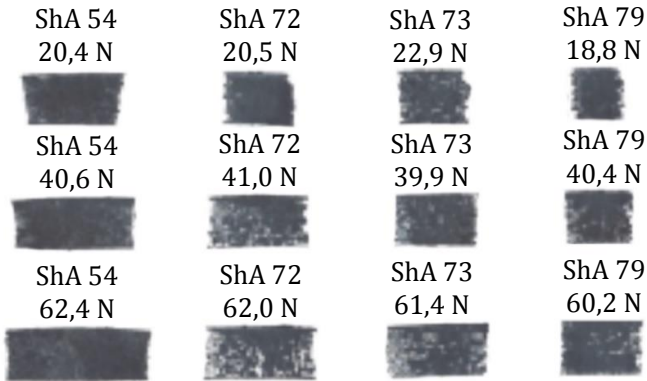
#### 4.2.2.1.2 Ermittlung der mittleren Flächenpressung am GAT

Bei der Ermittlung der mittleren Flächenpressung am GAT wurde der Einfluss der Anpresskraft, der Gummihärte und der Felgenreöße untersucht (Anpresskräfte von 10 bis 70 N, 4 Gummihärten nach Shore-A von 54 bis 79, 3 Felgenreößen mit Aussendurchmessern von 64 bis 68 mm). Durch den hier gewählten Versuchsplan, in welchem jede einzelne Parameterkombination zur Erhöhung der statistischen Aussagekraft mehrfach untersucht wurde, ergibt sich ein Stichprobenumfang von  $N = 442$ . Die Umgebungstemperatur liegt vergleichbar zu den Untersuchungen am IPS bei ca.  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

In Abbildung 36 sind exemplarisch Untersuchungsergebnisse für die Bestimmung der mittleren Flächenpressung am GAT abgebildet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Kontaktflächen zwischen Vollgummirad und Fahrbahn in erster Näherung eine rechteckige Form aufweisen, wobei sich bei den durchgeführten Parameterstudien hauptsächlich die Länge der Kontaktfläche verändert. Die Breite der Kontaktfläche ist

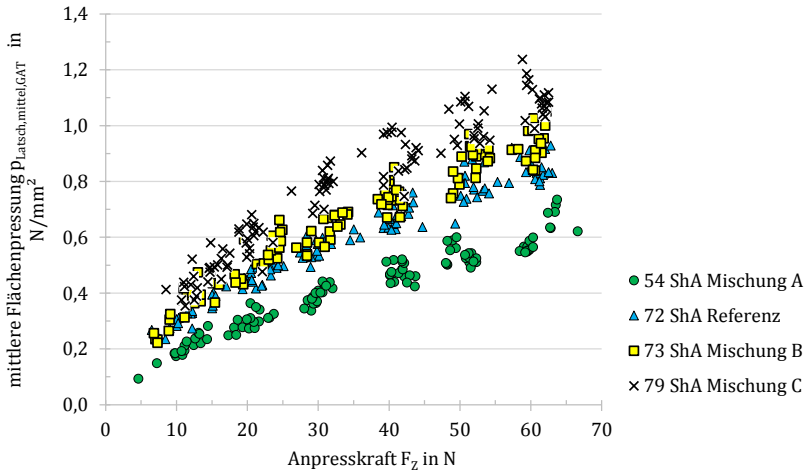
weitestgehend unabhängig von den Parametervariationen und entspricht in der ersten Näherung der Rädchenbreite im unbelasteten Zustand. Dies lässt sich durch die im Vergleich zum Durchmesser des Vollgummirades relativ große Felgenreöße, und damit große Stützwirkung in Querrichtung, erklären.



**Abbildung 36:** „Footprint“-Messungen am Griffigkeits- und Abriebprüfstand für die Felgenreöße „68 mm“ für unterschiedliche Anpresskräfte bei unterschiedlichen Gummihärten (Shore-A)

Durch die Latschlänge (parameterabhängig) und -breite (konstant als 6 mm angenommen) lässt sich die Kontaktfläche und mit der zugehörigen Anpresskraft die sich ergebende mittlere Flächenpressung bestimmen. Die Ergebnisse zeigen, dass die mittlere Flächenpressung mit steigender Anpresskraft degressiv (siehe Abbildung 37) und mit steigender Gummihärte sowie steigender Felgenreöße näherungsweise linear ansteigt (hier nicht abgebildet).

Im Folgenden werden die gemessenen Einzelversuche bezüglich der vorliegenden mittleren Flächenpressung  $p_{Latsch,mittel,GAT}$  in einem mathematisch-statistischen Modell mit physikalischem Ansatz zusammengeführt.



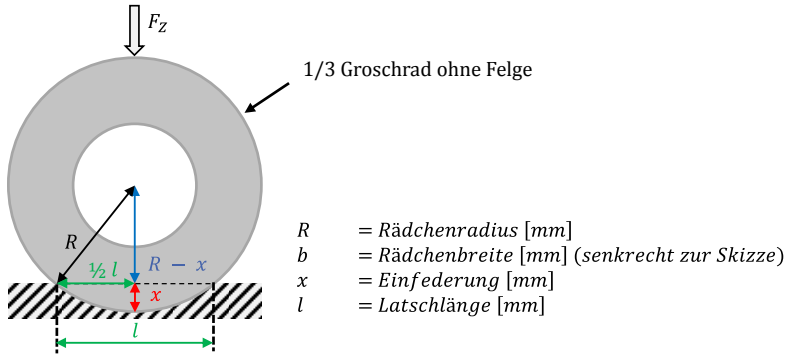
**Abbildung 37:** Einfluss der Anpresskraft auf die mittlere Flächenpressung bei unterschiedlichen Gummihärten am GAT

In Abbildung 38 ist angenähert die Prinzipskizze eines 1/3-Groschrades abgebildet, das gegen eine glatte Oberfläche gepresst wird, während sich dabei bei konstant angenommener Rädchenbreite  $b = 6\text{ mm}$  die Kontaktlänge  $l$  einstellt. Die Variable  $R$  bezeichnet den Radius des unbelasteten Vollgummirades ( $R = 35\text{ mm}$ ) und die Variable  $x$  die Einfederung des Gummielementes in der Mitte der Kontaktfläche (im statischen Zustand).

Die mittlere Flächenpressung in der Kontaktfläche lässt sich über (9) bestimmen, wobei die Kontaktfläche über das Produkt aus der Latschlänge und der Rädchenbreite ermittelt wird.

$$p_{Latsch,mittel,GAT} = \frac{\text{Anpresskraft}}{\text{Kontaktfläche}} = \frac{F_z}{b * l} \quad (9)$$

Über trigonometrische Überlegungen (vgl. Abbildung 38) kann die Latschlänge  $l$  in (9) durch den Rädchenradius  $R$  und die Einfederung  $x$  ausgedrückt werden ( $l = 2\sqrt{2Rx - x^2}$ ).



**Abbildung 38:** Prinzipskizze eines 1/3-Groschrades, das gegen eine Oberfläche gepresst wird und die Latschlänge  $l$  ausbildet

Durch die Annahme, dass die Einfederung  $x$  durch den Quotienten der Anpresskraft  $F_Z$  und der Steifigkeit  $c$  ( $x = \frac{F_Z}{c}$ ) des Vollgummirades in vertikaler Richtung beschrieben werden kann, ergibt sich die mittlere Flächenpressung in der Kontaktfläche zu (10).

$$p_{Latsch,mittel,GAT} = \frac{F_Z}{b * 2 \sqrt{2R \frac{F_Z}{c} - \left(\frac{F_Z}{c}\right)^2}} \quad (10)$$

Im Weiteren wird angenommen, dass die Steifigkeit  $c$  in (10) durch die Regressionsfunktion (11) beschrieben werden kann, worin sich die Gummihärte  $X_1$  (Annahme: quadratisch) sowie die Felgengröße  $X_3$  (Annahme: linear) auswirken. Die getroffenen Annahmen (linearer sowie quadratischer Verlauf), basieren hierbei auf der Betrachtung der ausgewerteten Messdaten.

$$c = a_1 * X_1 + a_2 * X_1^2 + a_3 * X_3 \quad (11)$$

Durch das Einsetzen von (11) in (10) werden durch die Methode der kleinsten Fehler-Quadrate schließlich die Regressionskoeffizienten  $a_i$  ermittelt (nichtlineare Regressionsanalyse). Die geschätzten Regressionskoeffizienten sowie die Kenngrößen zur Bewertung der Modellgüte sind in der Tabelle 4 ersichtlich. Es ist hier zu beachten, dass der modellierte Zusammenhang nur innerhalb der Grenzen gültig ist, die die zugrunde liegende Datenbasis abdeckt.

**Tabelle 4:** Regressionskoeffizienten und Kenngrößen zur Bewertung der Modellgüte für die Voruntersuchungen am GAT

Einflussparameter / Regressoren	Regressionskoeffizienten	
	Koeffizient	Betrag
$X_1$ ... Gummihärte in $ShA$	$a_1$ in $\frac{N}{mm * ShA}$	-15,9675
$X_2 = X_1^2$ ... Gummihärte in $ShA^2$	$a_2$ in $\frac{N}{mm * ShA^2}$	+0,1591
$X_3$ ... Felgenreöße in $mm$	$a_3$ in $\frac{N}{mm^2}$	+6,8418
Bewertung der Modellgüte: $R^2 = 0,950$ ; $RMSE = 0,053$ ; $N = 442$		

Durch die Gleichungen (11) und (10) steht damit eine Möglichkeit zur Verfügung, um abhängig von der Anpresskraft, der Gummihärte und der Felgenreöße die mittlere Flächenpressung am GAT bestimmen zu können. Das Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,950$  sowie die relativ kleine mittlere quadratische Abweichung  $RMSE = 0,053$  sprechen für die hohe Güte des mathematischen Modells.

Bei den Untersuchungen am GAT hat sich jedoch gezeigt, dass durch die zu bewegenden Massen (in Einfederrichtung entlang der Hochachse) und die in der Lagerung vorhandene Reibung nur Anpresskräfte



reproduzierbar eingestellt werden können, die betragsmäßig größer als 10 N (besser > 20 N) sind.

Damit ergeben sich bei der Anpresskraft von 10 N (bzw. 40 N, maximal verwendeter Sollwert der Kraft bei den Untersuchungen am GAT), einer Felgenreöße von 67 mm (Verwendung bei den später durchgeführten Untersuchungen) und den vorhandenen Gummihärten (Shore-A von 54 bis 79) am GAT mittlere Flächenpressungen, die zwischen  $0,244 \text{ N/mm}^2$  und  $0,434 \text{ N/mm}^2$  (bzw.  $0,491 \text{ N/mm}^2$  und  $0,869 \text{ N/mm}^2$ ) liegen. Die mittleren Flächenpressungen liegen damit bereits bei der Anpresskraft von 10 N höher als die Flächenpressungen bei profillosen Glattreifen am IPS ( $0,233 \text{ N/mm}^2$  bis  $0,375 \text{ N/mm}^2$ ).

In anschließenden Arbeiten könnte an dieser Stelle beispielsweise überprüft werden, ob durch die Verwendung breiterer Vollgummiräder bzw. reibungsmindernder Maßnahmen (in der Linearführung in Einfederrichtung) bzw. durch Gewichtsoptimierung (der ungefederten Massen) die mittlere Flächenpressung im Reibkontakt reduziert werden kann.

### 4.2.2.2 Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Untersuchungen

In diesem Kapitel werden Untersuchungen (Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennlinien) zur Überprüfung der Übertragbarkeit der Ergebnisse vom GAT auf Reifenmessungen vorgestellt. Die Umgebungs- und Betriebsbedingungen wurden bei der Versuchsdurchführung an beiden Prüfumgebungen so gewählt, dass jeweils möglichst vergleichbare Bedingungen vorlagen. Zur Untersuchung unterschiedlicher Einflussparameter wurden jeweils Parameterstudien zum Einfluss der Geschwindigkeit, der Flächenpressung, der Temperatur des Zwischenmediums und der Gummizusammensetzung (Härte nach Shore-A) auf nasser Fahrbahn durchgeführt. Wie bereits erwähnt, treten bei den Untersuchungen am GAT etwas höhere mittlere Flächenpressungen im Kontakt auf als am IPS, was prüfstandseitig konstruktiv bedingt ist. Die Durchführung und

Auswertung der Einzeluntersuchungen wird am GAT, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, durchgeführt (Vorgehen IPS: weitestgehend analog).

In diesem Kapitel werden zunächst die Versuchsbedingungen (Reifenseite, Fahrbahnseite sowie die Umgebungs- und Betriebsbedingungen) für beide Prüfumgebungen vorgestellt. Im Anschluss daran werden exemplarisch Untersuchungsergebnisse für die beiden unterschiedlichen Prüfumgebungen in prüfstandsübergreifenden Einflussdiagrammen veranschaulicht. Zur Bewertung der Übertragbarkeit werden die Einzeluntersuchungen schließlich für die jeweilige Prüfumgebung mittels mathematisch-statistischer Modelle zusammengefasst und diese einander gegenübergestellt.

Auf der Reifenseite wurden am IPS profillose PKW-GLattreifen (Dimension 205/55 R16) und am GAT Vollgummiräder (1/3-Groschräder:  $\varnothing_{A, \text{Rad}} = 70 \text{ mm}$ , Breite = 6 mm) auf ihr Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Verhalten untersucht. Die profillosen GLattreifen wurden wie auch die 1/3-Groschräder von der Continental Reifen Deutschland GmbH hergestellt und für Untersuchungszwecke beigesteuert. Sowohl die Vollgummiräder (GAT) als auch die profillosen GLattreifen (IPS) stehen jeweils aus den vier gleichen Gummimischungen zur Verfügung und wurden nach der Härte nach Shore-A charakterisiert (Härtewerte: 54, 72, 73, 79). Vor der Verwendung bei den Parameterstudien wurden die PKW-GLattreifen am IPS wie auch die Vollgummiräder am GAT einer Einfahrprozedur unterzogen, um den Einfluss von Einfahreffekten auf die Untersuchungsergebnisse zu reduzieren (vgl. Abbildung 29).

Auf der Fahrbahnseite wurde an beiden Prüfständen (IPS & GAT) die gleiche SafetyWalk-Oberfläche verwendet, die aufgrund der sehr großen Oberflächenschärfe (im Neuzustand) vor Versuchsbeginn entschärft wurde. An dieser Stelle kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich der Schärfegrad der Fahrbahnoberflächen bei den beiden Prüfumgebungen leicht unterscheidet, da das Entschärfen manuell durchgeführt wurde. Nach dem Entschärfen wurden diese Oberflächen

ebenfalls einer Einfahrprozedur unterzogen, um damit den Einfluss von Poliereffekten auf die Ergebnisse zu reduzieren (vgl. Abbildung 29).

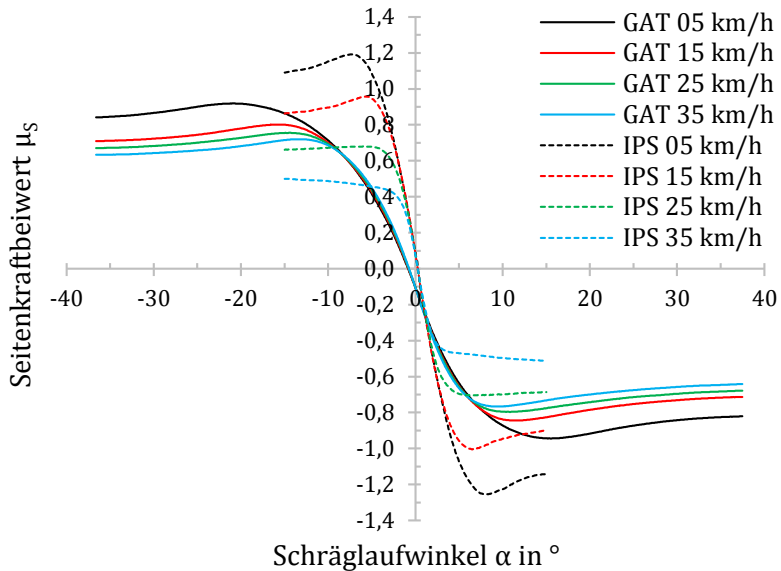
Die Betriebs- und Umgebungsbedingungen lassen sich an beiden Prüfumgebungen gleichermaßen beschreiben. Es wurden jeweils Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennlinien mit frei rollendem Rad (profilloser Reifen am IPS und Vollgummirad am GAT) ohne Sturz auf nassen Fahrbahnoberflächen durchgeführt. Der Schräglaufwinkel wurde am IPS von ca.  $-15^\circ$  bis  $+15^\circ$  und am GAT von ca.  $-36^\circ$  bis  $+36^\circ$  variiert. Am GAT musste im Vergleich zum IPS ein größerer Schräglaufwinkelbereich untersucht werden, da das Maximum des Reibwertes bezogen auf den Schräglaufwinkel vergleichsweise spät erreicht wird. Die Variation der Geschwindigkeit, der Temperatur des Zwischenmediums und der Gummizusammensetzung konnte an beiden Prüfumgebungen direkt vergleichbar durchgeführt werden. Die Variation der mittleren Flächenpressung erfolgte beim profillosen Glatreifen (am IPS) über die Veränderung des Reifenfülldruckes in Kombination mit der verwendeten Gummimischung. Bei den Vollgummirädern am GAT wurde zur Variation der mittleren Flächenpressung die verwendete Gummimischung und die Anpresskraft verändert. Die resultierende mittlere Flächenpressung wurde am IPS über Gleichung (8) und am GAT über Gleichung (10) mit (11) bestimmt. Die Wasserfilmhöhe wurde am IPS während der Untersuchungen gesteuert und aufgezeichnet und es ergaben sich dabei mittlere Wasserfilmhöhen von 0,78 mm ( $\pm 0,18$  mm).

Bei den durchgeführten Untersuchungen wurden Parametervariationen in den folgenden Grenzen durchgeführt. An beiden Prüfständen wurde die Geschwindigkeit gleichermaßen im Bereich von 5 bis zu 35 km/h, die Temperatur des Zwischenmediums von 15 bis 25 °C und die Gummihärte nach Shore-A von 54 bis 79 variiert. Am IPS wurden die beiden Reifeninnendrucke von 2,4 und 3,5 bar untersucht, was mit der Kombination der vorliegenden Gummizusammensetzungen zu mittleren Flächenpressungen von  $0,233 \text{ N/mm}^2$  bis  $0,375 \text{ N/mm}^2$  führt. Am GAT wurden Anpresskräfte von 10 bis 40 N

untersucht, was mit der Kombination der vorliegenden Gummi-zusammensetzungen zu mittleren Flächenpressungen von  $0,244 \text{ N/mm}^2$  bis  $0,869 \text{ N/mm}^2$  führt. Die Fahrbahnoberfläche bleibt bei allen Untersuchungen am IPS und auch am GAT jeweils unverändert dieselbe.

Außer den variierten Untersuchungsparametern ist zu erwarten, dass sich der Polierzustand der Fahrbahnoberfläche über die einzelnen Untersuchungen hinweg verändern wird, was die Untersuchungsergebnisse beeinflussen kann (Eine kontinuierliche Absenkung des Reibniveaus ist hierbei zu erwarten). Um dies bei der Auswertung korrigieren zu können, wurde ein randomisierter symmetrischer Versuchsplan an beiden Prüfständen durchgeführt. Durch das Randomisieren schlagen sich systematische Effekte in der Streuung nieder und werden nicht einem zu untersuchenden Parameter zugeschrieben. Zusätzlich wurde der Polierzustand der Fahrbahnoberflächen an beiden Prüfumgebungen durch regelmäßige Referenzmessungen charakterisiert.

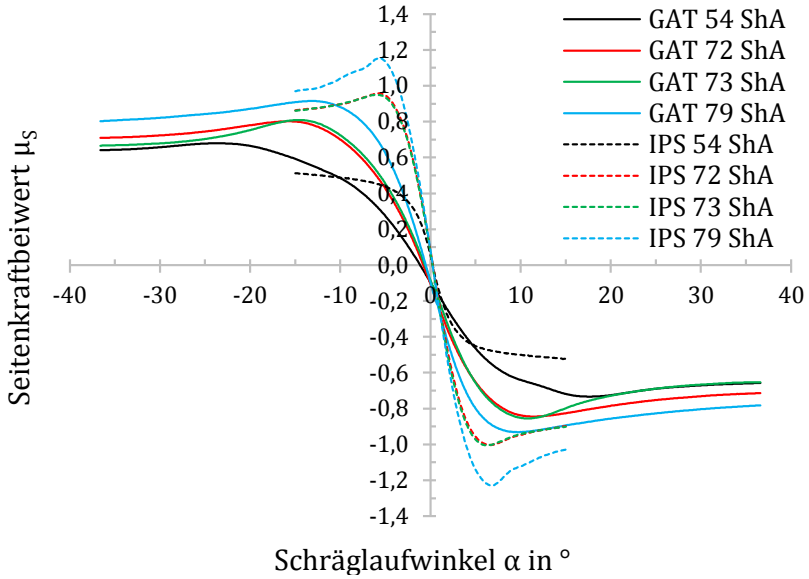
In Abbildung 39 sind Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennlinien abgebildet, die am IPS und GAT unter vergleichbaren Bedingungen ermittelt wurden. Die Untersuchungen veranschaulichen exemplarisch den Einfluss der Geschwindigkeit auf die Untersuchungsergebnisse an beiden Prüfumgebungen. Bei der Betrachtung der Kennlinien ist ersichtlich, dass eine Erhöhung der Geschwindigkeit zu einer Reduzierung des maximalen Reibbeiwertes führt. Dieser Trend kann innerhalb der Untersuchungen am GAT und auch am IPS vorzeichengleich beobachtet werden.



**Abbildung 39:** Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennlinien vom IPS und GAT für unterschiedliche Geschwindigkeiten (Temperatur des Zwischenmediums 20°C, Referenzgummi 72 Shore-A, Flächenpressung aus (10)/(8): GAT 0,52 N/mm<sup>2</sup>, IPS 0,34 N/mm<sup>2</sup>)

Der Vergleich der Untersuchungsergebnisse vom GAT und IPS zeigt jedoch, dass sich die Geschwindigkeit am IPS stärker auf den maximalen Reibbeiwert auswirkt, da die Kurven weiter spreizen. Dieses Verhalten kann vermutlich zum einen auf die schlechtere Wasserverdrängung am IPS aufgrund der breiteren Reifen und zum anderen eventuell auf die struktur-dynamischen Eigenschaften des luftgefüllten Reifens bzw. des Vollgummirades zurückgeführt werden.

In Abbildung 40 ist analog zu Abbildung 39 der Einfluss der Gummimischung zu erkennen. An beiden Prüfumgebungen führt die Reduzierung der Shorehärte (Shore-A) zum Absinken des maximalen Seitenkraftbeiwertes. Hier wird jedoch darauf hingewiesen, dass die Eigenschaften einer Gummimischung nicht hinreichend über die Shorehärte allein charakterisierbar sind.



**Abbildung 40:** Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennlinien vom IPS und GAT für unterschiedliche Gummimischungen (Temperatur des Zwischenmediums 20°C, Geschwindigkeit 15 km/h, Flächenpressungen aus (10)/(8) : GAT 0,35 bis 0,61 N/mm<sup>2</sup>, IPS 0,32 bis 0,38 N/mm<sup>2</sup>)

Für eine genauere Betrachtung bezüglich der Übertragbarkeit zwischen den beiden Prüfstandumgebungen sollte die Fahrbahnoberflächenstrukturen jeweils durch eine geeignete Charakterisierung der Textur und des Materials und die Eigenschaften der Gummimischung durch die Charakterisierung der viskoelastischen Eigenschaften sowie der oberflächenchemischen Eigenschaften erfolgen. Weiterhin sollten jeweils die Eigenschaften der Zwischenmedien durch geeignete Verfahren charakterisiert werden.

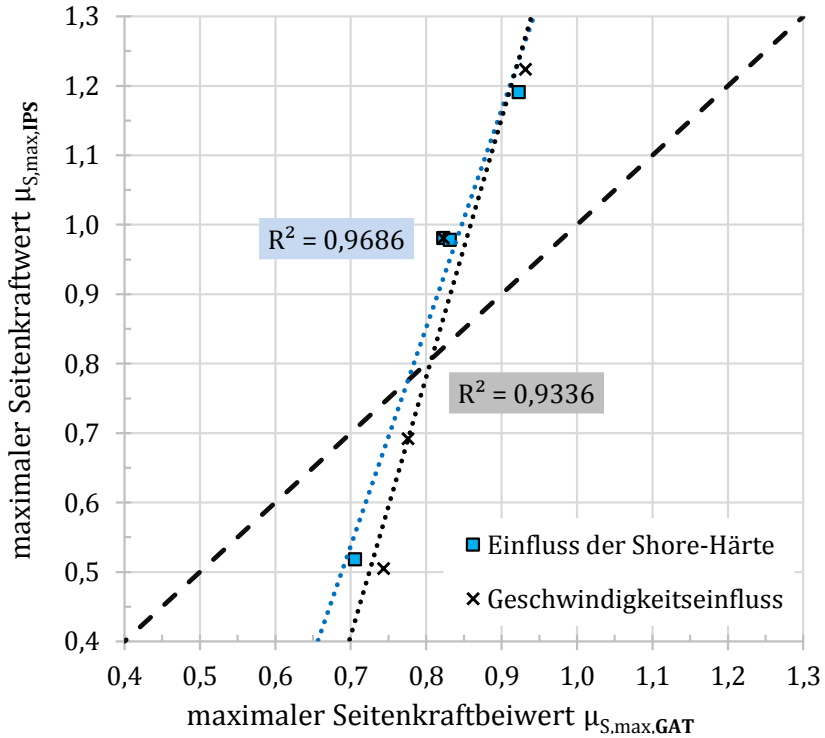
Für die hier durchgeführten Untersuchungen zur Übertragbarkeit wird die durchgeführte gummiseitige Charakterisierung mittels Shore-A Härte jedoch als ausreichend betrachtet, da an beiden Prüfumgebungen dieselben Gummi-Zusammensetzungen verwendet werden, und mit

den Untersuchungen am GAT nicht der absolute Reibwert vorhergesagt, sondern die Wirkung von Einflussgrößen tendenziell ermittelt und gegenübergestellt werden. Die Untersuchungsergebnisse bestätigen eindrucksvoll, dass an beiden Prüfständen dasselbe Ranking resultiert. Es zeigt sich jedoch, wie beim Einfluss der Geschwindigkeit auch, dass die Parametervariation am IPS stärker spreizt, was jedoch vermutlich auf die Unterschiede in den vorliegenden Flächenpressungen zurückgeführt werden kann.

Zur besseren Bewertung der Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse vom GAT auf Reifenmessungen bezüglich des maximalen Seitenkraftbeiwertes wurden die Mittelwerte der betragsmäßigen Maximalwerte der Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennlinien aus den zu den Abbildung 39 und Abbildung 40 gehörenden Datensätzen ermittelt (vgl. Abbildung 28) und in Abbildung 41 getrennt nach der Prüfumgebung übereinander aufgetragen.

Die gewählte Darstellungsweise lässt die Zusammenhänge der Untersuchungsergebnisse der beiden Prüfumgebungen direkt erkennen. Die Diagonale mit der Steigung 1 („gestrichelte Linie“) steht in diesem Diagramm dafür, dass an beiden Versuchsständen dieselbe Spreizung vorliegt.

Lägen beispielsweise alle Punkte der Geschwindigkeitsvariation auf dieser Linie, dann wäre zu erwarten, dass sich die für die Geschwindigkeitsabhängigkeit zugrundeliegenden relevanten Reibmechanismen an beiden Prüfumgebungen gleich auf den aufgetragenen Kennwert auswirken und damit wären die Ergebnisse zwischen den beiden Prüfumgebungen bezüglich dieses Einflusses direkt übertragbar und damit auch prognostizierbar.



**Abbildung 41:** Zusammenhang einzelner Messergebnisse bezüglich des maximalen Seitenkraftbeiwertes zwischen IPS und GAT für den Geschwindigkeits- und den Shore-Härte-Einfluss

Dieser perfekte direkte Zusammenhang ist bei den aufgetragenen Einflussparametern (Geschwindigkeitseinfluss und Mischungseinfluss) nicht erkennbar, die Messpunkte liegen allerdings relativ nahe der Ausgleichsgeraden, was jeweils den systematischen Zusammenhang bestätigt. In dieser Darstellung wurde jeder Parametereinfluss linear angenähert („gepunktete Linien“). Beim Vergleich von den „gepunkteten“ mit der „gestrichelten“ Linie zeigt sich, dass diese unterschiedliche Steigungen aufweisen. Da die „gepunkteten“ Linien jeweils höhere Steigungen aufweisen (Steigung > 1), wirken sich die



jeweiligen Parameter am IPS stärker auf den betrachteten Kennwert aus als am GAT.

Die Bewertung der Übertragbarkeit der Ergebnisse wurde in Abbildung 41 exemplarisch anhand weniger Einzeluntersuchungen qualitativ veranschaulicht. Im Folgenden soll diese Überprüfung nun anhand aller durchgeführten Untersuchungen zur Übertragbarkeit quantitativ vorgenommen werden (Variation der Geschwindigkeit, der Shore-Härte, der Flächenpressung und der Temperatur des Zwischenmediums). Im ersten Schritt werden hierfür, für alle Einzeluntersuchungen getrennt, für beide Prüfumgebungen (IPS & GAT) jeweils ein mathematisches Modell zu den Parametereinflüssen formuliert und die Regressionskoeffizienten mittels der Methode der kleinsten Fehler-Quadrate geschätzt (multiple lineare Regressionsanalyse). Anschließend wird die Bewertung der Übertragbarkeit durch die Gegenüberstellung der Modelle (über die Regressionskoeffizienten und visuell analog zu Abbildung 41) durchgeführt.

Bei der statistischen Auswertung der Untersuchungsergebnisse zeigte sich, dass der Einfluss jedes untersuchten Einflussparameters in erster Näherung als linear angenommen werden kann. Aus diesem Grund konnte der identische Modellansatz (12) für beide Prüfumgebungen (IPS & GAT) formuliert werden, was einen sehr unkomplizierten und einfachen Vergleich ermöglicht.

$$\mu_{S,max,IPS/GAT} = a_0 + a_1 * X_1 + a_2 * X_2 + a_3 * X_3 + a_4 * X_4 \quad (12)$$

Die ermittelten Regressionskoeffizienten sind in der Tabelle 5 ersichtlich. Der Einfluss des Polierzustandes der Fahrbahnoberflächen (GAT & IPS) wurde bei der Vorauswertung, auf Basis der speziell für die Trendkorrektur durchgeführten Referenzmessungen, vor der Schätzung der Regressionskoeffizienten jeweils korrigiert. Die

Referenzmessungen wurden am IPS mittels SRT-Pendelmessungen und am GAT mittels Referenz-Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Untersuchungen bei Standardbedingungen durchgeführt.

Bei der Betrachtung und dem Vergleich der Regressionskoeffizienten beider Modellansätze ( $a_{i,IPS}$  &  $a_{i,GAT}$ ) zeigt sich, dass sich alle Einflussparameter prüfstandsübergreifend vorzeichengleich auf den jeweiligen maximalen Reibwert auswirken. Das bedeutet, dass sich die durchgeführten Parametervariationen an beiden Prüfumgebungen vergleichbar auf die Untersuchungsergebnisse (hier: maximaler Seitenkraftbeiwert) auswirken.

**Tabelle 5:** Regressionskoeffizienten für die ermittelten Modelle am GAT & IPS für die Bewertung der Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse vom GAT auf Reifenmessungen

Einflussparameter / Regressoren	Regressionskoeffizienten			
	Koeffizient	$a_{i,IPS}$	$a_{i,GAT}$	$\frac{a_{i,GAT}}{a_{i,IPS}} * 100\%$
<i>Achsenabschnitt</i>	$\alpha_0$ in –	+0,3023	+0,3034	100,3 %
$X_1$ ... <i>Geschwindigkeit in <math>\frac{km}{h}</math></i>	$\alpha_1$ in $\frac{h}{km}$	-0,0224	-0,0077	34,4 %
$X_2$ ... <i>Wassertemperatur in <math>^{\circ}C</math></i>	$\alpha_2$ in $\frac{1}{^{\circ}C}$	-0,0079	-0,0058	73,4 %
$X_3$ ... <i>Gummihärte in <i>ShA</i></i>	$\alpha_3$ in $\frac{1}{ShA}$	+0,0245	+0,0140	57,1 %
$X_4$ ... <i>Flächenpressung in <math>\frac{N}{mm^2}</math></i>	$\alpha_4$ in $\frac{mm^2}{N}$	-1,7853	-0,3697	20,7 %

Dies deutet wiederum darauf hin, dass im Reibkontakt bei beiden Prüfumgebungen die gleichen grundlegenden Reibmechanismen zum Reibbeiwert beitragen. Beim Vergleich der Verhältnisse der Regressionskoeffizienten ( $\frac{a_{i,GAT}}{a_{i,IPS}} * 100\%$ ) zeigt sich, dass der relative Unterschied bei den Regressoren  $X_1$  und  $X_4$  im Vergleich zu  $X_2$  und  $X_3$  zwischen IPS und GAT stärker ausgeprägt ist. Dies kann vermutlich dadurch erklärt werden, dass bei den Regressoren  $X_1$  und  $X_4$  der Einfluss des schlechteren Drainageverhaltens des breiten Reifens bzw.

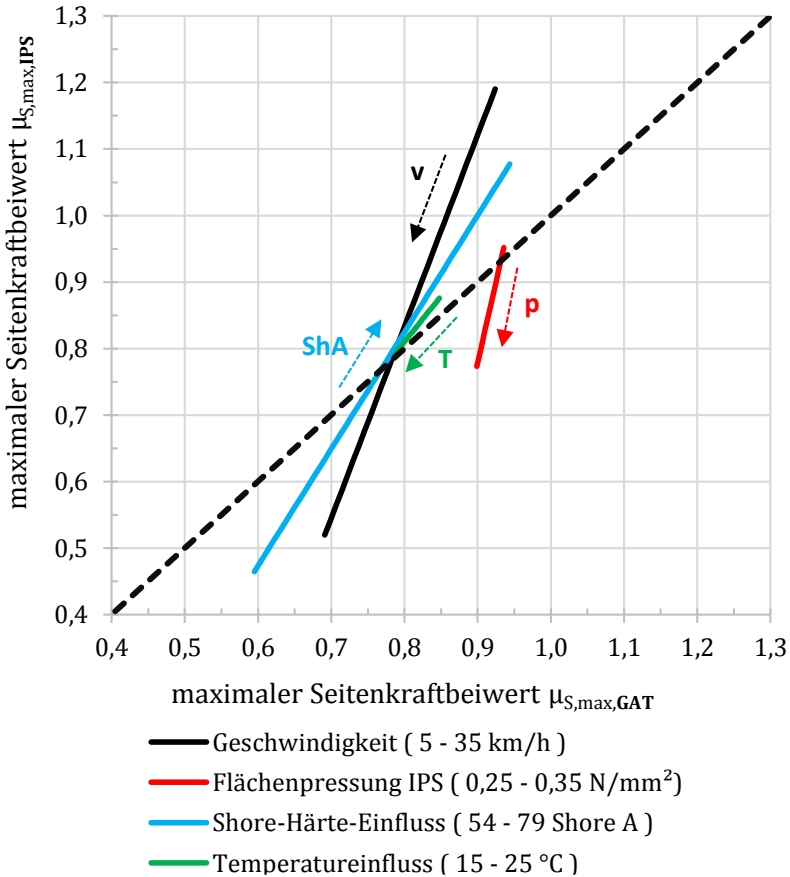
die Unterschiede im struktur-dynamischen Verhalten des luftgefüllten Reifens bzw. des Vollgummirades überwiegt, während bei den Regressoren  $X_2$  und  $X_3$  der Einfluss der viskoelastischen Eigenschaften der Gummimischung von vorrangiger Bedeutung ist und daher die Untersuchungen beider Prüfumgebungen, wie auch zu erwarten, besser übereinstimmen.

In Tabelle 6 sind die Kenngrößen zur Bewertung der Modellgüte ersichtlich. Die Bestimmtheitsmaße von  $R^2_{IPS} = 0,960$  bzw.  $R^2_{GAT} = 0,926$  sowie die relativ kleine mittlere quadratische Abweichung  $RMSE_{IPS} = 0,061$  bzw.  $RMSE_{GAT} = 0,038$  sprechen für die hohe Aussagekraft der beiden ermittelten mathematischen Zusammenhänge. Alle bestimmten Regressionskoeffizienten wirken sich bei beiden Modellansätzen signifikant (99 % Vertrauensbereich) auf den mittleren maximalen Seitenkraftbeiwert aus.

**Tabelle 6:** Kenngrößen zur Bewertung der Modellgüte für die am GAT & IPS ermittelten Modelle

Gütemaße zur Bewertung der Modellgüte	Untersuchungen vom:	
	IPS	GAT
$R^2$	0,960	0,926
$R^2$ korrigiert	0,960	0,924
<b>RMSE</b> (mittlerer quadratischer Fehler)	0,061	0,038
<b>Mittelwert</b> (der Schätzungen)	0,840	0,820
$N$ (Stichprobenumfang)	782	195
<b>Alle Regressionskoeffizienten wirken sich signifikant (99 % Vertrauensbereich) auf den maximalen Seitenkraftbeiwert aus.</b>		

In Abbildung 42 werden die beiden ermittelten mathematisch-statistischen Modelle visuell gegenübergestellt.



**Abbildung 42:** Zusammenhang der mathematisch-statistischen Modelle bezüglich des maximalen Seitenkraftbeiwertes zwischen IPS und GAT für unterschiedliche Parametereinflüsse

Die Darstellungsweise orientiert sich hierbei an Abbildung 41 und veranschaulicht neben dem Zusammenhang der beiden Prüfumgebungen jeweils auch den Einfluss der untersuchten Parametereinflüsse auf den maximalen Seitenkraftbeiwert. Die einzelnen Kennlinien ergeben sich (Bsp. Geschwindigkeitsvariation),

indem die Geschwindigkeit in beiden Modellen jeweils in den Grenzen variiert wird, wie sie auch bei den empirischen Untersuchungen (am IPS) variiert wurde (Bsp. Geschwindigkeit: 5 bis 35 km/h). Die weiteren Parameter wurden in diesem Fall konstant mit ihrem Mittelwert (Mittelwert des jeweiligen Variationsbereichs) angenommen. Die ermittelten Kennlinien veranschaulichen durch ihre Steigung die Stärke und durch ihre Anfangs- und Endpunkte (bzw. ihre Länge) die Auswirkung des Variationsbereiches des betrachteten Parameters.

Die zusätzlich eingezeichneten Pfeile kennzeichnen, wie sich die Erhöhung des jeweiligen Parameters auf den maximalen Seitenkraftbeiwert auswirkt (Bsp. Eine Erhöhung der Geschwindigkeit führt an beiden Prüfungen zur Reduzierung des maximalen Seitenkraftbeiwertes).

Wie bereits erwähnt, treten am GAT im Vergleich zum IPS höhere Flächenpressungen im Kontakt auf (vgl. Kapitel 4.2.2.1). Aus diesem Grund wurde, zur vereinfachten Darstellung, das GAT-Modell bezüglich des Einflusses der Flächenpressung auf die am IPS vorliegenden niedrigeren Werte extrapoliert.

### 4.2.3 Bewertung der Übertragbarkeit

Die in Abbildung 42 dargestellten Kennlinien zeigen wie auch die in Abbildung 41 dargestellten einzelnen Messpunkte, dass zwischen den am IPS durchgeführten Untersuchungen zum Reibverhalten zwischen Reifen und Fahrbahn und am GAT zwischen dem Vollgummirad auf der zylindrischen Fahrbahnprobe eindeutig systematische Zusammenhänge bestehen, wobei die unterschiedlichen Parametereinflüsse am IPS und GAT unterschiedlich stark aufspreizen. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass im Reibkontakt an beiden Prüfungen dieselben grundlegenden Mechanismen wirken.

Daher wird im Weiteren davon ausgegangen, dass auch die Variation weiterer, hier nicht explizit überprüfter Parameter ähnliche

Auswirkungen auf die Reibung an beiden Prüfumgebungen haben wird. Es ist daher möglich, Untersuchungen an einer Prüfumgebung durchzuführen und davon auszugehen, dass die ermittelten Erkenntnisse und Schlussfolgerungen zumindest tendenziell Gültigkeit für die jeweils andere Prüfumgebung besitzen.

## **5. Charakterisierung von Festkörperoberflächen und von Flüssigkeiten**

In dieser Arbeit wird der Einfluss der Oberflächenspannung flüssiger Zwischenmedien und damit der Einfluss der Benetzungszustände des Reifens als auch der Fahrbahn auf den maximalen Reibschluss zwischen Reifen und Fahrbahn realitätsnah untersucht.

Zu diesem Zweck werden Zwischenmedien auf Wasserbasis erzeugt (wässrige Tensidlösungen), die im Vergleich zu reinem Wasser unterschiedliche Oberflächenspannungen aufweisen. Bei Reibungsuntersuchungen am GAT werden diese in den Kontakt zwischen Vollgummirad und Fahrbahn eingeleitet, um den Einfluss der veränderten Oberflächenspannung auf die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn quantifizieren zu können. Durch den Zusatz von Tensiden zum Zwischenmedium Wasser soll der im Kapitel 1.1 beschriebene praxisnahe Fall simuliert werden. Hierbei kommt es auf realen Fahrbahnoberflächen dazu, dass es durch das in der Luft vorliegende Ozon kombiniert mit natürlicher UV-Strahlung zur Bildung natürlicher Detergenzien (Tenside) kommt, die sich bei einsetzendem Regen im Wasser lösen und den Reibwert beeinflussen können (vgl. [Ken 05]).

Da der Benetzungszustand jedoch sowohl von den oberflächenenergetischen Eigenschaften der zu benetzenden Festkörper als auch der benetzenden Flüssigkeiten beeinflusst wird, werden zu Beginn dieses Kapitels sowohl die Grundlagen zur Charakterisierung der oberflächenenergetischen Eigenschaften von Festkörpern als auch von Flüssigkeiten vorgestellt. Weiterhin werden die vorgestellten Methoden und Vorgehensweisen jeweils an praktischen Beispielen im Kontext der Reifen-Fahrbahn-Reibung

angewandt. Durch die Zusammenführung der oberflächenenergetischen Eigenschaften der Festkörper und Flüssigkeiten wird schließlich die Benetzbarkeit („Wetting-Envelope“) exemplarisch dargestellt und anhand charakteristischer Kennwerte bewertet. Auf die Charakterisierung der Oberflächenstruktur wird verzichtet, da der Einfluss der Textur (Mikro- und Makrotextur) innerhalb dieser Arbeit keinen Untersuchungsschwerpunkt darstellt.

Abschließend werden in diesem Kapitel Untersuchungen vorgestellt, die sich mit der Charakterisierung flüssiger Zwischenmedien bezüglich der dynamischen Viskosität beschäftigen. Der Einfluss dieser Kenngröße auf den Reibwert soll in dieser Arbeit nicht direkt untersucht werden. Es soll hier jedoch sichergestellt werden, dass die Viskosität bei allen untersuchten Zwischenmedien möglichst vergleichbare Werte aufweist, damit erwartet werden kann, dass die beobachteten Parametereinflüsse bei den Untersuchungen am GAT größtenteils unmittelbar auf die oberflächenenergetischen Eigenschaften des Zwischenmediums zurückgeführt werden können.

## 5.1 Definition der Oberflächenenergie

Die Oberflächenenergie wird als Arbeit bezeichnet, die zur Vergrößerung der Oberfläche einer Phase aufgewendet werden muss. Bei Festkörperoberflächen wird begrifflich in der Regel von der „freien Oberflächenenergie“ und bei flüssigen Phasen von der „Oberflächenspannung“ gesprochen [Krü 15].

Im Allgemeinen wird die Arbeit zur Auftrennung eines Körpers in zwei Teile als Kohäsionsarbeit und die Trennung zweier unterschiedlicher Körper (bestehend aus unterschiedlichen Molekülarten) als Adhäsionsarbeit bezeichnet (vgl. [Isr 11]). Bei beiden Fällen wird hierbei die Oberfläche vergrößert.



Nach EICHLER [Eic 01] werden Moleküle innerhalb einer flüssigen Phase von allen Seiten mit den gleichen anziehenden Kräften durch die benachbarten Moleküle beaufschlagt. Die dadurch resultierende Belastung wird als Kohäsionsdruck bezeichnet und ist nicht direkt beobachtbar. Die Reichweite dieser Molekularkräfte ( $10^{-9}$  bis  $10^{-8}$  m) wird als Wirkungssphäre bezeichnet und ragt bei oberflächennahen Molekülen in den angrenzenden Gasraum. Daraus resultiert für diese Moleküle eine Kraft, die richtungsmäßig in das Innere des Phasenvolumens wirkt. Die durch diesen Sachverhalt verursachte potentielle Energie wird auch als „Oberflächenenergie“ bezeichnet. Da jede Phase den Zustand minimaler potentieller Energie einnehmen möchte, ziehen sich kleine Flüssigkeitströpfchen zu kugelförmigen Tropfen (Kugel = kleinstmögliche Oberfläche bei gegebenem Volumen) zusammen.

## **5.2 Bestimmung der freien Oberflächenenergie von Festkörpern**

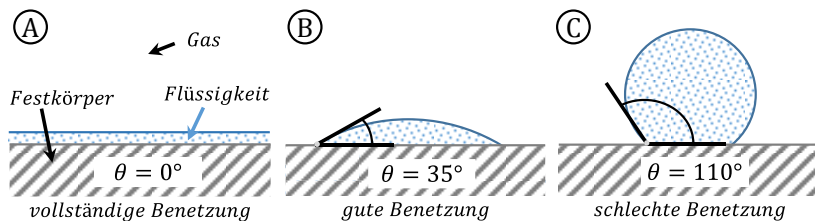
Dieses Kapitel befasst sich mit der Charakterisierung der oberflächenenergetischen Eigenschaften von Festkörperoberflächen (festen Phasen). Im ersten Schritt wird die Bestimmung von statischen Kontaktwinkeln (Methode des liegenden Tropfens) und im zweiten Schritt die Methode nach OWENS, WENDT, RABEL und KAELBLE (OWRK-Methode) vorgestellt, mit der die freie Oberflächenenergie aus Kontaktwinkelmessungen ermittelt werden kann. Statischer Kontaktwinkel bedeutet in diesem Fall, dass der quasistationäre Benetzungszustand einer Festkörperoberfläche mittels Kontaktwinkel charakterisiert wird. Im dritten Teil werden die vorgestellten Verfahren auf Festkörperoberflächen im Kontext der Reifen-Fahrbahn-Reibung angewandt und exemplarisch Ergebnisse vorgestellt.

## 5.2.1 Grundlagen

### 5.2.1.1 Statischer Kontaktwinkel

Wird ein Tropfen einer flüssigen Phase auf eine Festkörperoberfläche aufgebracht, bildet die Oberfläche der flüssigen Phase mit der festen Phase den Winkel  $\theta$  aus, der auch als Kontaktwinkel bezeichnet wird. Der Kontaktwinkel resultiert hierbei aus der Minimierung der gesamten freien Energie (fest, flüssig und gasförmig), was zum Gleichgewichtszustand der an den Grenzflächen vorliegenden Kräfte führt (vgl. [Pop 09] und [Rou 13]).

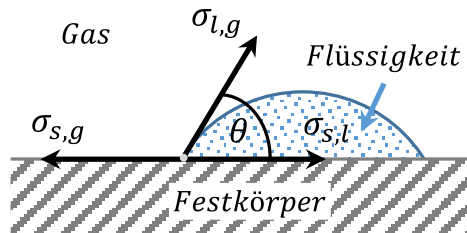
In Abbildung 43 sind unterschiedliche Benetzungszustände mit den zugehörigen Kontaktwinkeln abgebildet. Das Teilbild „A“ veranschaulicht den Fall der vollständigen Benetzung, während Teilbild „B“ gute Benetzung und Teilbild „C“ schlechte Benetzung veranschaulicht. Im Allgemeinen gilt ein Festkörper als vollständig benetzt (mit der verwendeten Flüssigkeit), wenn sich ein Kontaktwinkel von  $0^\circ$  ausbildet. Wenn sich ein Kontaktwinkel von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  ergibt, gilt der Festkörper als benetzbar und bei Kontaktwinkeln  $> 90^\circ$  als nicht benetzbar (vgl. [Pop 09] und [Krü 15]).



**Abbildung 43:** Darstellung unterschiedlicher Benetzungszustände nach [Rab 71], [Pop 09]

In Abbildung 44 ist ein Tropfen einer benetzenden flüssigen Phase auf einer festen Phase abgebildet. Hierbei sind der Kontaktwinkel  $\theta$  sowie

die Grenzflächenspannungen zwischen dem Festkörper und der Flüssigkeit  $\sigma_{s,l}$  sowie zwischen dem Festkörper (bzw. der Flüssigkeit) und der gasförmigen Phase  $\sigma_{s,g}$  (bzw.  $\sigma_{l,g}$ ) eingezeichnet. In den Indizes steht l für flüssig (liquid), g für gasförmig (gaseous), s für fest (solid). Die Kombinationen kennzeichnen jeweils die zugehörigen Grenzflächen bzw. Phasengrenzen.



**Abbildung 44:** Flüssigkeitstropfen einer benetzenden Flüssigkeit auf einer festen Oberfläche nach [Dyc 71] und [Pop 09]

Gemäß der Gleichung nach YOUNG kann im thermodynamischen Gleichgewicht der Zusammenhang zwischen den in Abbildung 44 angeführten Grenzflächenspannungen ( $\sigma_{l,g}$ ,  $\sigma_{s,g}$  und  $\sigma_{s,l}$ ) und dem Kontaktwinkel  $\theta$  wie in (13) formuliert werden (vgl. [Rou 13], [Pop 09] und [Krü 15]).

$$\sigma_{l,g} * \cos\theta = \sigma_{s,g} - \sigma_{s,l} \quad (13)$$

Der mit der Methode des liegenden Tropfens bestimmte Kontaktwinkel hängt in großem Maße von der Oberflächenspannung der flüssigen Phase und den oberflächenenergetischen Eigenschaften des Festkörpermateriale ab. Weiterhin kann jedoch auch die Oberflächenstruktur der Festkörperoberfläche den gemessenen Kontaktwinkel beeinflussen. Die innerhalb dieser Arbeit durchgeführten Kontaktwinkelmessungen wurden alle auf Oberflächen

durchgeführt, die relative glatte Oberflächenstrukturen aufwiesen. Auf eine Charakterisierung der Textur wurde verzichtet. Bei der Deutung der ermittelten Kontaktwinkel muss deshalb berücksichtigt werden, dass dieser Kennwert nicht ausschließlich von dessen Fahrbahnmaterial, sondern auch gleichzeitig von dessen Oberflächenstruktur beeinflusst sein kann.

Auf den Einfluss der Oberflächenstruktur auf den Kontaktwinkel wird innerhalb dieser Arbeit nicht weiter eingegangen (weitere Information hierzu siehe [Isr 11], [Pop 09] und [Gie 97]).

### 5.2.1.2 Freie Oberflächenenergie von Festkörpern

In diesem Kapitel wird die OWRK-Methode (OWENS, WENDT, RABEL und KAELBLE) vorgestellt. Diese Methode ist eine Standardmethode zur Berechnung der freien Oberflächenenergie eines Festkörpers (vgl. [Krü 15], [Rou 13]). Bei diesem Verfahren wird nicht nur die freie Oberflächenenergie als Gesamtwert  $\sigma_{s,ges}$ , sondern die Aufteilung in einen polaren und dispersen Anteil ( $\sigma_s^P$  und  $\sigma_s^D$ ) vorgenommen. Der Gesamtwert der Oberflächenspannung ergibt sich jeweils für die Flüssigkeit als auch für den Festkörper aus der Summe der beiden Einzelanteile, siehe (14) und (15). Der polare Anteil steht hierbei für mögliche polare und der disperse Anteil für mögliche disperse adhäsive Wechselwirkungen, die in den Grenzflächen ausgebildet werden können.

$$\sigma_{s,ges} = \sigma_s^P + \sigma_s^D \quad (14)$$

$$\sigma_{l,ges} = \sigma_l^P + \sigma_l^D \quad (15)$$

Die Autoren OWENS und WENDT [Owe 69] formulierten einen mathematischen Zusammenhang zwischen dem Kontaktwinkel  $\theta$  und den polaren und dispersen Energieanteilen der Flüssigkeit ( $\sigma_l^P$  und  $\sigma_l^D$ ) und des Festkörpers ( $\sigma_s^P$  und  $\sigma_s^D$ ), der auf der Gleichung nach YOUNG

basiert. Durch mathematische Umformung kann dieser Zusammenhang, wie in (16) angeführt, dargestellt werden.

$$\frac{(1 + \cos\theta) * (\sigma_l^P + \sigma_l^D)}{2 * \sqrt{\sigma_l^D}} = \sqrt{\sigma_s^P} * \sqrt{\frac{\sigma_l^P}{\sigma_l^D}} + \sqrt{\sigma_s^D} \quad (16)$$

In (16) ist ersichtlich, dass der angegebene formelmäßige Zusammenhang die Form einer Geradengleichung ( $y = mx + b$ ) aufweist. Damit ist es möglich, durch Kontaktwinkelmessungen über die Methode des liegenden Tropfens, mit zwei unterschiedlichen Flüssigkeiten (Normflüssigkeiten mit bekannten polaren und dispersen Anteilen der Oberflächenspannung), ein Gleichungssystem mit zwei Gleichungen und den zwei Unbekannten ( $\sigma_s^P$  und  $\sigma_s^D$  bzw.  $m$  und  $b$ ) zu erzeugen. Damit können schließlich der polare und disperse Anteil der freien Oberflächenenergie der Festkörperoberfläche bestimmt werden. Die Aufteilungen der Oberflächenspannungen in die polaren und dispersen Anteile müssen sich bei den eingesetzten Flüssigkeiten unterscheiden.

Neben der Methode nach OWRK existieren noch weitere Möglichkeiten zur Bestimmung der freien Oberflächenenergie von Festkörperoberflächen, auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird. Exemplarisch sollen hier die Ansätze von FOWKES [Fow 64], WU [Wu 73] und VAN OSS [Van 88] erwähnt werden. Eine Zusammenfassung und Bewertung verschiedener Ansätze bietet die Arbeit von GIETZELT [Gie 97].

## 5.2.2 Charakterisierung exemplarischer Oberflächen

In diesem Kapitel werden exemplarisch Untersuchungsergebnisse von statischen Kontaktwinkelmessungen sowie die daraus bestimmten freien Oberflächenenergieanteile (polar und dispers) von

Festkörperoberflächen vorgestellt. Die charakterisierten Festkörperoberflächen wurden im Kontext der Reifen-Fahrbahn-Reibung ausgewählt. Es wurden zum einen Oberflächen unterschiedlicher Gummiprüfproben, unterschiedlicher Bitumen und unterschiedlicher Gesteinsproben untersucht. Weiter wurden exemplarisch Oberflächen charakterisiert, die bei Reifenuntersuchungen als Standardprüfproben eingesetzt werden (SafetyWalk bzw. Aluminium).

Die Bestimmung der statischen Kontaktwinkel wurde am Fraunhofer-Institut für Werkstoffkunde (IWM) in Freiburg durchgeführt. Hierbei wurde das videogestützte optische Kontaktwinkelmessgerät „Contact Angle System OCA 20“ (Dataphysics) eingesetzt.

Die Bestimmung des Kontaktwinkels wurde auf jeder zu charakterisierenden Festkörperoberfläche mit zwei unterschiedlichen Normflüssigkeiten durchgeführt, um, wie in Kapitel 5.2.1.2 erläutert, den polaren und dispersen Anteil der freien Oberflächenenergie nach der OWRK-Methode bestimmen zu können. Als Normflüssigkeiten wurden deionisiertes Wasser und Ethylenglycol verwendet. Die oberflächenenergetischen Eigenschaften der beiden verwendeten Normflüssigkeiten sind der Tabelle 7 zu entnehmen.

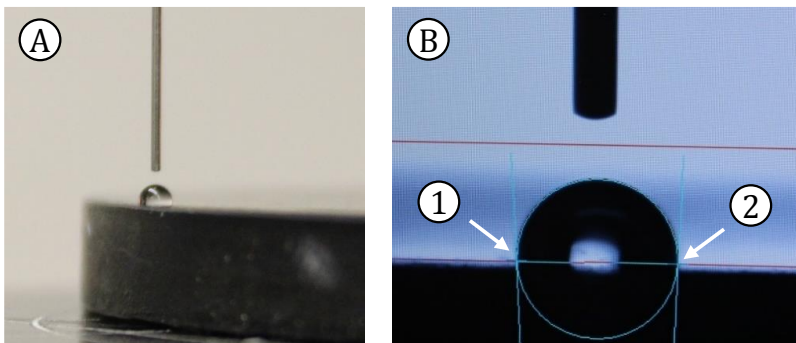
**Tabelle 7:** Oberflächenenergetische Eigenschaften der Normflüssigkeiten zur Kontaktwinkelmessung (aus Auswertesoftware)

Normflüssigkeiten	Oberflächenspannung			
	Einheit	Polar " $\sigma_l^p$ "	Dispers " $\sigma_l^D$ "	Gesamt " $\sigma_{l,ges}$ "
Wasser deionisiert (H <sub>2</sub> O)	$\frac{mN}{m}$	46,8	26,0	72,8
Ethylenglycol (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> )	$\frac{mN}{m}$	21,3	26,4	47,7

Im Folgenden wird die Bestimmung des Kontaktwinkels anhand einer Normflüssigkeit exemplarisch näher erläutert. Bei der Bestimmung des Kontaktwinkels ist es sehr wichtig, die zu charakterisierende

Festkörperoberfläche vor der Versuchsdurchführung äußerst penibel zu reinigen. In dieser Arbeit wurden die Festkörperoberflächen mittels Ethanol ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ) gereinigt und entfettet. Durch abtupfen mittels Papiertuch und mittels Druckluft (gasförmiger reiner Stickstoff) wurde die Oberfläche getrocknet. Anschließend wurden eventuell durch den Trocknungsvorgang entstehende statische Ladungen von der Oberfläche abgeleitet, damit diese nicht die Untersuchungsergebnisse verfälschen. Nach der beschriebenen Probenvorbereitung wurden die Festkörperoberflächen jeweils unmittelbar in die Prüfvorrichtung eingelegt und mit der Kontaktwinkelmessung begonnen.

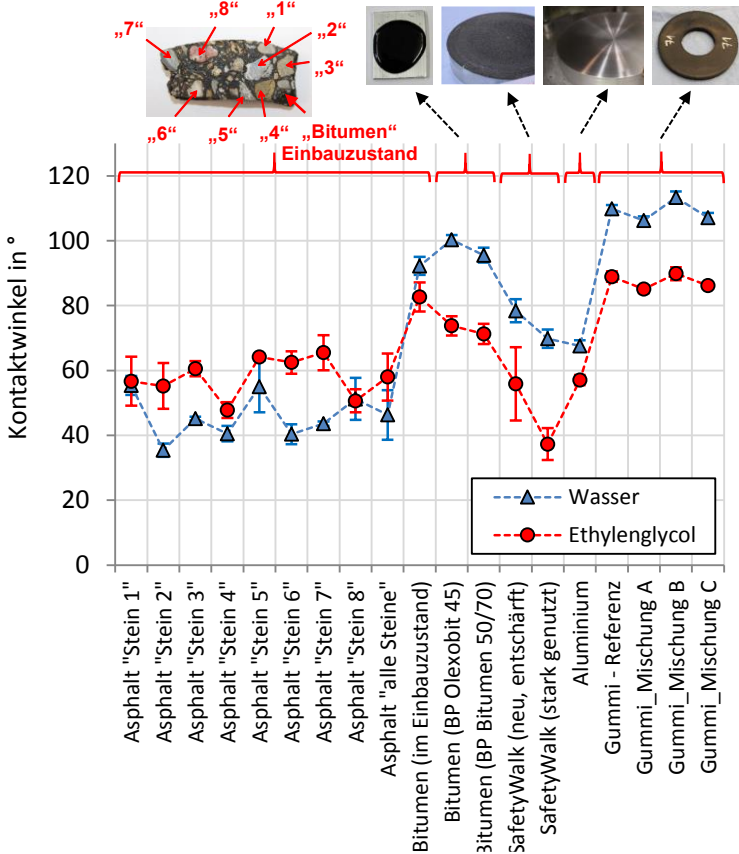
Mittels vollautomatischer Dosiereinrichtung wurde hierbei ein Tropfen (ca.  $2 \mu\text{l}$ ) der Normflüssigkeit auf der Oberfläche abgesetzt (vgl. Abbildung 45, Teilbild „A“). Nach wenigen Sekunden Wartezeit änderte sich die Kontur des Tropfens nicht weiter und es wurde mittels Kamera ein Bild aufgenommen, anhand dessen der Kontaktwinkel computergestützt ermittelt wurde (vgl. Abbildung 45, Teilbild „B“).



**Abbildung 45:** Bestimmung des Kontaktwinkels, „A“ Absetzen der Normflüssigkeit (ca.  $2 \mu\text{l}$ ), „B“ computergestützte Bestimmung des Kontaktwinkels an der Tropfenkontur

Zur statistischen Absicherung der Ergebnisse wurde die Versuchsdurchführung mit jeder Normflüssigkeit auf jeder Festkörperoberfläche mehrmals wiederholt (7 mal) und jeweils der

mittlere Kontaktwinkel aus der Stelle „1“ und „2“ (vgl. Abbildung 45, Teilbild „B“) bestimmt. Für die weiteren Auswertungen wurde der getrimmte Mittelwert (aus 5 Messungen) berechnet und verwendet. Alle Kontaktwinkelmessungen wurden unter normaler Atmosphäre bei temperierter Umgebung (ca. 20 °C) durchgeführt.

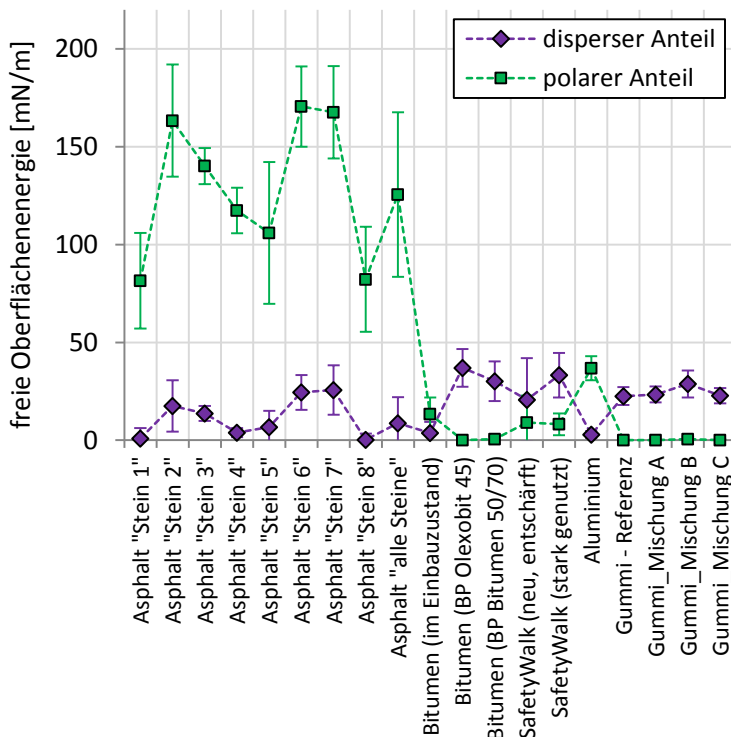


**Abbildung 46:** Kontaktwinkelmessungen mit zwei Normflüssigkeiten (deionisiertes Wasser, Ethylenglycol) auf unterschiedlichen Festkörperoberflächen (Fehlerindikatoren für ±1σ)



In Abbildung 46 sind Untersuchungsergebnisse der durchgeführten Kontaktwinkelmessungen für die beiden gewählten Normflüssigkeiten dargestellt. Jeder Messpunkt steht hierbei für den getrimmten Mittelwert.

In Abbildung 47 sind die aus den Kontaktwinkeluntersuchungen ermittelten Anteile (polar, dispers) der freien Oberflächenenergien der Festkörperoberflächen veranschaulicht.



**Abbildung 47:** Freie Oberflächenenergie (polarer und disperser Anteile) der Festkörperoberflächen (Abbildung 46) ermittelt nach der OWRK-Methode (Fehlerindikatoren für  $\pm 1\sigma$ )

Bei der Durchführung der Kontaktwinkelmessung zeigte sich, dass die Messergebnisse auf den Gesteinen nur als grobe Näherung betrachtet werden können, da die aufgebrachten Flüssigkeitstropfen durch die Porosität der Gesteine unmittelbar nach der Aufbringung langsam und teilweise schnell versickerten. In diesen Fällen wurde die Flüssigkeit aufgebracht und unmittelbar der Kontaktwinkel bestimmt. Bei allen anderen Oberflächen konnte die Flüssigkeit auf die Probenoberfläche aufgebracht und der Kontaktwinkel nach wenigen Sekunden reproduzierbar ermittelt werden, da nach der vergleichsweise kurzen Verweilzeit festgestellt werden konnte, dass sich die Kontaktwinkel nahezu nicht mehr veränderten.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen (vgl. Abbildung 46 und Abbildung 47), dass sich die gemessenen Kontaktwinkel sowie auch die Anteile der freien Oberflächenenergien auf den unterschiedlichen Festkörperoberflächen stark voneinander unterscheiden. Während auf nahezu allen Gesteinsproben Ethylenglycol den größeren Kontaktwinkel ausbildet, ist auf den weiteren Festkörperoberflächen der umgekehrte Fall zu beobachten. Bei der Betrachtung der Anteile der freien Oberflächenenergie zeigen die Gesteinsoberflächen im Vergleich zu den weiteren Festkörperoberflächen einen sehr stark ausgeprägten polaren Anteil (siehe auch Abbildung 48).

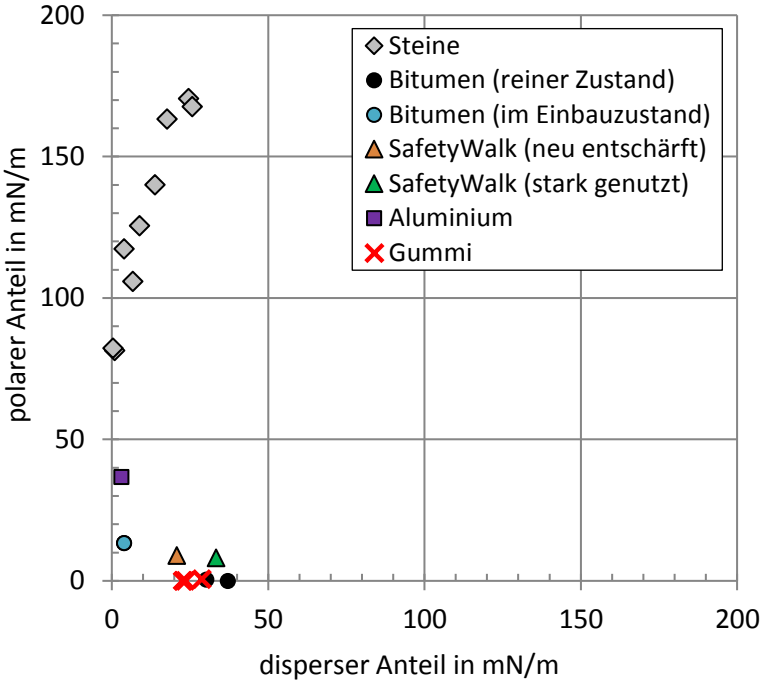
Beim Vergleich der Kontaktwinkel und der Anteile der freien Oberflächenenergie auf den unterschiedlichen Bitumenproben zeigen die Bitumen im reinen Zustand (Anlieferungszustand) vergleichbare Kontaktwinkel und Energieanteile, während das Bitumen im Einbauzustand hiervon abweicht. Dies kann vermutlich darauf zurückgeführt werden, dass das Bitumen bei der Verarbeitung mit den Gesteinen und weiteren Füll- und Hilfsstoffen vermischt wird und sich die oberflächenenergetischen Eigenschaften dieses Gemisches von reinem Bitumen unterscheiden. Der Unterschied könnte eventuell zum Teil auch auf Unterschiede in der Oberflächenstruktur erklärt werden.

Beim Vergleich der beiden SafetyWalk-Oberflächen zeigen sich bezüglich des Kontaktwinkels ebenfalls deutliche Unterschiede. Diese sind vermutlich darauf zurückzuführen, dass sich die eine Oberfläche im Neuzustand befindet und die zweite Oberfläche bereits für Reibungsuntersuchungen im nassen Zustand genutzt wurde (Die Kontaktwinkelmessung auf SafetyWalk wurde jeweils an einer Stelle durchgeführt, die sehr eben war). Bei der genutzten Oberfläche kann deshalb davon ausgegangen werden, dass sich Gummiabrieb bzw. auch Kalkablagerungen auf der Oberflächenstruktur angelagert haben. Weiterhin ist davon auszugehen, dass sich der bei Reibungsuntersuchungen zu beobachtende Poliereffekt auf die Oberflächenstruktur und damit auch auf die oberflächenenergetischen Eigenschaften auswirken kann.

Die Untersuchungen auf den unterschiedlichen Gummiprobe zeigen, dass sich auf allen Gummizusammensetzungen ähnliche Kontaktwinkel ausbilden und daher auch vergleichbare oberflächenenergetische Eigenschaften vorliegen.

In Abbildung 48 sind die nach der OWRK-Methode bestimmten Anteile (polar und dispers) der freien Oberflächenenergie der untersuchten Festkörperoberflächen übereinander aufgetragen.

Die gewählte Darstellungsweise verdeutlicht vorhandene Ähnlichkeiten in den oberflächenenergetischen Eigenschaften der Festkörperoberflächen. Die untersuchten Gummizusammensetzungen scheinen ähnliche oberflächenenergetische Eigenschaften (überwiegend disperses Verhalten) wie auch die SafetyWalk-Oberflächen und das Bitumen im reinen Zustand aufzuweisen. Die charakterisierten Gesteinsoberflächen und Aluminium zeigen hingegen ein überwiegend polares Verhalten und unterscheiden sich damit deutlich von allen anderen hier untersuchten Festkörperoberflächen.



**Abbildung 48:** Gegenüberstellung der nach der OWRK-Methode bestimmten Anteile (polar und dispers) der freien Oberflächenenergie

### 5.3 Bestimmung der Oberflächenspannung von Flüssigkeiten

Dieses Kapitel befasst sich mit der Charakterisierung der oberflächenenergetischen Eigenschaften von Flüssigkeiten.

Im ersten Schritt wird die Kapillaren-Steighöhenmethode vorgestellt, mit der die „Gesamt“-Oberflächenspannung  $\sigma_{l,ges}$  ermittelt werden kann.

Im Anschluss daran wird die Vorgehensweise nach Fowkes vorgestellt, mit der der disperse Anteil der Oberflächenspannung der Flüssigkeit bestimmt werden kann. Durch Kenntnis der „Gesamt“-Oberflächenspannung  $\sigma_{l,ges}$  und des dispersen Anteils  $\sigma_l^D$  kann über (15) schließlich der polare Anteil  $\sigma_l^P$  ermittelt werden.

Im dritten Teil werden exemplarisch die oberflächenenergetischen Eigenschaften von Zwischenmedien anhand der beschriebenen Vorgehensweise charakterisiert. Bei den untersuchten Zwischenmedien handelt es sich um wässrige Tensid- und wässrige Salzlösungen. Diese Flüssigkeiten wurden innerhalb dieser Arbeit künstlich erzeugt und mit den beschriebenen Verfahren charakterisiert, da zu erwarten ist, dass diese im Fahrzeugbetrieb unter realen Bedingungen häufig auftreten und die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn beeinflussen können. Salz wird beispielsweise im Winter als Streusalz auf die Fahrbahnoberfläche aufgebracht, um Straßenglätte durch gefrierendes Wasser zu vermeiden, während sich Tenside, wie bereits in Kapitel 1.1 erwähnt, bei normalen Umgebungsbedingungen natürlich bilden und sich bei einsetzendem Regen im Wasser lösen können.

### 5.3.1 Grundlagen

In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen der Kapillaren-Steighöhenmethode und des Vorgehens nach Fowkes vorgestellt.

#### 5.3.1.1 Bestimmung der Gesamtoberflächenspannung von Flüssigkeiten

Die „Gesamt“-Oberflächenenergie von Flüssigkeiten, auch als „Gesamt“-Oberflächenspannung  $\sigma_{l,ges}$  bezeichnet, kann mit der Kapillaren-Steighöhenmethode ermittelt werden (vgl. [Eic 01]). Bei diesem Verfahren wird eine gläserne Kapillare (langgestreckter zylindrischer Hohlraum) senkrecht in die zu charakterisierende Flüssigkeit eingetaucht. Durch die Zugkraft, die durch die Oberflächenspannung

der Flüssigkeit in der Kapillaren erzeugt wird, steigt die Flüssigkeitssäule in der Kapillaren nach oben, bis diese Zugkraft mit der Gewichtskraft der entstehenden Flüssigkeitssäule im Gleichgewicht steht. Unter der Voraussetzung, dass die Flüssigkeit die Kapillarwände vollständig benetzt, kann die Oberflächenspannung über (17) ermittelt werden (vgl. [Eic 01]).

$$\sigma_{l,ges} = \frac{1}{2} * h * r * \rho * g \quad (17)$$

Hierbei gehen die gemessene Steighöhe  $h$ , der Radius der Kapillaren  $r$ , die Dichte der Flüssigkeit  $\rho$  sowie die Erdbeschleunigung  $g$  ein.

Bei der praktischen Durchführung der Kapillaren-Steighöhenmethode wurden die Kapillaren in dieser Arbeit vor der Ermittlung der Steighöhe vollständig in die zu charakterisierende Flüssigkeit eingetaucht, um die Oberfläche der Kapillaren vollständig zu benetzen.

### 5.3.1.2 Aufteilung der Oberflächenspannung in die polaren und dispersen Energieanteile

Der disperse Anteil der Oberflächenspannung von Flüssigkeiten kann nach RESTOLHO [Res 09] durch Kontaktwinkelmessungen mit der zu charakterisierenden Flüssigkeit auf einer rein dispersen Festkörperoberfläche ermittelt werden (vgl. auch [Fow 64]). Nach dem Umformen des gegebenen mathematischen Zusammenhangs ergibt sich die in (18) angegebene Berechnungsvorschrift.

$$\sigma_l^D = \frac{1}{\sigma_s^D} * \left( \frac{1}{2} * \sigma_{l,ges} * (1 + \cos\theta) \right)^2 \quad (18)$$

Die „Gesamt“-Oberflächenspannung  $\sigma_{l,ges}$  wurde in dieser Arbeit über die Kapillare-Steighöhenmethode ermittelt. Bei der verwendeten Festkörperoberfläche handelt es sich um eine glatte

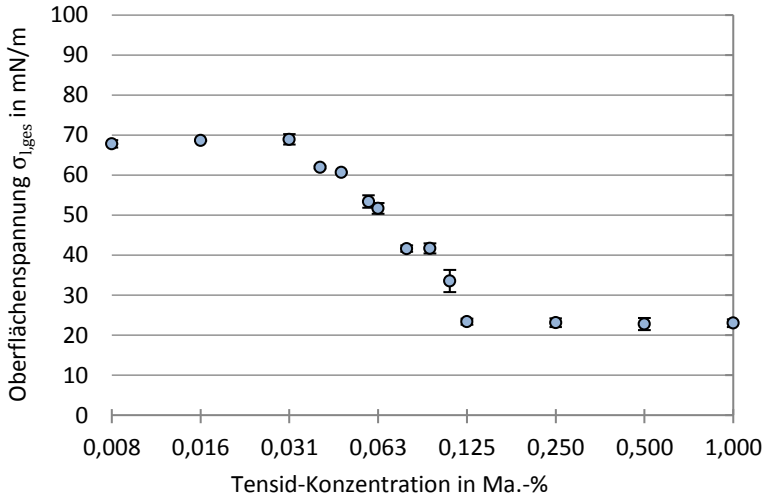
Kunstharzoberfläche, die hier in erster Näherung als rein dispers betrachtet werden kann und nach Fowkes einen dispersen Anteil der freien Oberflächenenergie von  $\sigma_s^D = 49,17$  aufweist. Durch die Anwendung von (18) wurden die dispersen Anteile  $\sigma_i^D$  und über (15) die polaren Anteile  $\sigma_i^P$  der Oberflächenspannungen der charakterisierten Flüssigkeiten ermittelt.

### 5.3.2 Charakterisierung von Zwischenmedien

Für Reibungsuntersuchungen am GAT wurden Zwischenmedien hergestellt, die in den Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn eingeleitet werden können. Bei diesen Zwischenmedien sollte es sich, wie bereits im Kapitel 5.3.1 erwähnt, um Zwischenmedien handeln, die auch im realitätsnahen Anwendungsfall des Reifen-Fahrbahn-Kontakts auftreten und die Reibung beeinflussen können.

Bei der ersten Gruppe der erzeugten Zwischenmedien handelt es sich um wässrige Tensidlösungen. Hierbei wurde reines Leitungswasser bei Raumtemperatur mit dem handelsüblichen Spülmittel „Palmolive ULTRA Limonenfrisch“ (5 – 15% anionische Tenside, < 5% nichtionische Tenside, Erläuterungen hierzu siehe [Dal 11]) mit unterschiedlichen Konzentrationen (0 bis 1 Ma.-%) versetzt.

In Abbildung 49 ist der mit der Kapillaren-Steighöhenmethode (siehe Kapitel 5.3.1.1) ermittelte Verlauf der Gesamtoberflächenspannung über der Tensid-Konzentration aufgetragen (siehe hierzu auch [Dal 11] und [Krü 15]). Zur Ermittlung der Steighöhe wurden 50  $\mu\text{l}$ -Kapillare aus Glas verwendet, die einen Innenradius von 0,46 mm aufwiesen. Zur statistischen Absicherung wurde jede Einzeluntersuchung mehrfach (3x) durchgeführt.



**Abbildung 49:** Gesamtoberflächenspannung der wässrigen Tensidlösungen über der Tensidkonzentration (Fehlerindikatoren für  $\pm 1\sigma$ )

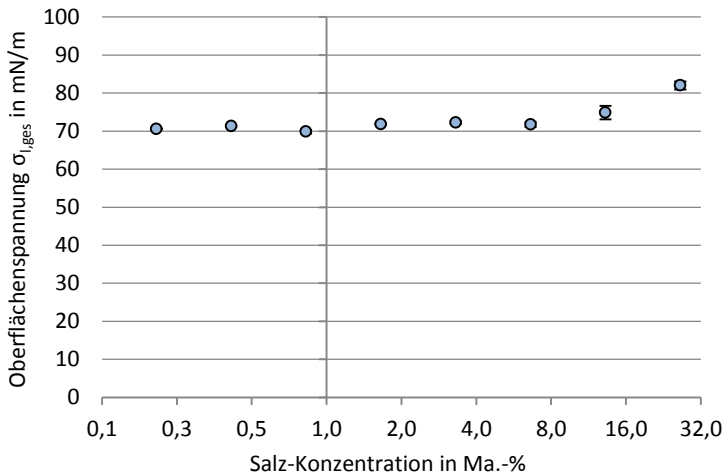
Bei der zweiten Gruppe der Zwischenmedien handelt es sich um wässrige Salzlösungen. Auch in diesem Fall bildet reines Leitungswasser bei Raumtemperatur die Basis, während hierbei das Steinsalz „Saldoro URMEER Salz - ohne Zusätze -“ in unterschiedlichen Konzentrationen (0 bis 26,5 Ma.-% „gesättigt“) zugesetzt wurde. In diesem Salz befinden sich keine weiteren Stoffe bzw. Trennmittel und damit kann der Einfluss der Salzkonzentration auf die Oberflächenspannung und schließlich auf die Reibung isoliert betrachtet werden. In Abbildung 50 ist analog zu Abbildung 49 die Gesamtoberflächenspannung über der Salz-Konzentration aufgetragen.

Bei der Betrachtung von Abbildung 49 fällt auf, dass die Gesamtoberflächenspannung  $\sigma_{l,ges}$  von der Tensid-Konzentration bei Konzentrationen  $< 0,031$  Ma.-% nicht beeinflusst wird. Bei Tensidkonzentrationen im Bereich  $> 0,031$  Ma.-% und  $< 0,125$  Ma.-% scheint ein systematischer Zusammenhang zwischen den



aufgetragenen Größen zu bestehen. Ab Tensid-Konzentrationen von  $> 0,125$  Ma.-% verändert sich die Oberflächenspannung nicht weiter.

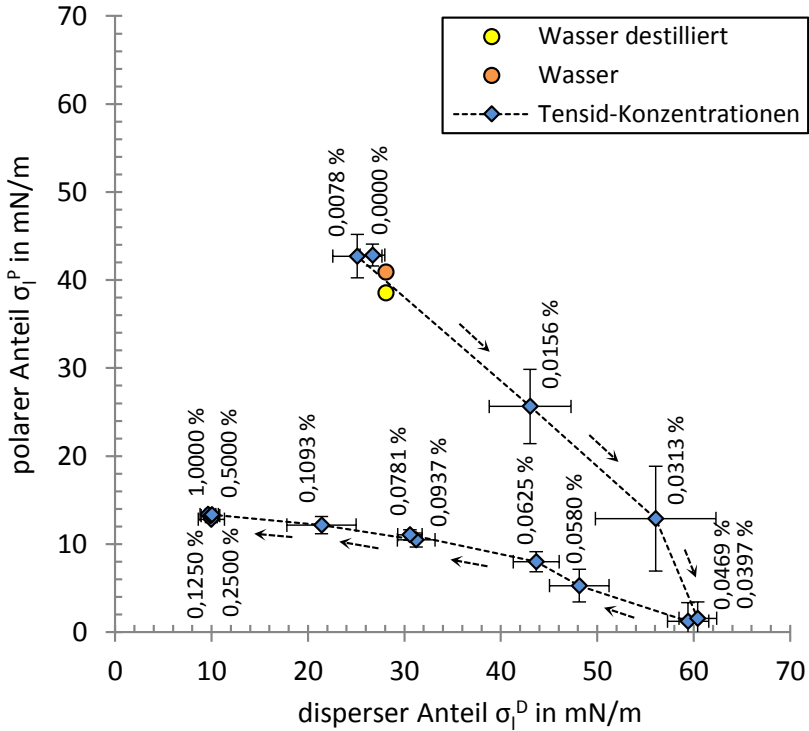
Bei der Betrachtung von Abbildung 50 zeigt sich, dass sich Salzkonzentrationen erst ab sehr hohen Werten ( $> 8$  Ma.-%) auf die Oberflächenspannung, wenn auch nur in geringem Ausmaß, auswirken.



**Abbildung 50:** Gesamtoberflächenspannung der wässrigen Salzlösung über der Salzkonzentration (Fehlerindikatoren für  $\pm 1\sigma$ )

In Abbildung 51 sind die nach Fowkes (siehe Kapitel 5.3.1.2) ermittelten dispersen und die über (15) bestimmten polaren Anteile der Oberflächenspannung der wässrigen Tensidlösungen dargestellt.

In der gewählten Darstellungsweise sind die polaren Anteile der Oberflächenspannung über die dispersen Anteile mit der Tensid-Konzentration als Laufvariablen aufgetragen. Die gestrichelte Linie zwischen den einzelnen Messpunkten veranschaulicht in Kombination mit den gestrichelten Pfeilen die Auswirkung steigender Tensid-Konzentrationen auf die dispersen und polaren Anteile der Oberflächenspannung.



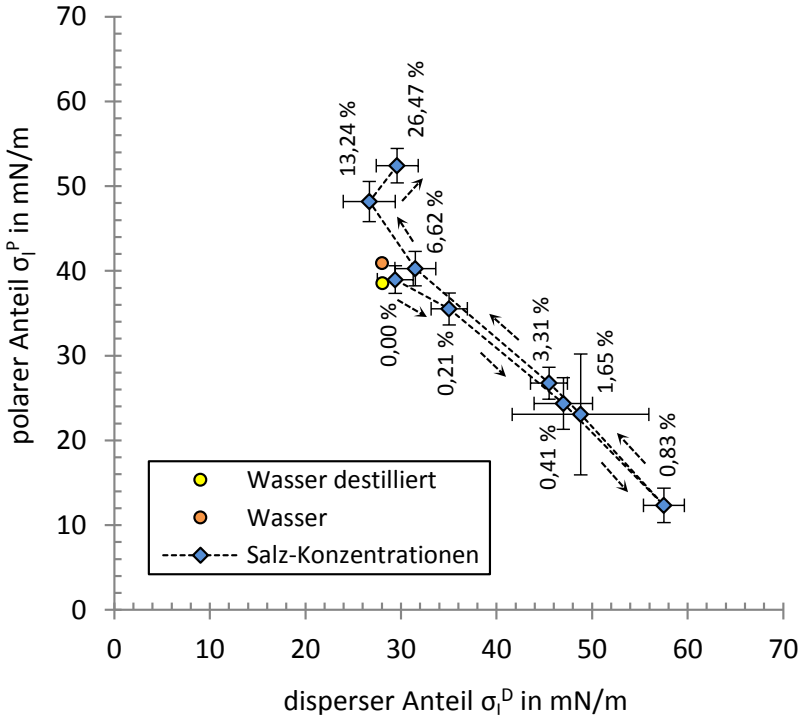
**Abbildung 51:** Aufteilung der Gesamtoberflächenspannung in polare und disperse Anteile für unterschiedliche Tensid-Konzentrationen (Fehlerindikatoren für  $\pm 1\sigma$ )

Mit der Zugabe von Tensid zum reinen Wasser zeigt sich bis zu einer kritischen Konzentration (hier ca. 0,04 Ma.-%) ein Abfall des polaren Anteils (auf nahezu 0) beim gleichzeitigen Erreichen des maximalen dispersen Anteils der Oberflächenspannung. Zu höheren Tensidkonzentrationen (> 0,04 Ma.-%) fällt der disperse Anteil wieder stark ab, während der polare Anteil wieder leicht ansteigt. Ab einer Tensidkonzentration von ca. 0,125 Ma.-% sind keine weiteren Veränderungen der Anteile der Oberflächenspannung erkennbar. Der beschriebene und in Abbildung 51 ersichtliche Einfluss der Tensid-Konzentration auf die dispersen und polaren Anteile der

Oberflächenspannung wird bei den weiteren Auswertungen in dieser Arbeit berücksichtigt, die Ursachen für diesen Verlauf werden jedoch nicht näher beleuchtet. Bei der Betrachtung von Abbildung 51 und Abbildung 49 ist zu erkennen, dass bereits relativ geringe Tensid-Konzentrationen ( $< 0,0313$  Ma.-%) zur Veränderung der dispersen und polaren Anteile der Oberflächenspannung führen, während die Gesamtoberflächenspannung hiervon offenbar unverändert bleibt. Bei hohen Tensid-Konzentrationen ( $> 0,125$  Ma.-%) verändern sich die einzelnen Energieanteile (siehe Abbildung 51) wie auch die Gesamtoberflächenspannung (siehe Abbildung 49) nicht weiter.

Analog zur Abbildung 51 wird der Einfluss der Salzkonzentration auf die dispersen und polaren Anteile der Oberflächenspannung der wässrigen Salzlösungen in Abbildung 52 dargestellt. Die gestrichelte Linie zwischen den einzelnen Messpunkten veranschaulicht in Kombination mit den gestrichelten Pfeilen analog zu Abbildung 51 die Auswirkung steigender Salzkonzentrationen auf die dispersen und polaren Anteile der Oberflächenspannung. Auch bei den wässrigen Salzlösungen zeigt sich, dass eine Veränderung der Salzkonzentration zu einer Veränderung der dispersen und polaren Anteile der Oberflächenspannung führt, während die Gesamtoberflächenspannung (vgl. Abbildung 50) gleichzeitig nahezu unverändert bleibt.

Im Fall der wässrigen Salzlösungen ist bemerkenswert, dass die Zugabe von Salz zum reinen Wasser offenbar bis zu einer bestimmten Konzentration (hier ca.  $0,83$  Ma.-%) zunächst zum Absinken des polaren Anteils und zum Ansteigen des dispersen Anteils der Oberflächenspannung führt. Bei der weiteren Erhöhung der Salzkonzentration ist zu beobachten, dass sich dieser Effekt umkehrt. Auch die Ursache dieses Effektes wird innerhalb dieser Arbeit nicht näher betrachtet.



**Abbildung 52:** Aufteilung der Gesamtoberflächenspannung in polare und disperse Anteile für unterschiedliche Salz-Konzentrationen (Fehlerindikatoren für  $\pm 1\sigma$ )

Die Abbildung 51 und Abbildung 52 veranschaulichen jeweils, in welchen Grenzen die oberflächenenergetischen Eigenschaften des Zwischenmediums Wasser durch Tensid- bzw. Salzzusätze verändert werden können.

Für die weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit werden aufgrund des vielfältigen Einflusses und aus Gründen der einfacheren Herstell- und Handhabbarkeit ausschließlich Zwischenmedien mit unterschiedlichen Tensidzusätzen erzeugt und bei Reibungsuntersuchungen am GAT in den Kontakt zwischen Gummirädchen und Fahrbahn eingeleitet, um

den Einfluss der Oberflächenspannung flüssiger Zwischenmedien auf die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn zu untersuchen.

## 5.4 Charakterisierung des Benetzungszustandes von Festkörpern

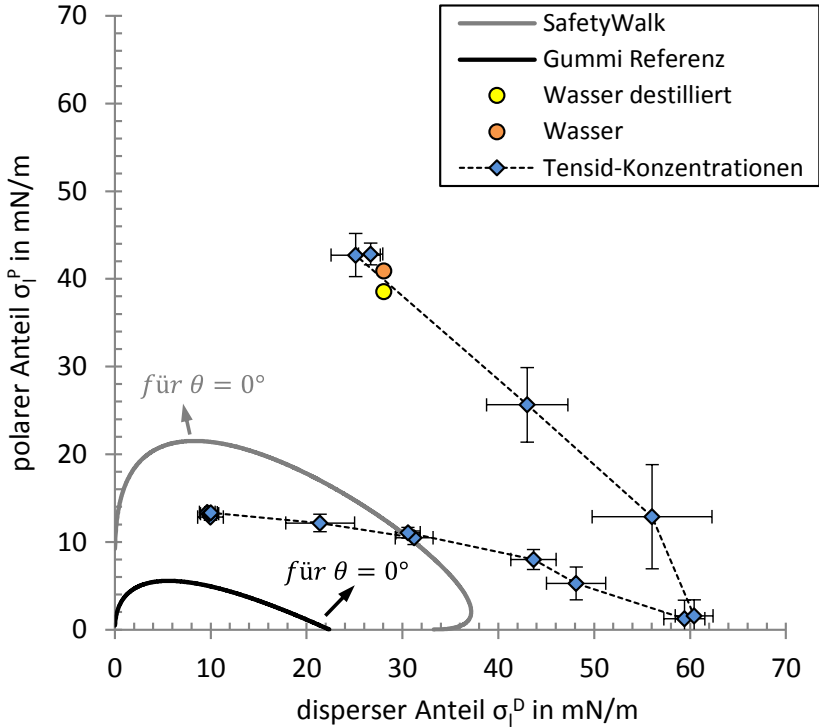
Im Kapitel 5.2 wurden die oberflächenenergetischen Eigenschaften von Festkörpern und im Kapitel 5.3 die von Flüssigkeiten charakterisiert. In diesem Kapitel wird nun der Benetzungszustand von Festkörperoberflächen betrachtet, auf die die hergestellten wässrigen Tensidlösungen aufgebracht werden. Hierzu wird im ersten Schritt eine Methode vorgestellt, mit welcher der Benetzungszustand von Festkörperoberflächen visuell dargestellt werden kann. Im Weiteren werden Kenngrößen vorgestellt, die zur Charakterisierung des Benetzungszustandes herangezogen werden können.

### 5.4.1 Benetzbarkeitsbereich (Wetting Envelope)

Nach HLAWACEK [Hla 05] (vgl. [Juh 11] und [Bil 06]) ist die Wetting Envelope eine spezielle Darstellungsweise des Kontaktwinkels sowie der dispersen und polaren Anteile der freien Oberflächenenergie von Festkörpern. Dieser Darstellungsweise liegt die Annahme zugrunde, dass eine Flüssigkeit eine Oberfläche vollständig benetzt, wenn die Adhäsionsarbeit zwischen der Flüssigkeit und dem Festkörper mindestens genauso groß ist wie die Kohäsionsarbeit innerhalb der Flüssigkeit.

Zur Bestimmung der Wetting Envelope wird die Rechenvorschrift nach OWRK (16) umgekehrt, d.h. es werden die bekannten Anteile der freien Oberflächenenergie eines Festkörpers ( $\sigma_s^D$  und  $\sigma_s^P$ ) ein- sowie der Kontaktwinkel ( $\theta$ ) zu  $0^\circ$  gesetzt. Durch die sich ergebende Rechenvorschrift kann zu jedem dispersen Anteil ( $\sigma_i^D$ ) ein polarer Anteil ( $\sigma_i^P$ ) bestimmt werden, bei dem der Übergang zur vollständigen

Benetzung auftritt. Der Kurvenverlauf, der sich durch die Auftragung der ermittelten Wertepaare ergibt (siehe Abbildung 53, exemplarisch für SafetyWalk und das Referenzgummi), veranschaulicht das Benetzungsverhalten der Festkörper.



**Abbildung 53:** Benetzungszustand (Wetting Envelope) der Festkörperoberflächen SafetyWalk und Referenz-Gummi mit den wässrigen Tensidlösungen

Die Kurvenverläufe sowie die darin eingeschlossenen Flächen der beiden exemplarischen Festkörperoberflächen kennzeichnen alle Kombinationen der dispersen und polaren Anteile der Oberflächenspannung von Flüssigkeiten, die auf der jeweiligen Festkörperoberfläche zu einem Kontaktwinkel von  $0^\circ$  und damit zur

vollständigen Benetzung führen würden. Liegen die Anteile der Oberflächenspannung von Flüssigkeiten (Kombination von  $\sigma_l^D$  und  $\sigma_l^P$ ) außerhalb des Kurvenverlaufes, dann liegt auf diesem Festkörper keine vollständige Benetzung und damit ein Kontaktwinkel von  $> 0^\circ$  vor. Je weiter der die Flüssigkeit charakterisierende Punkt ( $\sigma_l^D$  und  $\sigma_l^P$ ) vom Kurvenverlauf entfernt ist, umso schlechter wird diese Festkörperoberfläche benetzt und umso größer ist der sich ergebende Kontaktwinkel.

Bei den beiden exemplarischen Festkörperoberflächen handelt es sich um die beiden Reibpartner, die bei den Reibuntersuchungen am GAT zum Einsatz kommen (vgl. Kapitel 6). Werden nun zusätzlich die Anteile der Oberflächenspannung der wässrigen Tensidlösungen (siehe Abbildung 51) eingetragen, welche ebenfalls bei Reibuntersuchungen am GAT als Zwischenmedien zum Einsatz kommen, kann der Benetzungszustand der Festkörperoberflächen (Reifen und Fahrbahn) unmittelbar visuell beurteilt werden.

Aus Abbildung 53 und Abbildung 51 ist ersichtlich, dass das Wasser mit der höchsten Oberflächenspannung (ohne Tensidzusatz) am weitesten von beiden Kennlinien entfernt ist und damit die beiden Festkörperoberflächen (SafetyWalk und Referenzgummi) am schlechtesten benetzt. Durch die Zugabe von Tensiden (bis 0,04 Ma.-%) zum reinen Wasser verändern sich die dispersen und polaren Anteile der Oberflächenspannung des wässrigen Gemisches (Tensid & Wasser), wodurch die Benetzung der Festkörperoberflächen (vergleiche die Abstände zwischen den Flüssigkeiten und den Festkörperkennlinien) jedoch kaum beeinflusst wird. Bei höheren Tensidkonzentrationen ( $> 0,04$  Ma.-%) reduziert sich der Abstand zwischen den Flüssigkeiten und den Festkörperkennlinien, was bedeutet, dass die Festkörperoberflächen besser benetzt werden und sich kleine Kontaktwinkel ergeben. Bei Tensidkonzentrationen ab ca. 0,08 Ma.-% wird die SafetyWalk-Oberfläche vollständig benetzt, wohingegen die Gummioberfläche nie vollständig, jedoch mit steigender Konzentration

immer besser benetzt wird. Ab Konzentrationen von 0,125 Ma.-% sind keine Veränderungen mehr zu beobachten.

## 5.4.2 Kenngrößen zur Charakterisierung des Benetzungszustandes

Zur Charakterisierung des Benetzungszustandes einer Festkörperoberfläche kann im ersten Schritt der Kontaktwinkel (vgl. Abbildung 44) herangezogen werden. Mit dessen Kenntnis sowie der Kenntnis der oberflächenenergetischen Eigenschaften der Flüssigkeit sowie der Festkörperoberfläche können jedoch je nach Anwendungsfall weitere Kenngrößen bestimmt werden, auf die in diesem Kapitel eingegangen wird.

### 5.4.2.1 Definition der Adhäsionsarbeit

Nach [Krü 15] ist die Adhäsionsarbeit die Arbeit, die aufgebracht werden muss, um zwei in Kontakt stehende Phasen voneinander zu trennen (Bsp. Arbeit zur Entfernung eines Wasserfilms von einer Festkörperoberfläche). In umgekehrter Richtung ist sie, im Fall der Flüssig-Fest-Phasengrenze, die Arbeit, die frei wird, wenn eine Oberfläche von einer Flüssigkeit benetzt wird.

Über die Gleichung nach YOUNG-DUPRÉ (19) kann die Adhäsionsarbeit zwischen einer flüssigen und einer festen Phase wie folgt bestimmt werden (vgl. auch [Sch 95], [Isr 11] und [Zel 13]).

$$W_{adh} = \sigma_{l,ges} * (1 + \cos\theta) \quad (19)$$

### 5.4.2.2 Definition der Kohäsionsarbeit

Gemäß Dupré ist die Kohäsionsarbeit nach [Krü 15] die Arbeit, die notwendig ist, um eine homogene Flüssigkeit zu teilen bzw. deren Oberfläche zu vergrößern. Die Kohäsionsarbeit lässt sich aus der



Oberflächenspannung über (20) bestimmen (vgl. auch [Har 19], [Hla 05] und [Isr 11]).

$$W_{koh} = 2 * \sigma_{l,ges} \quad (20)$$

### 5.4.2.3 Bestimmung der totalen Adhäsionsarbeit

Nach MAZZOLA [Maz 13] existiert derzeit kein analytisches Modell, das die Adhäsionskomponente im nassen Kontakt berücksichtigt. Er untersuchte in seiner Forschung unter anderem den Einfluss der freien Oberflächenenergie und des Benetzungszustandes auf die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn. Zu diesem Zweck definiert er die totale Adhäsionsarbeit  $W_{TOT}^{adh}$  als Summe aus der Adhäsionsarbeit an der benetzten Gummioberfläche  $W_{adh,Gummi}$ , der Adhäsionsarbeit an der benetzten Fahrbahnoberfläche  $W_{adh,Fahrbahn}$  und der Kohäsionsarbeit  $W_{koh,ZM}$  im flüssigen Zwischenmedium (siehe (21)). Die totale Adhäsionsarbeit muss aufgebracht werden, um die Oberflächen der beteiligten Festkörper zu entnetzen und das Zwischenmedium zu scheren, um damit trockenen Reibkontakt zu ermöglichen bzw. herzustellen.

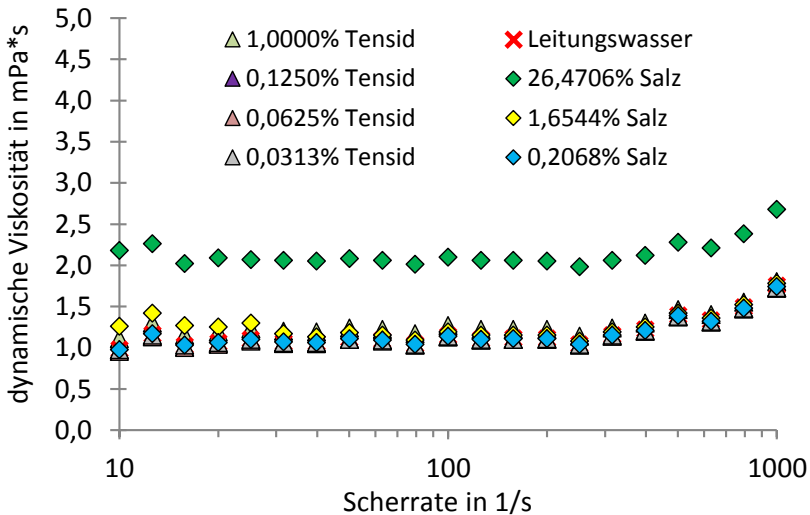
$$W_{TOT}^{adh} = W_{adh,Gummi} + W_{adh,Fahrbahn} + W_{koh,ZM} \quad (21)$$

Durch Einsetzen von (19) und (20) in (21) ergibt sich der mathematische Zusammenhang (22), mit welchem die totale Adhäsionsarbeit in Abhängigkeit der auf den Oberflächen zu erwartenden Kontaktwinkel und der Oberflächenspannung des Zwischenmediums bestimmt werden kann.

$$W_{TOT}^{adh} = 4\sigma_{l,ges} + \sigma_{l,ges} (\cos\theta_{Gummi} + \cos\theta_{Fahrbahn}) \quad (22)$$

## 5.5 Dynamische Viskosität

Wie bereits in Kapitel 1.1 erwähnt, soll in dieser Arbeit der Einfluss der Oberflächenspannung flüssiger Zwischenmedien auf den maximalen Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn untersucht werden. Durch die Charakterisierung der oberflächenenergetischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (siehe Kapitel 5.3) wurde gezeigt, dass sowohl die Zugabe von Salz als auch von Tensiden zum reinen Wasser zur Veränderung dessen oberflächenenergetischen Eigenschaften führt.



**Abbildung 54:** Dynamische Viskosität über der Scherrate für unterschiedliche Tensid- bzw. Salzkonzentrationen im Leitungswasser bei Raumtemperatur (ca. 20 °C)

Durch Untersuchungen zur dynamischen Viskosität soll an dieser Stelle sichergestellt werden, dass es durch die Zugabe von Salz bzw. Tensiden zum reinen Wasser ausschließlich zur Veränderung dessen oberflächenenergetischen Eigenschaften und nicht zur Veränderung dessen dynamischen Viskosität führt. In Abbildung 54 ist die dynamische Viskosität für unterschiedliche Tensid- bzw.

Salzkonzentrationen über der Scherrate (charakteristische Größe der Schergeschwindigkeit) aufgetragen. Die zugrundeliegenden empirischen Untersuchungen wurden am Fraunhofer-Institut für Werkstoffkunde (IWM) in Freiburg durchgeführt. Hierbei kam das Rheometer „Paar Physica MCR 501“ des Unternehmens Anton Paar zum Einsatz.

Die abgebildeten Kurvenverläufe zeigen, dass die dynamische Viskosität des Wassers durch die Zugabe höherer Salzkonzentrationen (bei 26,47 Ma.-%) verhältnismäßig stark beeinflusst wird, wohingegen sich die maximale Zugabe von Tensiden (bis zu 1 Ma.-%) diesbezüglich nahezu nicht auswirkt. Bezogen auf das Leitungswasser (Mittelwert der dynamischen Viskosität über alle Scherraten = 1,17 mPa\*s), ergeben sich diesbezüglich, abhängig von der Salzkonzentration (26,47 Ma.-%, 1,64 Ma.-% und 0,21 Ma.-%), unterschiedliche Werte der mittleren Abweichung (0,9692 mPa\*s, 0,0931 mPa\*s und -0,0005 mPa\*s). Bezogen auf die unterschiedlichen Tensidkonzentrationen (1,00 Ma.-%, 0,13 Ma.-%, 0,06 Ma.-%, 0,03 Ma.-%) ergeben sich vergleichsweise deutlich kleinere Werte (0,1102 mPa\*s, -0,0122 mPa\*s, -0,0148 mPa\*s, -0,0039 mPa\*s).

Zusammengefasst zeigen die Untersuchungen in Kapitel 5.4 und Kapitel 5.5 zum Einfluss der Salz- bzw. der Tensidkonzentration auf die oberflächenenergetischen sowie die rheologischen Eigenschaften des Zwischenmediums Wasser, dass mit der Zugabe von Tensiden bis zu Konzentrationen von 0,125 Ma.-% die oberflächenenergetischen Eigenschaften in weiten Bereichen variiert werden können, ohne gleichzeitig die dynamische Viskosität des Wasser zu verändern.



## **6. Parameterstudien am GAT und Diskussion der Ergebnisse**

In diesem Kapitel werden Parameterstudien vorgestellt, die zur Untersuchung des Einflusses der Oberflächenspannung flüssiger Zwischenmedien auf den maximalen Reibschluss (Seitenkraftbeiwert) zwischen Reifen und Fahrbahn durchgeführt wurden.

### **6.1 Versuchsdurchführung**

Die Versuchsprozedur der durchgeführten empirischen Einzeluntersuchungen entspricht der in Kapitel 4.1.3.1 vorgestellten Vorgehensweise zur Ermittlung von Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennlinien am GAT.

Um vorrangig den Einfluss der oberflächenenergetischen Eigenschaften des Zwischenmediums und nicht der beteiligten Festkörperoberflächen (Reibflächen) zu beleuchten, wurden ausschließlich Reibungsuntersuchungen mit einer Gummiprobe (profilloses Gummirad aus dem Referenzgummi, Shore-A-Härte 72) auf einer Fahrbahnoberfläche (entschärfter SafetyWalk,  $R_a = 15,5 \mu\text{m}$  (arithmetischer Mittenrauwert), siehe (6)) durchgeführt. Bei der verwendeten Fahrbahnoberfläche handelt es sich um die Oberfläche, die bereits bei den Untersuchungen zur Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse vom GAT auf den IPS eingesetzt wurde (siehe Kapitel 4.2). Damit kann erwartet werden, dass sich deren Polierzustand während der Parameterstudien nur noch minimal ändert und sich damit auf die Untersuchungsergebnisse nur wenig auswirkt. Alle Untersuchungen fanden auf nasser Fahrbahn bei gleichem Wasservolumenstrom (4 l/min) und der Temperatur der

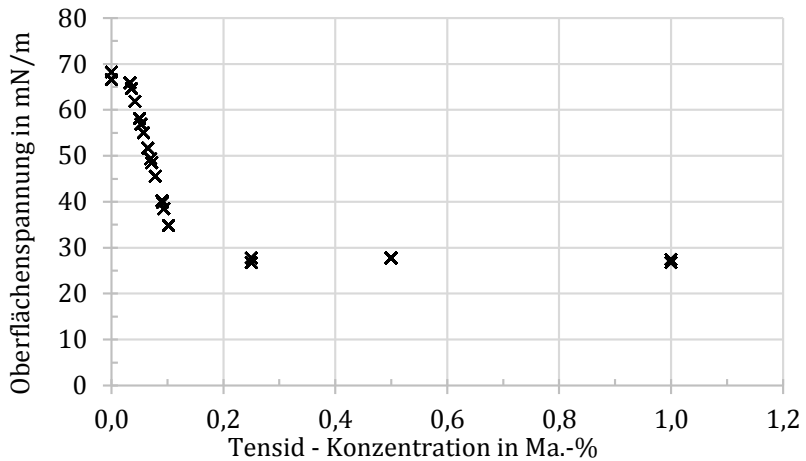
Zwischenmedien von 20 °C statt. Die Umgebungstemperatur wurde nicht temperiert und aufgezeichnet, kann aber mit der Raumtemperatur von ca. 20 °C abgeschätzt werden.

Die oberflächenenergetische Charakterisierung der Fahrbohn-oberfläche wurde nach den eigentlichen Reibungsuntersuchungen am GAT durchgeführt. Es wird davon ausgegangen, dass die ermittelten Energieanteile (dispenser und polarer Anteil) konstant über alle durchgeführten Untersuchungen vorlagen und die Veränderungen der Benetzungseigenschaften der Festkörperoberflächen vernachlässigt werden können. Die Gültigkeit dieser Annahmen wird dadurch begründet, dass vor der Durchführung jedes einzelnen Versuchsblockes jeweils eine mindestens 30 minutige Einfahrprozedur durchgeführt wurde, um sicherzustellen, dass sich die Versuchsvorrichtung (Rädchen und Fahrbohn) im Gleichgewichtszustand befindet und reproduzierbare Untersuchungsergebnisse erwartet werden können. Diese Annahmen werden zusätzlich durch Abbildung 29 untermauert, die zeigt, dass die Referenz-Gummimischung, die auch für die folgenden Untersuchungen verwendet wurde, bereits nach wenigen Messungen sehr ergebnisstabil ist. Weiterhin wird angenommen, dass das Benetzungsverhalten von Festkörperoberflächen ausreichend genau auf Basis der statischen Kontaktwinkelmessung ermittelt werden kann und dass das Benetzungsverhalten der verwendeten Festkörperoberflächen als homogen betrachtet werden kann.

## 6.2 Parametervariationen

In diesem Kapitel werden die Parametervariationen vorgestellt, die zur Untersuchung des Einflusses der oberflächenenergetischen Eigenschaften und damit der Benetzungseigenschaften flüssiger Zwischenmedien auf die Reibung zwischen Reifen und Fahrbohn durchgeführt wurden. Bei der Versuchsdurchführung wurde ein randomisierter und vollsymmetrischer Versuchsplan angewandt.

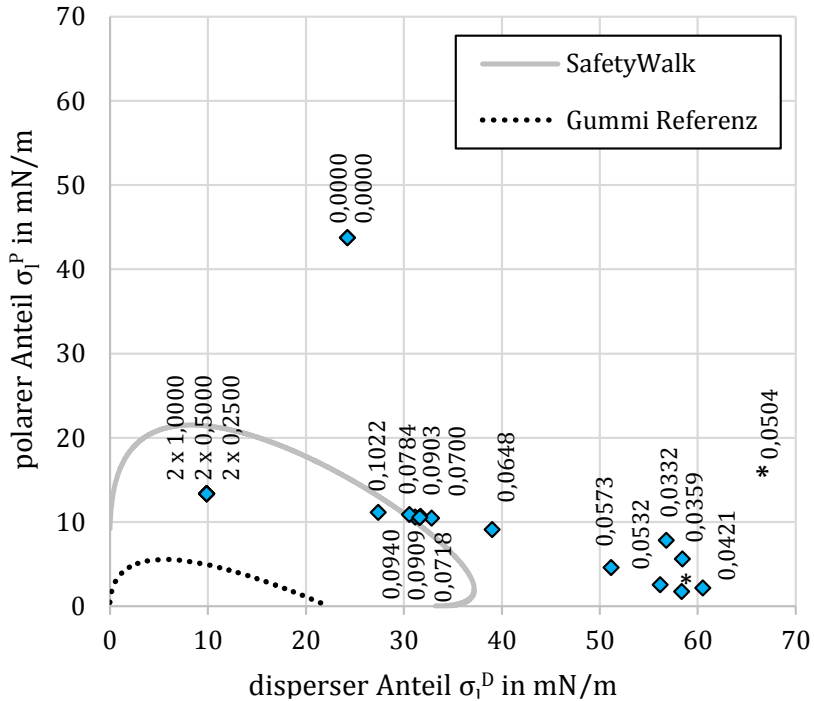
Bei den Untersuchungen wurden wässrige Tensidlösungen als Zwischenmedien erzeugt und am GAT bei der Ermittlung der Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennlinien definiert in den Kontakt zwischen Gummirad und Fahrbahnoberfläche eingeleitet. Dem reinen Wasser wurden dabei unterschiedliche Tensidmengen (maximale Konzentration von ca. 1 Ma.-%, siehe Kapitel 5.3.2) zugesetzt.



**Abbildung 55:** Oberflächenspannung der flüssigen Zwischenmedien (wässrige Tensidlösungen) bei Untersuchungen am GAT

Bei der Versuchsdurchführung am GAT wurde aufgrund des gewählten Volumenstroms (4 l/min) mit welchem das Zwischenmedium in den Kontakt eingeleitet wird, der relativ langen Einzelversuchsdauer (von ca. 1 Minute) und der großen Anzahl an Parametervariationen je Tensidkonzentration (jeweils 32 Einzelmessungen) sehr große Mengen des jeweiligen Zwischenmediums benötigt. Diese wurden in einem Vorratsbehälter erzeugt und zur Absicherung wurden deren oberflächenenergetische Eigenschaften über die Steighöhenmethode charakterisiert. Dabei wurden die Kurvenverläufe der Abbildung 49 und der Abbildung 51 zugrunde gelegt und die in Abbildung 55 und

Abbildung 56 oberflächenenergetischen Eigenschaften (polare und disperse Anteile) über Polynom-Interpolation ermittelt. Auf die erneute empirische Bestimmung der polaren und dispersen Anteile konnte somit verzichtet werden.



**Abbildung 56:** Polare und disperse Anteile der Oberflächenspannung der flüssigen Zwischenmedien (wässrige Tensidlösungen) bei den empirischen Untersuchungen am GAT (mehrfach untersuchte Tensidkonzentrationen sind mit vorangestelltem „2 x“ markiert)

In den Abbildung 55 und Abbildung 56 ist erkennbar, dass die erzeugten und am GAT bei Reibungsuntersuchungen verwendeten wässrigen Tensidlösungen die in Abbildung 49 und Abbildung 51 ermittelten Kurvenverläufe geeignet repräsentieren und gleichzeitig



die maximal möglichen Spreizungen der dargestellten Parameter weitestgehend ausnutzen.

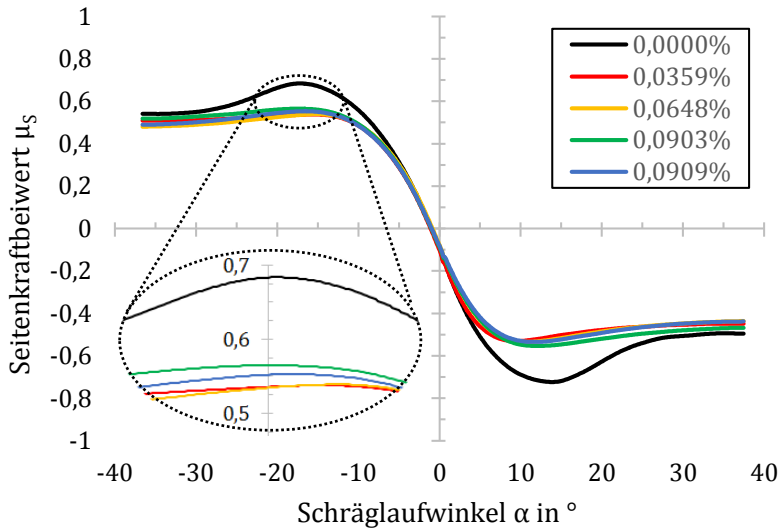
Weiterhin sind in Abbildung 56 die Kurvenverläufe für die beiden Festkörperoberflächen (SafetyWalk und Referenzgummi) zur Bewertung der „Wetting Envelope“ eingefügt (vgl. hierzu auch Abbildung 53). Es ist erkennbar, dass die Fahrbahnoberfläche ab einer Tensidkonzentration von ca. 0,09 % vollständig benetzt wird, während der Zustand der vollständigen Benetzung auf der Oberfläche der Gummiprobe bei keinem Zwischenmedium vorliegt.

Die in dieser Arbeit erzeugten wässrigen Tensid-Lösungen wurden wie bereits erwähnt außerhalb des Prüfstandes vor der Versuchsdurchführung in einem großen Vorratsbehälter (ca. 300 l Volumen) erzeugt und während der Untersuchungen über ein Pumpensystem in den Kontakt eingeleitet. Um der Problematik der Überschusskonzentration (Tensid lagert sich zeitabhängig vermehrt an der Oberfläche an, siehe [Krü 15]) entgegenzuwirken, wurde der Vorratsbehälter während der Untersuchungen ständig umgewälzt. Probemessungen mittels Steighöhenmethode zeigten schließlich, dass durch die gewählte Vorgehensweise weitestgehend eine homogene Zusammensetzung des Gemisches erreicht wird.

Als weitere Parametervariationen wurden innerhalb des Versuchsprogramms Untersuchungen zum Einfluss der Geschwindigkeit (5; 15; 25; 35 km/h) und der Flächenpressung (0,36; 0,52; 0,63; 0,73 N/mm<sup>2</sup>) durchgeführt, da erwartet werden kann, dass sich die Benetzungseigenschaften des flüssigen Zwischenmediums auch wechselwirkend mit der Geschwindigkeit bzw. mit der Flächenpressung im Reibkontakt auf den maximalen Reibwert auswirken.

### 6.3 Exemplarische Ergebnisse von Einzeluntersuchungen

In Abbildung 57 sind exemplarisch Einzeluntersuchungen für unterschiedliche Zwischenmedien (unterschiedliche Tensidkonzentrationen) bei einer mittleren Flächenpressung von ca.  $0,65 \text{ N/mm}^2$  und einer Geschwindigkeit von  $5 \text{ km/h}$  abgebildet.



**Abbildung 57:** Exemplarische Untersuchungsergebnisse zum Einfluss der Tensidkonzentration auf den Seitenkraftbeiwert am GAT

Die Ergebnisse zeigen, dass der maximale Seitenkraftbeiwert, ausgehend von reinem Wasser ( $0,0000 \%$  Tensid), bereits durch die Zugabe sehr geringer Tensidkonzentrationen (hier bei  $0,0359 \%$ ) deutlich abfällt. Bei der Betrachtung des vergrößerten Bildausschnittes ist erkennbar, dass der maximale Seitenkraftbeiwert, nach dem bereits erwähnten Abfall, nicht monoton von der Tensidkonzentration beeinflusst wird. Mit ansteigender Tensidkonzentration steigt der

Seitenkraftbeiwert von 0,0359 % bis 0,0903 % zunächst an und fällt zu noch höheren Konzentrationen wieder ab.

Die gezeigten Kurvenverläufe verdeutlichen, dass allein die Betrachtung des Einflusses der Tensidkonzentration (hier exemplarisch anhand weniger Einzelmessungen) zu keinem besseren Verständnis des betrachteten Sachverhaltes führt.

Aus diesem Grund werden die durchgeführten Untersuchungen in den folgenden Unterkapiteln auf Basis des mittleren maximalen Reibwertes mittels mathematisch-statistischer Modellbildung weiter analysiert und der Einfluss unterschiedlicher Parameter näher betrachtet.

## **6.4 Mathematisch-statistische Modellbildung**

Im Folgenden werden die durchgeführten Untersuchungen bezüglich des mittleren maximalen Seitenkraftbeiwertes einzeln ausgewertet (siehe Kapitel 4.1.3.1) und mittels multipler linearer Regressionsanalyse mathematisch-statistische Zusammenhänge zwischen dem mittleren maximalen Seitenkraftbeiwert und den untersuchten Einflussparametern aufgedeckt.

### **6.4.1 Modellansatz und Schätzung der Regressionskoeffizienten**

Neben der Geschwindigkeit und der mittleren Flächenpressung wurden anstelle der Tensidkonzentration im flüssigen Zwischenmedium verschiedene Parameter bestimmt, die zur Ermittlung der nach MAZOLLA [Maz 13] definierten totalen Adhäsionsarbeit (siehe (21)) benötigt werden.

Hierzu wurde im ersten Schritt, basierend auf den polaren und dispersen Anteilen der untersuchten Zwischenmedien (siehe

Abbildung 56) und den bekannten polaren und dispersen Anteilen der beiden beteiligten Festkörper (Fahrbahnoberfläche und Gummiprobe) über den nach OWENS und WENDT [Owe 69] formulierten mathematischen Zusammenhang (siehe (16)) jeweils die Kontaktwinkel berechnet, die sich bei den erzeugten Zwischenmedien erwartungsgemäß zum einen auf der Fahrbahnoberfläche als auch auf der Gummioberfläche ausbilden werden. Über die Kontaktwinkel sowie die bekannten Gesamtoberflächenspannungen der flüssigen Zwischenmedien wurde für jedes Zwischenmedium über die Gleichung nach YOUNG-DUPRÉ (19) jeweils die Adhäsionsarbeit zur Entnetzung (Arbeit zur Trennung von flüssiger und fester Phase) der Fahrbahnoberfläche als auch der Gummioberfläche ermittelt. Die Kohäsionsarbeit der Zwischenmedien ergab sich über die Gleichung nach DUPRÉ (siehe (20)).

In (23) ist der Modellansatz angeführt, der im ersten Schritt zur Beschreibung der Zusammenhänge zwischen dem mittleren maximalen Seitenkraftbeiwert  $\mu_{S,max,mittel}$  und den Untersuchungsparametern herangezogen wurde.

Bei den Untersuchungsparametern handelt es sich um die Geschwindigkeit  $v$ , die Flächenpressung  $p$ , die Benetzungszustände der Fahrbahn und der Gummiprobe, beschrieben durch die jeweilige notwendige Adhäsionsarbeit  $W_{adh,Gummi}$  bzw.  $W_{adh,Fahrbahn}$  zur Entnetzung sowie der Kohäsionsarbeit  $W_{koh,ZM}$  des Zwischenmediums. Die Koeffizienten  $a_i$  stellen die zu schätzenden Regressionskoeffizienten dar.

$$\begin{aligned}
 \mu_{S,max,mittel} = & +a_0 \\
 & +a_1 * v + a_2 * v^2 \\
 & +a_3 * p \\
 & +a_4 * W_{adh,Gummi} + a_5 * W_{adh,Fahrbahn} \\
 & +a_6 * W_{koh,ZM}
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

Bei den durchgeführten Parameterstudien wurde die Geschwindigkeit  $v$  im Bereich von 5 bis 35 km/h, die Flächenpressung  $p$  im Bereich von 0,33 bis 0,77 N/mm<sup>2</sup>, die Adhäsionsarbeiten zur Entnetzung des Gummis und der Fahrbahn  $W_{\text{adh,Gummi}}$  bzw.  $W_{\text{adh,Fahrbahn}}$  in den Bereichen von 46,6 bis 73,6 mN/m bzw. 77,1 bis 102,8 mN/m und die Kohäsionsarbeit im Bereich von 77,1 bis 136,0 mN/m variiert. Die Variation der beiden Adhäsionsarbeiten sowie der Kohäsionsarbeit erfolgte über die Variation der Tensidkonzentration.

Beim Vergleich von Gleichung (21) und Gleichung (23) ist erkennbar, dass die Einzelkomponenten der nach MAZOLLA [Maz 13] definierten totalen Adhäsionsarbeit  $W_{\text{TOT}}^{\text{adh}}$  ebenfalls in Gleichung (23) enthalten sind (Summe der letzten drei Terme). Bei der Berücksichtigung der totalen Adhäsionsarbeit als einzelнем Eingangparameter (exakte Definition nach MAZOLLA) zeigte sich, dass sich diese, bei der hier vorliegenden Datenbasis, nicht signifikant auf die Ausgangsgröße auswirkt.

In dem in dieser Arbeit vorgestellten Ansatz wurde jede Einzelkomponente der totalen Adhäsionsarbeit separat berücksichtigt und jeweils separat ein Regressionskoeffizient geschätzt. Die Aufteilung wird aufgrund der im Kapitel 3.1.4 formulierten Forschungshypothesen vorgenommen. In den Forschungshypothesen zum Vier-Zonen-Modell wird davon ausgegangen, dass sich die Benetzungszustände sowohl der Gummi- als auch der Fahrbahnoberfläche auf die Ausprägung der Zone 3 (Übergangszone „feucht“) und die Kapillarwirkung auf die Zone 2 (Übergangszone „nass“) auswirken. Da die Adhäsionsarbeit als Maß für den Benetzungszustand und die Kohäsionsarbeit als Maß für die Kapillarwirkung (vgl. (17) & (20)) verstanden werden können, ist es an dieser Stelle sinnvoll, den Einfluss der genannten Größen auf den maximalen Seitenkraftbeiwert unabhängig voneinander zu berücksichtigen bzw. zu schätzen.

Die separate Berücksichtigung der beiden Adhäsionsarbeiten (Gummi- und Fahrbahnoberfläche) wird vorgenommen, um abschätzen zu

können, ob sich der Benetzungszustand beider Festkörperoberflächen vergleichbar auf den mittleren maximalen Seitenkraftbeiwert auswirkt.

Bei der Schätzung dieses Modellansatzes (Modell (23)) zeigte sich, dass sich der Benetzungszustand der Fahrbahnoberfläche, beschrieben durch die Adhäsionsarbeit  $W_{adh,Fahrbahn}$ , nicht signifikant auf den maximalen Seitenkraftbeiwert auswirkt. Dies kann möglicherweise auf die Fahrbahnoberflächenstruktur (Fahrbahntextur) zurückgeführt werden, da diese vermutlich zu Inhomogenitäten bezüglich des Benetzungsverhaltens führt, was in dieser Arbeit jedoch nicht näher berücksichtigt und untersucht wurde. Weiterhin wäre auch denkbar, dass sich während der empirischen Untersuchungen Gummi auf der Fahrbahnoberfläche anlagert und/oder sich der Fahrbahnpolierzustand ändert, was ebenfalls Auswirkungen auf die Benetzbarkeit haben könnte. Damit wären dann die ermittelten oberflächenenergetischen Eigenschaften (polarer und disperser Anteil der freien Oberflächenenergie) zur Beschreibung der Benetzbarkeit für die vorliegende Fahrbahnoberfläche nicht mehr repräsentativ und damit ungeeignet.

Dies bedeutet jedoch nicht, dass der Benetzungszustand der Fahrbahnoberfläche im Allgemeinen keine Auswirkungen auf den maximalen Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn hat. Bei der hier vorliegenden Datenbasis, die nur Untersuchungen auf dieser einen Fahrbahnoberfläche enthält, zeigt sich jedoch dieser Effekt. Alle anderen berücksichtigten Eingangsgrößen wirken sich, beim Vertrauensbereich von 99 %, signifikant auf die Ausgangsgröße aus.

Zur Erhöhung der Modellgüte wurde bei der weiteren Beschreibung der statistischen Zusammenhänge der Einfluss der Adhäsionsarbeit zur Entnetzung der Fahrbahnoberfläche  $W_{adh,Fahrbahn}$  (aufgrund fehlender Signifikanz) nicht weiter berücksichtigt, wohingegen die einfachen Wechselwirkungen zwischen der Adhäsionsarbeit zur Entnetzung der Gummioberfläche  $W_{adh,Gummi}$  sowie der Kohäsionsarbeit des Zwischenmediums  $W_{koh,ZM}$  und der Geschwindigkeit mit in den

Modellansatz (zur weiteren Erhöhung der Modellgüte) aufgenommen wurden. Damit veränderte sich der statistische Modellansatz von (23) zu (24).

$$\begin{aligned}
 \mu_{S,max} = & +a_0 \\
 & +a_1 * v + a_2 * v^2 \\
 & +a_3 * p \\
 & +(a_4 + a_5 * v) * W_{adh,Gummi} \\
 & +(a_6 + a_7 * v) * W_{koh,ZM}
 \end{aligned} \tag{24}$$

In Tabelle 8 sind die über die Methode der kleinsten Fehler-Quadrate geschätzten Regressionskoeffizienten zum Modell (24), basierend auf den am GAT durchgeführten Parameterstudien angeführt.

**Tabelle 8:** Regressionskoeffizienten des ermittelten Modells (24) mit den Konfidenzintervallen (95% Vertrauensbereich)

Einflussparameter / Regressoren	Regressionskoeffizienten		Konfidenzintervalle (95% Vertrauensbereich)	
	Koeffizient	Betrag	Untere Grenze	Obere Grenze
<i>Achsenabschnitt</i>	$a_0$ in --	<b>+0,847027</b>	+0,816503	+0,894673
<i>v ... Geschwindigkeit</i>	$a_1$ in $\frac{h}{km}$	<b>-0,026295</b>	-0,028004	-0,024587
<i>v<sup>2</sup> ... Geschwindigkeit<sup>2</sup></i>	$a_2$ in $\frac{h^2}{km^2}$	<b>+0,000400</b>	+0,000376	+0,000424
<i>p ... Flächenpressung</i>	$a_3$ in $\frac{mm^2}{N}$	<b>-0,096880</b>	-0,115320	-0,078439
<i>W<sub>adh,Gummi</sub> ... Adhäsionsarbeit zwischen Gummi und ZM</i>	$a_4$ in $\frac{m}{mN}$	<b>-0,005121</b>	-0,005684	-0,004557
<i>v * W<sub>adh,Gummi</sub> ... Geschwindigkeit * Adhäsionsarbeit zwischen Gummi und ZM</i>	$a_5$ in $\frac{h}{km} * \frac{m}{mN}$	<b>+0,000125</b>	+0,000101	+0,000150
<i>W<sub>koh,ZM</sub> ... Kohäsionsarbeit im ZM</i>	$a_6$ in $\frac{m}{mN}$	<b>+0,001729</b>	+0,001470	+0,001988
<i>v * W<sub>koh,ZM</sub> ... Geschwindigkeit * Kohäsionsarbeit im ZM</i>	$a_7$ in $\frac{h}{km} * \frac{m}{mN}$	<b>-0,000038</b>	-0,000049	-0,000026
Zugrunde liegende Messdaten sind linear trendbereinigt / ZM ... Zwischenmedium				

Neben den vorgestellten Modellansätzen wurden weitere mathematisch-statistische Modellansätze geprüft, jedoch aufgrund der

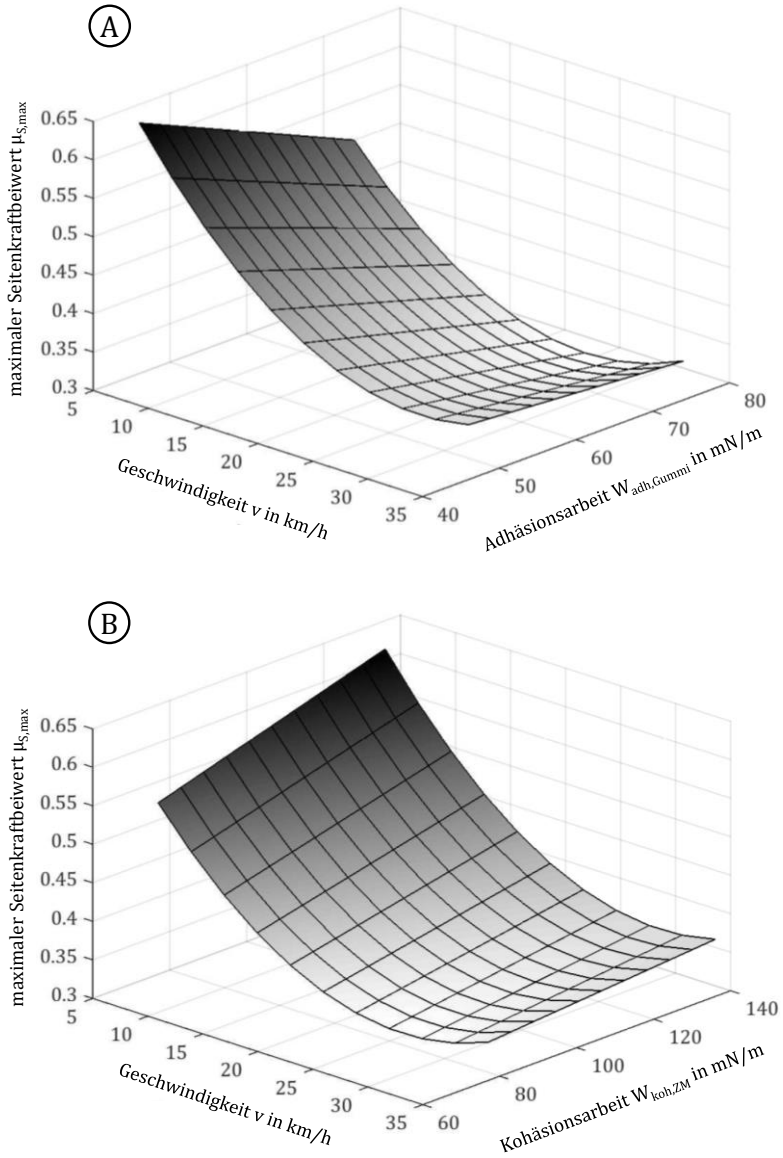
schlechteren Modellgüte und der fehlenden physikalischen Nachvollziehbarkeit nicht weiter verfolgt.

Im Folgenden werden die Auswirkungen der einzelnen Einflussparameter auf den mittleren maximalen Seitenkraftbeiwert, auf Basis der ermittelten Regressionskoeffizienten, in Bezug auf das in Kapitel 3.1.3 vorgestellte Vier-Zonen-Modell diskutiert. Hierzu können im ersten Schritt die Vorzeichen der Regressionskoeffizienten betrachtet werden, welche die tendenzielle Wirkungsrichtung beschreiben, und auf Plausibilität geprüft werden. Die Betrachtung bzw. die Gegenüberstellung der einzelnen Beiträge erscheint allerdings nur teilweise sinnvoll, da im Fall des vorliegenden Modells bei allen Parametern außer bei der Flächenpressung auch einfache Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Einflussparametern (und der Geschwindigkeit) vorliegen. Damit wirken sich die einzelnen Einflüsse gleichzeitig an unterschiedlichen Stellen aus und machen die Beurteilung der einzelnen Einflüsse auf Basis der Beiträge und Vorzeichen der Regressionskoeffizienten schwierig.

Bei der Bewertung des Regressionskoeffizienten der Flächenpressung zeigt sich, dass dieser ein negatives Vorzeichen aufweist. Die Auswirkung dieses Parameters ist plausibel und zeigte sich bereits vorzeichengleich bei den am GAT und IPS durchgeführten Untersuchungen zu Kapitel 4.2 (vgl. Tabelle 5 & Abbildung 42).

Zur graphischen Beurteilung der Auswirkungen der wechselwirkungsbehafteten Einflussparameter wurden auf Basis des geschätzten mathematisch-statistischen Zusammenhangs die in Abbildung 58 abgebildeten beiden Diagramme „A“ und „B“ erzeugt. Diagramm „A“ veranschaulicht den gleichzeitigen Einfluss der Parameter Geschwindigkeit und der Adhäsionsarbeit zur Entnetzung der Gummioberfläche, während Diagramm „B“ den gleichzeitigen Einfluss der Parameter Geschwindigkeit und der Kohäsionsarbeit des Zwischenmediums veranschaulicht.





**Abbildung 58:** Visuelle Bewertung der wechselwirkungsbehafteten Parametereinflüsse im beschriebenen Modellansatz (24)

Bei der Erzeugung dieser Diagramme wurden die jeweils nicht dargestellten Parametereinflüsse mit ihrem Mittelwert (arithmetisches Mittel im vorliegenden Datensatz) im Modellansatz angenommen. Die Diagramme zeigen beide, dass der Seitenkraftbeiwert quadratisch von der Geschwindigkeit abhängt und zu höheren Geschwindigkeiten abfällt.

Der Abfall des maximalen Seitenkraftbeiwertes über der Geschwindigkeit kann durch unterschiedliche gleichzeitig auftretende Effekte erklärt werden. Zum einen kann er dadurch begründet werden, dass die Ausprägung der Einlaufzone (Zone A-B in Abbildung 20) im Vier-Zonen-Modell mit steigender Geschwindigkeit zunimmt, da der Wasserkeil aufgrund der Trägheit des Wassers und des damit erhöhten Staudrucks des Wassers immer weiter in die Reifenaufstandsfläche eindringt. Dadurch wird gleichzeitig die Summe der Flächenanteile der verbleibenden Zonen reduziert, die vorrangig für die des Reibwertentstehung benötigt werden (Zone 3 und 4).

Zum anderen reduziert sich bei höheren Geschwindigkeiten die Verweilzeit der Gummielemente in der Kontaktfläche, da diese mit einer höheren Geschwindigkeit durchlaufen wird. Dadurch können Fahrbahnunebenheiten nicht mehr so weit in das Gummivolumen eindringen, was schließlich den Anteil der Hysteresereibung reduziert (vgl. Kapitel 2.1.3.2).

Zusätzlich führen die verkürzten Kontaktzeiten (im direkten Kontakt zwischen Gummi und Fahrbahn) dazu, dass begründet durch die Relaxationszeit der auftretenden physikalischen Bindungen weniger Bindungen ausgebildet werden können, was ebenfalls den Anteil Adhäsionsreibung reduzieren dürfte (vgl. Kapitel 2.1.3.1).

Bei der genaueren Betrachtung der Diagramme „A“ und „B“ zeigt sich, dass der Reibbeiwert ab der Geschwindigkeit von ca. 30 km/h wieder leicht ansteigt. Dieser Effekt kann eventuell darauf zurückgeführt werden, dass es sich bei dem hier gewählten Modellansatz um einen

mathematisch-statistischen Ansatz ohne physikalische Grundlage handelt und dieser den physikalisch exakten Zusammenhang zwischen den betrachteten Größen in diesem Bereich unzureichend genau beschreibt. Da die bestimmten Regressionskoeffizienten jedoch auf hohem Niveau signifikant sind, deutet dies jedoch eher auf einen systematischen Effekt hin. Dieser Effekt könnte beispielsweise auf die geschwindigkeitsabhängige Schichtdicke des Zwischenmediums zurückgeführt werden, was jedoch in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden konnte.

Weitere Erklärungsmöglichkeiten könnten auch die viskoelastischen Eigenschaften des Gummis bieten. Hierbei könnte das Gummivolumen ab der Geschwindigkeit von ca. 30 km/h in einem Frequenzbereich angeregt werden, in dem der frequenzabhängige Verlustmodul zu größeren Verlusten und damit zu einem höheren Reibwert führt. Auch wäre beispielsweise denkbar, dass der Reibanteil zu höheren Geschwindigkeiten auf den ansteigenden Anteil der Viskosereibung zurückgeführt werden kann (siehe Verlauf der Stribeckkurve im Übergang vom Mischreibungsbereich zur Flüssigkeitsreibung in [Gro 14]). Die beiden zuletzt angeführten Thesen stellen jedoch Vermutungen dar, die den Kurvenverlauf tendenziell erklären könnten, in dieser Arbeit allerdings nicht weiter überprüft bzw. bestätigt oder ausgeschlossen werden konnten.

Bei der Betrachtung des Parametereinflusses der Adhäsionsarbeit zur Entnetzung der Gummioberfläche (Diagramm „A“) zeigt sich bei konstanten Geschwindigkeiten, dass der maximale Seitenkraftbeiwert mit steigender Adhäsionsarbeit abfällt. Dies kann dadurch erklärt werden, dass zur Verdrängung des Zwischenmediums im Kontakt mehr Zeit für die Aufbringung der Adhäsionsarbeit und damit zur Verdrängung des Zwischenmediums benötigt wird. Dies wiederum führt dazu, dass die Übergangszone „feucht“ (Zone C-D) vergrößert, dadurch die Kontaktzone „trocken“ (Zone D-E), die den größten Beitrag zum Reibbeiwert liefert, verkleinert und dadurch schließlich der Reibbeiwert (Seitenkraftbeiwert) abgesenkt wird.

Weiterhin zeigt sich im Diagramm „A“, dass der Einfluss der Adhäsionsarbeit bei niedrigen Geschwindigkeiten am größten ist und zu höheren Geschwindigkeiten abfällt. Bei hohen Geschwindigkeiten ist erkennbar, dass sich die Adhäsionsarbeit nahezu nicht mehr auf die Ausgangsgröße auswirkt. Dieser Sachverhalt könnte dadurch erklärt werden, dass die Einlaufzone (Zone A-B) sowie die Übergangzone „nass“ (Zone B-C) bei den hohen Geschwindigkeiten bereits relativ weit in die Reifenkontaktfläche eingedrungen sind und dadurch die Ausprägung der Übergangzone „feucht“ (Zone C-D) und der Kontaktzone trocken (Zone D-E) reduziert wird. Der relative niedrige Reibwert unterstützt diese Annahme, da dieser einen Hinweis darauf gibt, dass die Kontaktzone „trocken“ bereits nicht mehr existiert bzw. erheblich reduziert wurde.

Bei dieser Überlegung bleibt zu bedenken, dass das vorgestellte Vier-Zonen-Modell als vereinfachtes Modell verstanden werden muss. Es ist zu erwarten, dass sich die Benetzungseigenschaften des Zwischenmediums auch in der Kontaktzone „trocken“ (Zone D-E), wenn auch an dieser Stelle nicht vorrangig, auswirken werden. Dadurch führt auch bereits eine Reduzierung der Kontaktzone „trocken“ zu einer reduzierten Auswirkung der Adhäsionsarbeit.

Bei der Betrachtung des Einflusses der Kohäsionsarbeit des Zwischenmediums auf den maximalen Seitenkraftbeiwert zeigt sich in Diagramm „B“, dass dieser mit steigender Kohäsionsarbeit (geschwindigkeitsabhängig) ansteigt.

Dies könnte zum einen dadurch erklärt werden, dass mit steigender Kohäsionsarbeit (bedeutet gleichzeitig höhere Oberflächenspannung) die Kapillarwirkung des Zwischenmediums in der Reifen- bzw. Fahrbahnoberflächenstruktur zunimmt. Wie bereits in Kapitel 5.4.2.2 erwähnt, bestimmt sich die Kohäsionsarbeit aus der zweifachen Oberflächenspannung der Flüssigkeit (vgl. Gleichung (20)). Die Oberflächenspannung wiederum kann über die Kapillaren-Steighöhenmethode (vgl. Kapitel 5.3.1.1, Gleichung (17)) bestimmt

werden. Bei hoher Oberflächenspannung ist damit eine hohe Steighöhe in Kapillaren zu erwarten. Flüssigkeiten mit hohen Kohäsionsarbeiten (d.h. hohen Oberflächenspannungen) dürften daher im Vergleich zu Flüssigkeiten mit geringen Kohäsionsarbeiten eher über die Eigenschaft verfügen, Unebenheiten in der Fahrbahnoberfläche und der Reifenoberfläche über die stärkeren Kapillarkräfte besser bzw. schneller auszufüllen. Damit führt eine hohe Kohäsionsarbeit der Flüssigkeit zur besseren Förderung bzw. Verdrängung des Zwischenmediums aus dem Kontakt, da das Zwischenmedium schneller in luftgefüllte Unebenheiten der Fahrbahnoberfläche bzw. der Gummioberfläche eindringt. Schlussendlich führt dies zur Verkleinerung der Übergangszonen „nass“ und „feucht“ (Zone B-C und Zone C-D), dies wiederum zur Vergrößerung der Kontaktzone „trocken“ (Zone D-E) und damit zur Erhöhung des maximalen Seitenkraftbeiwertes.

Eine höhere Kapillarwirkung könnte jedoch auch dazu führen, dass das Zwischenmedium in der Kontaktfläche schneller in schmale luftgefüllte Abstände zwischen Gummi und Fahrbahn eindringt, was wiederum zur Absenkung des Seitenkraftbeiwertes führen würde. Da die Untersuchungsergebnisse allerdings zeigen, dass mit steigender Kohäsionsarbeit und damit höherer Kapillarwirkung der Seitenkraftbeiwert ansteigt, ist davon auszugehen, dass hier der zuerst genannte Effekt überwiegt.

Ferner bedeutet eine hohe Kohäsionsarbeit, dass mehr Arbeit zur Verformung beispielsweise eines Flüssigkeitstropfens benötigt wird. Damit kann dieser leichter als Ganzes von einer Oberfläche gewischt und damit trockener Kontakt erzeugt werden. Eine steigende Kohäsionsarbeit führt auch hier zur Verkleinerung der Übergangszone „feucht“ (Zone C-D), gleichzeitig zur Vergrößerung der Kontaktzone „trocken“ (Zone D-E) und dies wiederum zur Erhöhung des maximalen Seitenkraftbeiwertes.

Im Diagramm „B“ zeigt sich analog zu Diagramm „A“, dass der Einfluss der Kohäsionsarbeit bei niedrigen Geschwindigkeiten am größten ist und zu höheren Geschwindigkeiten abfällt. Bei hohen Geschwindigkeiten zeigt sich wie bei der Adhäsionsarbeit, dass sich die Kohäsionsarbeit nahezu nicht mehr auf die Ausgangsgröße auswirkt. Dieser Sachverhalt lässt sich analog zur Argumentation bei der Adhäsionsarbeit zu höheren Geschwindigkeiten erklären.

Ein Einfluss des Zwischenmediums auf die molekularen Wechselwirkungen zwischen Reifen und Fahrbahn bei Filmdicken von „0,00 mm“ (Zone 4 im Vier-Zonen-Modell) konnte in dieser Arbeit mit den verfügbaren Untersuchungsmöglichkeiten und auf Basis der vorhandenen Datenbasis nicht nachgewiesen bzw. näher betrachtet werden.

#### **6.4.2 Bewertung der Modellgüte**

In Tabelle 9 sind die zum Modell (24) zugehörigen Maße zur Bewertung der Modellgüte angeführt. Die Gütemaße zeigen, dass die gewählten Eingangsgrößen (Geschwindigkeit, Flächenpressung, Adhäsions- und Kohäsionsarbeit) und die zusätzliche Berücksichtigung der einfachen Wechselwirkungen zwischen der Adhäsions- bzw. Kohäsionsarbeit und der Geschwindigkeit den Großteil der vorliegenden Streuung (95,8%) erklären.

Der mittlere quadratische Fehler liegt, bezogen auf den Mittelwert aller Schätzungen, bei einem Fehler von ca. 4,6 %. Beim angeführten Stichprobenumfang bleibt zu bedenken, dass jeder berücksichtigte Messpunkt den Mittelwert aus zwei Einzelmessungen (Prozedur „Rechts-Links“ und Prozedur „Links-Rechts“, vgl. Abbildung 27) mit den jeweils vier ermittelten Maximalwerten (vgl. Abbildung 28) widerspiegelt.

**Tabelle 9:** Kenngrößen zur Bewertung der Modellgüte (Modell (23))

<b>Gütemaße zur Bewertung der Modellgüte</b>	
Gütemaß	Betrag
$R^2$	0,958
$R^2$ korrigiert	0,957
<i>RMSE</i> (mittlerer quadratischer Fehler)	0,0195
<i>Mittelwert</i> (der Schätzungen)	0,4232
$N$ (Stichprobenumfang)	256
Alle Regressionskoeffizienten wirken sich signifikant (99% Vertrauensbereich) auf den maximalen Seitenkraftbeiwert aus	

## 6.5 Exemplarische Übertragung der Ergebnisse auf eine realitätsnahe Anwendung

In diesem Kapitel wird die in Kapitel 6.4 vorgestellte Modellvorstellung (siehe Gleichung (24)) zur Veranschaulichung auf ein realitätsnahes Beispiel angewandt. Im Folgenden wird zunächst dieses Beispiel mit den getroffenen Annahmen vorgestellt. Anschließend werden die am GAT ermittelten Erkenntnisse auf Basis des ermittelten mathematisch-statistischen Modells in das praxisnahe Beispiel überführt und die Auswirkungen ausgewählter Parametervariationen vorgestellt.

### 6.5.1 Modellvorstellung und Annahmen

Bei dem in diesem Kapitel betrachteten Anwendungsbeispiel handelt es sich um die Ermittlung des Bremsweges eines PKWs, bei einer Vollbremsung bis zum Stillstand, die innerorts bei einer Geschwindigkeit von 35 km/h durchgeführt wird.

Hierbei wird ein stark vereinfachtes Fahrzeugmodell angenommen, das über einen perfekten ABS-Regler verfügt, was bedeutet, dass die Regelung der Fahrzeugbremse zu jedem Zeitpunkt den maximalen Reibbeiwert exakt einregelt. Weiterhin treten während der Bremsung keine Schwerpunktsverlagerungen und keine dynamischen Radlasten auf, was dazu führt, dass die Flächenpressung im Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn unverändert bleibt. An allen vier Rädern tritt zu jedem Zeitpunkt der gleiche Reibbeiwert auf, der jedoch geschwindigkeitsabhängig ist und durch die oberflächenenergetischen Eigenschaften des Reifens und des Zwischenmediums beeinflusst wird.

Es wird näherungsweise angenommen, dass der mathematisch-statistische Zusammenhang (basierend auf den empirischen Untersuchungen am GAT) direkt auf die Reibung luftgefüllter PKW-Reifen in Umfangsrichtung (Reibung in Längsrichtung) übertragen werden kann.

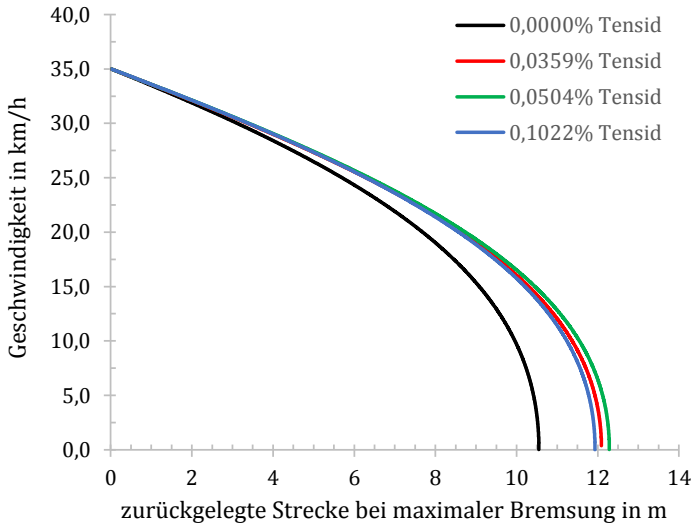
Zu Beginn der Bremsung wurde 35 km/h als Anfangsgeschwindigkeit gewählt, da die Maximalgeschwindigkeit der in Kapitel 6 durchgeführten Untersuchungen der gewählten Geschwindigkeit entsprach. Hierdurch kann auf Extrapolation verzichtet werden, was bei dem vorliegenden mathematisch-statistischen Modell, welches quadratische Terme enthält, als kritisch anzusehen wäre. Die mittlere Flächenpressung im Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn wurde zu  $0,257 \text{ N/mm}^2$  (Flächenpressung bei 2,4 bar Fülldruck des in Kapitel 4.2.2.1.1 untersuchten Glattreifens) gewählt.

### **6.5.2 Einfluss der Oberflächenspannung flüssiger Zwischenmedien auf den Bremsweg bei Vollbremsung**

In Abbildung 59 sind die zu erwartenden Bremswege auf nasser Fahrbahn für unterschiedliche im Wasser gelöste Tensidkonzentrationen abgebildet. Die abgebildeten Kurvenverläufe wurden



iterativ für unterschiedliche im Wasser vorliegende Tensidkonzentrationen berechnet. Hierbei wurden ebenfalls Tensidkonzentrationen betrachtet, die bei den am GAT durchgeführten Untersuchungen zur Parametervariation verwendet wurden.

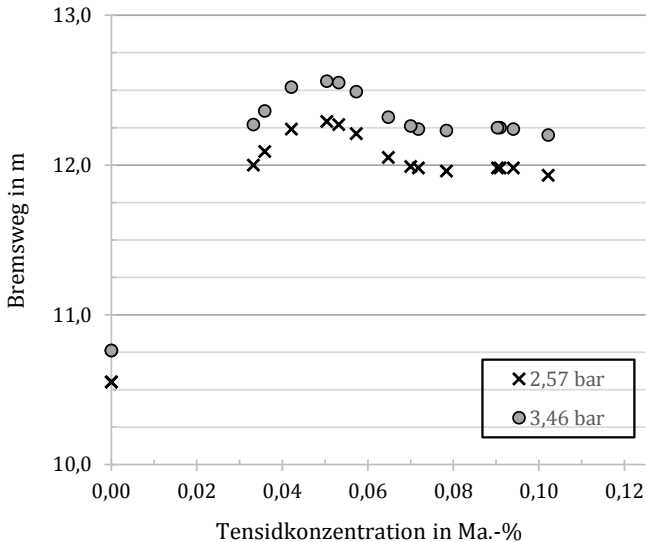


**Abbildung 59:** Verlauf der PKW-Geschwindigkeit über der zurückgelegten Strecke bei maximaler Bremsung, unterschiedlichen Tensidkonzentrationen und bei der mittleren Flächenpressung von  $0,257 \text{ N/mm}^2$  im Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn

Zur Bestimmung der Kurvenverläufe wurde im ersten Schritt abhängig von der Tensidkonzentration der zur Anfangsgeschwindigkeit von 35 km/h zu erwartende Reibwert und die damit am PKW vorliegende Bremsverzögerung ermittelt. Anschließend wurde das Fahrzeug für die Zeitdauer von 0,001 s mit der berechneten Bremsverzögerung konstant abgebremst und die sich ergebende Restgeschwindigkeit sowie die dabei zurückgelegte Wegstrecke berechnet. Auf Basis der Restgeschwindigkeit wurde dieses Vorgehen so lange computergestützt iterativ durchgeführt, bis sich die Restgeschwindigkeit des PKWs von

0 km/h ergab, hierbei wurde für jede Iterationsschleife ein neuer geschwindigkeitsabhängiger Reibwert ermittelt.

Die abgebildeten Kurvenverläufe zeigen, dass sich bereits sehr geringe Tensidkonzentrationen in deutlich längeren Bremswegen niederschlagen. Beim Vergleich der Bremswege auf nasser Fahrbahn mit reinem Wasser und mit der wässrigen Tensidlösung mit der Tensidkonzentration von 0,0504 Ma.-% als Zwischenmedium zeigt sich der größte Unterschied im Bremsweg. Während der Bremsweg bei reinem Wasser bei 10,55 m liegt, erhöht sich dieser bei der betrachteten wässrigen Tensidlösung auf 12,29 m, was einer Bremswegdifferenz von 1,74 m entspricht. Der Vergleich der beiden Kurvenverläufe zeigt weiterhin, dass das Fahrzeug auf reinem Wasser bereits steht, während auf der wässrigen Tensidlösung eine Restgeschwindigkeit von 14,63 km/h vorliegt.



**Abbildung 60:** Bremswege bei einer Vollbremsung aus 35 km/h und unterschiedlichen Reifenfülldrücken sowie unterschiedlichen Tensidkonzentrationen im Zwischenmedium Wasser

In Abbildung 60 sind die für die betrachteten wässrigen Tensidlösungen zu erwartenden Bremswege über der Tensidkonzentration für zwei unterschiedliche mittlere Flächenpressungen im Kontakt aufgetragen. Die Abbildung zeigt, dass sich die Tensidkonzentration nicht monoton auf den Bremsweg auswirkt und dass bei einer kritischen Konzentration von ca. 0,0504 Ma.-%, der maximale Bremsweg zu erwarten ist (vgl. hierzu Abbildung 57).

Für niedrigere und höhere Tensid-Konzentrationen ergeben sich kürzere Bremswege, wobei der kürzeste Bremsweg bei reinem Wasser vorliegt.

Eine höhere Flächenpressung wirkt sich, wie zu erwarten, senkend auf den Reibwert (bzw. den mittleren maximalen Seitenkraftbeiwert) aus, was sich wiederum in einer Verlängerung der Bremswege äußert.

## **6.6 Schlussbetrachtung**

Die in dieser Arbeit durchgeführten empirischen Untersuchungen zeigen, dass bereits das Vorhandensein relativ geringer Tensidkonzentrationen zu einem erheblichen Absenken des Reibbeiwertes führen kann.

Damit kann der von PERSSON [Per, 04a] veranschaulichte Verlauf des Reibbeiwertes (starker Einbruch des Reibbeiwertes) über der Zeit nach dem Einsetzen des Regens (siehe Abbildung 2) zumindest teilweise auf den von KENDZIORRA [Ken 05] als Oberflächenspannungs-Problematik bezeichneten Effekt zurückgeführt werden. Dies schließt jedoch nicht aus, dass der Einfluss veränderter Viskosität des Zwischenmediums, aufgrund im Wasser gelöster Verunreinigungen, wie von PERSSON [Per, 04a] vermutet, denselben (Reibung absenkenden) Effekt hervorrufen kann.

An dieser Stelle wird davon ausgegangen, dass in der Realität beide Effekte überlagert auftreten werden. Hierbei könnte es beispielsweise sein, dass sich die auf der Fahrbahnoberfläche befindlichen natürlichen Detergenzien (Tenside) im Vergleich zu den weiteren Verunreinigungen relativ schnell im Wasser lösen und die Benetzungseigenschaften des Zwischenmediums Wasser sehr schnell nach Regenbeginn beeinflussen und damit den Reibwert absenken. Nachdem sich die weiteren Verunreinigungen im Wasser gelöst haben, verändert sich zusätzlich zu den Benetzungseigenschaften die Viskosität des Zwischenmediums und der Reibwert wird noch weiter abgesenkt.

Auch ist denkbar, dass Wechselwirkungen zwischen den beiden genannten Einflüssen auftreten. Hier könnte es beispielsweise sein, dass manche Substanzen nur im Wasser gelöst werden, wenn hierin bereits Tenside gelöst sind und damit erst die Benetzung der Verunreinigungen ermöglicht wird.

Welcher von den beiden genannten Effekte der dominierende ist, wird davon abhängen, welche Verunreinigungen in welchen Konzentrationen vorliegen. Weiterhin werden die Fahrbahnoberfläche (Material und Textur), der Reifen (Material und Profil) und weitere Einflussgrößen (Bsp. Umgebungsbedingungen) die Ausprägung der beiden beschriebenen Effekte vermutlich stark beeinflussen und sich damit auch auf den Reibbeiwert auswirken.

# **7. Zusammenfassung und Ausblick**

## **7.1 Zusammenfassung**

Auf regennasser Fahrbahn ist der Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn zum Teil erheblich herabgesetzt. Dies führt dazu, dass im Straßenverkehr auf nasser Fahrbahn im Vergleich zu trockener Fahrbahn verhältnismäßig viele Unfälle, mit zum Teil erheblichen Folgen, geschehen.

In dieser Arbeit wurde der spezielle Fall betrachtet, der nach langer Trockenzeit und dann einsetzendem Regen auftreten kann. Hier kann teilweise beobachtet werden, dass der Reibwert extrem reduziert sein kann, da nicht nur Wasser auf der Fahrbahnoberfläche vorhanden ist, sondern ebenfalls Verschmutzungen vorliegen, die sich im Wasser lösen, dessen Eigenschaften verändern und damit die Reifen-Fahrbahn-Reibung in großem Maße negativ beeinflussen können.

Die Herabsetzung des Reibwertes kann in diesem Fall zum einen auf die veränderte Viskosität und zum anderen auf die Oberflächenspannungsproblematik des Wassers zurückgeführt werden. In dieser Arbeit wurde der Einfluss der Oberflächenspannung auf den Reibbeiwert zwischen Reifen und Fahrbahn realitätsnah näher untersucht. Der Einfluss der Viskosität war in dieser Arbeit nicht Untersuchungsgegenstand.

Im ersten Schritt wurde eine Untersuchungsmethode entwickelt, die es ermöglicht, den Einfluss unterschiedlicher Parameter auf die Reibung zwischen Gummi bzw. Reifen und Fahrbahn unter Laborbedingungen untersuchen zu können. Die dafür notwendige Prüfumgebung wurde

innerhalb dieser Arbeit entwickelt und aufgebaut und orientiert sich an der Prüfumgebung nach GROSCH (siehe [Gro 96] und [Hei 07]). Bei der in dieser Arbeit aufgebauten Prüfumgebung (Griffigkeits- und Abriebprüfstand „GAT“) können gleichermaßen Reibungsversuche mit Gummigleitkörpern und freirollenden Vollgummirädern auch auf nasser Fahrbahn unter Laborbedingungen durchgeführt werden. Durch spezielle Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass die mit dieser Prüfumgebung ermittelten Untersuchungsergebnisse (bei Verwendung von rollenden Vollgummirädern) auf Reifenuntersuchungen (mit luftgefüllten PKW-Reifen) übertragen werden können.

Durch anschließende Parameterstudien am GAT wurde schließlich der Einfluss der oberflächenenergetischen Eigenschaften des Zwischenmediums Wasser und weiterer Parameter (Rollgeschwindigkeit, Flächenpressung, ...) auf die Reibung untersucht. Die Eigenschaften des Wassers wurden hierbei durch die Zugabe von Tensiden gezielt beeinflusst und damit wurde unter anderem der Benetzungszustand der Reibpartner variiert. Alle Untersuchungen wurden hierbei mit einem freirollenden Vollgummirad auf einer Fahrbahnoberfläche mit schwach ausgeprägter Makro- sowie Mikrotextur durchgeführt und die Untersuchungsergebnisse mittels mathematisch-statistischer Modellbildung zusammengefasst.

Durch die rechnerische Ermittlung der Adhäsionsarbeiten zwischen den bei den Reibungsuntersuchungen beteiligten Festkörpern (Gummi und Fahrbahn) und dem Zwischenmedium (Gummi und Fahrbahn) wurde der Benetzungszustand der Festkörperoberflächen charakterisiert. Die molekularen Wechselwirkungen im Zwischenmedium selbst wurden durch die Ermittlung der Kohäsionsarbeit beschrieben und berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Parameterstudien zeigen, dass sich die Adhäsionsarbeit zwischen Gummi und dem Zwischenmedium sowie die Kohäsionsarbeit im Zwischenmedium signifikant auf den Reibwert zwischen Reifen (freirollendes Vollgummirad) und Fahrbahn

auswirken. Eine Erhöhung der Adhäsionsarbeit führt geschwindigkeitsabhängig dazu, dass der Reibbeiwert reduziert wird, während eine höhere Kohäsionsarbeit geschwindigkeitsabhängig zur Erhöhung des Reibwertes führt. Die Erhöhung der Parameter Geschwindigkeit sowie der Flächenpressung führen jeweils, wie zu erwarten, zur Reduzierung des Reibwertes.

Die über die empirischen Untersuchungen erhaltenen Ergebnisse wurden für die Kontaktzone Reifen-Fahrbahn anschließend mittels Vier-Zonen-Modell diskutiert und nachvollzogen. Das Vier-Zonen-Modell basiert hierbei auf dem Drei-Zonen-Modell nach MOORE [Moo 72] und wurde, entsprechend für das in dieser Arbeit betrachtete Untersuchungsziel, erweitert.

Abschließend wurden die ermittelten Erkenntnisse auf ein praxisnahes Beispiel (Vollbremsung bis zum Stillstand) angewandt, um die Auswirkungen der betrachteten Einflussgrößen realitätsnah bewerten und nachvollziehen zu können.

## **7.2 Ausblick**

### **7.2.1 Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT)**

Die in dieser Arbeit durchgeführten empirischen Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses der oberflächenenergetischen Eigenschaften des Zwischenmediums auf die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn wurden ausschließlich am Griffigkeit- und Abriebprüfstand (GAT) durchgeführt.

An der aufgebauten Prüfumgebung besteht an unterschiedlichen Stellen Optimierungspotential. Für anschließende Arbeiten wäre es beispielsweise sinnvoll, eine Vorrichtung bzw. auch eine Messmethode zu entwickeln, die es erlaubt, die Wasserfilmhöhe am GAT zu ermitteln.

Weiterhin könnten beispielsweise eine Minimierung der ungefederten Massen und auch eine Reduzierung der Reibung in Einfederrichtung vorteilhaft sein, um auch Untersuchungen mit kleineren Flächenpressungen zu ermöglichen. Zudem wäre es für zukünftige Untersuchungen auf trockener Fahrbahn vorteilhaft, wenn die Umgebungstemperatur überwacht und eingestellt werden könnte.

Bei Untersuchungen in zukünftigen Arbeiten sollten zudem möglichst große Fahrbahnproben verwendet werden, um einen möglichst großen Abrolldurchmesser zu ermöglichen. Damit könnte der Rädchenverschleiß durch den beschriebenen Konuseffekt reduziert werden.

Auch könnte durch eine Variation der Rädchenbreite (Bsp. größere Breite bei angenommen gleicher Kontaktfläche) die Länge der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn variiert und damit das Verschleißbild gezielt beeinflusst werden. An dieser Stelle gilt es, den bestmöglichen Kompromiss von Rädchenbreite und sich ergebende Latschlänge zu finden. Ein weiterer Ansatz könnte die Variation des Rädchendurchmessers sein.

## **7.2.2 Parametervariationen**

In anschließenden Arbeiten sollten weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen Gummiproben (Gummizusammensetzung und Oberflächenstrukturen) und unterschiedlichen Fahrbahnproben (Material und Textur) durchgeführt werden, um die Allgemeingültigkeit der in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse abzusichern, da diese ausschließlich mit einer Gummiprobe (profilloses Vollgummirad mit einer Gummizusammensetzung) auf einer Fahrbahnoberfläche ermittelt wurden.

Durch anschließende Validierungsmessungen an einem geeigneten Reifenprüfstand sollten die am GAT ermittelten Ergebnisse validiert und damit die Übertragbarkeit abgesichert werden. Derartige



Validierungsmessungen wurden bereits innerhalb dieser Arbeit durchgeführt und vorgestellt, jedoch nicht mit den hierfür notwendigen Parametervariationen (bzgl. des Tensideinflusses).

Die in dieser Arbeit ermittelten Untersuchungsergebnisse zeigen, dass bereits die geringste bei den Reibungsuntersuchungen verwendete Tensidkonzentration zu einem merklichen Abfall der Reibwerts führte. Durch weitere Untersuchungen zum Einfluss der Tensidkonzentration und damit des Benetzungsverhaltens des Zwischenmediums sollten weitere Untersuchungen am GAT mit noch geringeren Tensidkonzentrationen durchgeführt werden, um den Übergangsbereich noch genauer auflösen zu können. An dieser Stelle könnten ebenfalls wässrige Salzlösungen zum Einsatz kommen, da die Oberflächenspannung des Zwischenmedium, wie gezeigt, ebenfalls durch die Zugabe von Salz gezielt beeinflusst werden kann und praxisrelevant ist.

### **7.2.3 Oberflächenaktive Substanzen**

In dieser Arbeit wurde der Einfluss der größtmöglichen Bandbreite auftretender Oberflächenspannungen (mit dem verwendeten Tensid) durch Zusetzen von oberflächenaktiven Substanzen zum Zwischenmedium Wasser auf die Reibung betrachtet.

Hierbei wurde jedoch nicht berücksichtigt, welche auch zeitabhängigen Mengen ähnlich wirkender Substanzen (im Vergleich zum verwendeten Tensid) in der realen Anwendung (Bildung natürlicher Detergenzien auf Fahrhahnoberflächen) im Straßenverkehr auftreten und zu welchen Oberflächenspannungen diese im Zwischenmedium führen. Dies sollte in anschließenden Arbeiten überprüft und die gewonnenen Erkenntnisse auf die in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse, bezüglich der vorgestellten Auswirkungen, übertragen werden.

### **7.2.4 Allgemeine Hinweise**

Bei künftigen Untersuchungen, sollte zur Charakterisierung der viskoelastischen Eigenschaften zusätzlich auch der frequenz-, amplituden- und temperaturabhängige komplexe E-Modul ermittelt und bei der Modellbildung berücksichtigt werden. Dadurch wäre es möglich, die Güte der statistischen Modelle weiter zu erhöhen und ein noch tiefer gehenderes Systemverständnis zu erlangen.

# **A. Abkürzungsverzeichnis**

KIT	Karlsruher Institut für Technologie
FAST	Institut für Fahrzeugsystemtechnik
LFF	Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik
IPS	Innentrommelprüfstand des FAST
GAT	Griffigkeit- und Abriebprüfstand des FAST
IWM	Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik
LAT100	Prüfstand nach Grosch



## B. Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Größe
$F_X$	N	Umfangskraft in Längsrichtung
$F_Y = F_S$	N	Seitenkraft in Querrichtung
$F_Z$	N	Anpresskraft in der Hochachse
$\alpha$	°	Schräglaufwinkel
$\alpha_{S,max}$	°	Schräglaufwinkel beim maximalen Seitenkraftbeiwert
$\alpha_{S,gleit}$	°	Schräglaufwinkel beim Gleitseitenkraftbeiwert
$v$	km/h	Reifengeschwindigkeit in Bewegungsrichtung
$v_{quer}$	km/h	Mittlere Quergleitgeschwindigkeit
$S_{quer}$	-	Mittlerer Querschlupf
$n_{Fahrbahn}$	1/min	Drehzahl des Drehstrommotors
$n_{Rad}$	1/min	Drehzahl des Vollgummirades
$\mu_S$	-	Seitenkraftbeiwert
$\mu_{S,max}$	-	Maximaler Seitenkraftbeiwert
$\mu_{S,gleit}$	-	Gleit-Seitenkraftbeiwert
$\mu_{S,max,mittel}$	-	Mittlerer maximaler Seitenkraftbeiwert
$\mu_{S,max,Links,Hin}$	-	max. Seitenkraftbeiwert beim Lenken nach links (Hin)
$\mu_{S,max,Links,Zurück}$	-	max. Seitenkraftbeiwert beim Lenken nach links (Zurück)
$\mu_{S,max,Rechts,Hin}$	-	Maximaler Seitenkraftbeiwert beim Lenken nach rechts (Hin)
$\mu_{S,max,Rechts,Zurück}$	-	Maximaler Seitenkraftbeiwert beim Lenken nach rechts (Zurück)
$\mu_{S,max,IPS}$	-	Maximaler Seitenkraftbeiwert IPS

## B. Formelzeichen

---

$\mu_{S,max,GAT}$	-	Maximaler Seitenkraftbeiwert GAT
$\frac{d\mu_S}{d\alpha}$	1/°	Seitensteifigkeit
$\mu_{Gesamt}$	-	Gesamtreibbeiwert
$\mu_{Adh.}$	-	Adhäsionsreibanteil
$\mu_{Hyst.}$	-	Hysteresereibanteil
$\mu_{Visk.}$	-	Viskosereibanteil
$\mu_{Koh.}$	-	Kohäsionsreibanteil
$\mu_{Verzahn.}$	-	Verzahnungsreibanteil
$p_{Latsch,mittel,IPS}$	N/mm <sup>2</sup>	Mittlere Flächenpressung am IPS
$p_{Latsch,mittel,GAT}$	N/mm <sup>2</sup>	Mittlere Flächenpressung am GAT
$p_M$ bzw. MPD	mm	Mittlere Profiltiefe
$R_a$	mm	Arithmetischer Mittenrauwert
$E^*$	N/mm <sup>2</sup>	Komplexer E-Modul
$E'$	N/mm <sup>2</sup>	Speichermodul
$E''$	N/mm <sup>2</sup>	Verlustmodul
$X_i$		Eingangsparameter bei der mathematisch-statistischen Modellbildung
$a_i$		Regressionskoeffizienten bei der mathematisch-statistischen Modellbildung
$R^2$	-	Bestimmtheitsmaß
RMSE		Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung
$\theta$	°	Kontaktwinkel
$\theta_{Gummi}$	°	Kontaktwinkel auf der Gummioberfläche
$\theta_{Fahrbahn}$	°	Kontaktwinkel auf der Fahrbahnoberfläche
$\sigma_{s,l}$	mN/m	Grenzflächenspannung zwischen Festkörper (solid) und Flüssigkeit (liquid)
$\sigma_{s,g}$	mN/m	Grenzflächenspannung zwischen Festkörper (solid) und Gas (gas)

$\sigma_{l,g}$	mN/m	Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit (liquid) und Gas (gas)
$\sigma_{l,ges}$	mN/m	Oberflächenspannung einer Flüssigkeit
$\sigma_{s,ges}$	mN/m	Freie Oberflächenenergie eines Festkörpers
$\sigma_l^P$	mN/m	Polarer Anteil der Oberflächenspannung einer Flüssigkeit
$\sigma_l^D$	mN/m	Disperser Anteil der Oberflächenspannung einer Flüssigkeit
$\sigma_s^P$	mN/m	Polarer Anteil der Freien Oberflächenenergie eines Festkörpers
$\sigma_s^D$	mN/m	Disperser Anteil der Freien Oberflächenenergie eines Festkörpers
$W_{adh,Gummi}$	mN/m	Adhäsionsarbeit zur Entnetzung der Gummioberfläche
$W_{adh,Fahrbahn}$	mN/m	Adhäsionsarbeit zur Entnetzung der Fahrbahnoberflächen
$W_{koh,ZM}$	mN/m	Kohäsionsarbeit des Zwischenmediums
$W_{TOT}^{adh}$	mN/m	Totale Adhäsionsarbeit





## C. Literaturverzeichnis

- Ant 09** Antonow, M.: *Inbetriebnahme und Optimierung eines Gummiabriebprüfstandes*, Universität Karlsruhe (TH), Institut für Fahrzeugtechnik und Mobile Arbeitsmaschinen (IFFMA), Diplomarbeit, Nr. 09-F-0017, 2009
- Arm 15** Armbruster, R.; Unrau, H.-J.; Gauterin, F.; Fischer, J.: *Analysis of Tire Resonances on the Wheel Carrier and the Rotating Wheel*, 44. Inter.Noise Congress, California USA, San Francisco, 2015
- Bac 96** Bachmann, T.: *Literaturrecherche zum Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn*, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12: Verkehrstechnik / Fahrzeugtechnik, Nr. 286, ISBN: 3-18-328-612-2, 1996
- Bac 98** Bachmann, T.: *Wechselwirkungen im Prozess der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn*, Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12: Verkehrstechnik / Fahrzeugtechnik, Nr. 360, ISBN: 3-18-336012-8, 1998
- Bec 64** Beckmann, L.: *Zur Bewertung der Griffigkeit von nassen Straßenoberflächen – II. Teil Relative Unfallhäufigkeit bei Nässe*, Straße und Autobahn: Zeitschrift fuer Strassen- und Brueckenbau, Strassenerhaltung, Strassenplan..., Jahrgang 25, Heft 6, S. 205 – 210, 1964
- Bil 06** Bilke-Krause, C.; Thomsen, F.: *Ozonbehandlung von Polymeroberflächen*, Application Report, AR256d, Krüss GmbH, 2006
- Bol 06** Bolz, G.: *Entwicklung eines Prüfverfahrens für Reifenmessungen auf Schnee im Labor*, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), ISBN: 978-3-8322-5253-3, 2006

- Büh 83** Bühlmann, F.: *Beurteilung der Griffigkeit auf Fahrbahnen*, Mitteilung Nr. 53, Institut für Straßen-, Eisenbahn- und Felsbau, ETH-Zürich, 1983
- Bür 11** Bürckert, M.; Greiner, M.; Freund, A.; Gauterin, F.: *Einfluss der Fahrbahngrobtexur auf die Geschwindigkeits-abhängigkeit der Griffigkeit nasser Fahrbahnen*, VDI-Berichte, Band 2137, ISBN: 978-3-18-092137-2, Seiten 205 – 230, 2011
- Bür 12** Bürckert, M.; Gauterin, F.; Unrau, H.-J.: *Untersuchung des Einflusses der Grobtexur auf Messergebnisse mit dem SKM-Messverfahren*, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, FE 84.0104/2009, Heft S78, 2012
- Cer 14** Cerezo, V.; Do, M. T.; Prevost, D.; Bouteldja, M.: *Friction/water depth relationship – In situ observations and its integration in tire/road friction models*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineerings, Journal of Engineering Tribology, Jahrgang 228, Heft 11, S. 1285 - 1297, 2014
- Cla 67** Clamroth, R.; Heidemann, W.: *Messung des Reibungs-koeffizienten von Laufflächen-Qualitäten bei rollender und gleitender Beanspruchung*, Kautschuk und Gummi – Kunststoffe, Jahrgang 20, Heft 6, S. 336 – 345, 1967
- Cla 81** Clark, S. K.: *Mechanics of pneumatic tires*, U. S. Department of transportation, 1981
- Con 12** Continental AG, *Revolution in Testing Technology*, Conti Technik Forum, 29.10 – 02.11., 2012
- Dal 11** Dallmann, S.: *Reinigung superhydrophober Oberflächen*, Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2011

- DIN 04a** Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI Normen – Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN, *Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen – Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN ISO 13473-1, 2004
- DIN 04b** Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI, *Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen – Teil 2: Begriffe und grundlegende Anforderungen für die Analyse von Fahrbahntexturprofilen*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN ISO 13473-2, 2004
- DIN 12** Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN, *VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Verkehrswegebauarbeiten – Oberschichten ohne Bindemittel*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 18315, 2012
- DIN 13** Normenausschuss Automobiltechnik (NAAutomobil) im DIN, *Straßenfahrzeuge – Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten - Begriffe*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN ISO 8855, 2013
- Dyc 71** Dyckerhoff, G. A.; Sell, P.-J.: *Über den Einfluss der Grenzflächenspannung auf die Haftfestigkeit*, Die Angewandte Makromolekulare Chemie, Jahrgang 21, Nr. 312, S. 169-185, 1972
- Eic 94** Eichhorn, U.: *Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn – Einflussgrößen und Erkennung*, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 222, ISBN: 3-18-322212-4, 1994

- Eic 01** Eichler, H. J.; Kronfeld, H.-D.; Sahm, J.: *Das Neue Physikalische Grundpraktikum*, Springer-Verlag, ISBN: 3-540-63109-7, 2001
- Ezz 08** Ezzat, F. H.; Ali, W. Y.; Hasouna, A. T.: *Friction Coefficient of Rubber Sliding Against Polymeric Indoor Flooring Materials of Different Surface Roughness*, KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe, Jahrgang 61, Heft Dezember, S. 638 - 641, 2008
- Fis 00** Fischlein, H.: *Untersuchung des Fahrhahnoberflachen-einflusses auf das Kraftschlussverhalten von PKW-Reifen*, Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 414, ISBN: 3-18-341412-0, 2000
- Fow 64** Fowkes, F. M.: *Attractive Forces at Interfaces*, Industrial and Engineering Chemistry, Volume 56, Number 12, Pages 40 - 52, 1964
- Fri 13** Friel, S.; Kane, M.; Woodward, D.: *Use Wehner Schulze to predict skid resistance of Irish surfacing materials*, ASCE - American Society of Civil Engineers, Airfield and Highway Pavement, ISBN: 978-0-7844-1300-5, Pages 817 - 828, 2013
- Ful 75** Fuller, K. N. G.; Tabor, D.: *The Effect of surface Roughness on the Adhesion of Elastic Solids*, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, Volume 345, No. 1642, Pages 327 - 342, 1975
- Gen 67** Gengenbach, W.: *Das Verhalten von Kraftfahrzeugreifen auf trockener und insbesondere nasser Fahrbahn - Experimentelle Untersuchungen auf Prüfstand und Straße*, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1967
- Gen 68a** Gengenbach, W.: *Experimentelle Untersuchung von Reifen auf nasser Fahrbahn Teil1: Meßgeräte und Meßverfahren*, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Jahrgang 70, Heft 3, S. 83 - 89, 1968

- Gen 68b** Gengenbach, W.: *Experimentelle Untersuchung von Reifen auf nasser Fahrbahn Teil2: Meßergebnisse*, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Jahrgang 70, Heft 8, S. 288 – 293, 1968
- Gen 68c** Gengenbach, W.: *Experimentelle Untersuchung von Reifen auf nasser Fahrbahn Teil3: Weitere Meßergebnisse*, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Jahrgang 70, Heft 9, S. 310 – 316, 1968
- Gen 70** Gengenbach, W.; Weber, R.: *Der Einfluss des Fahrbahnbelags, der Geschwindigkeit und der Profiltiefe von Reifen auf den Kraftschluss bei Nässe*, Automobil Industrie, Jahrgang 70, Heft 4, S. 69 ff., 1970
- Gey 71** Geyer, W.: *Beitrag zur Gummireibung auf trockenen und insbesondere nassen Oberflächen*, Dissertation, Universität München, 1971
- Gie 97** Gietzelt, T.: *Charakterisierung der oberflächen-energetischen Eigenschaften von Maleimid-Copolymeren mit unterschiedlicher molekularer Struktur*, Dissertation, Technische Universität Dresden, 1997
- Gna 95** Gnadler, R.; Unrau, H.-J.; Fischlein, H.; Frey, M.: *Ermittlung von  $\mu$ -Schlupf-Kurven an PKW-Reifen*, Forschungsvereinigung Automobiltechnik, FAT Schriftenreihe Nr. 119, ISSN 0933-050X, 1995
- Gna 96** Gnadler, R.; Unrau, H.-J.; Fischlein, H.; Frey, M.: *Umfangskraftverhalten von PKW-Reifen bei unterschiedlichen Fahrbahnzuständen*, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Jahrgang 98, Heft 9, S. 458 – 466, 1996
- Gna 15a** Gnadler, R.; Gauterin, F.; Unrau, H.-J.: *Scriptum zur Vorlesung: Grundlagen der Fahrzeugtechnik II*, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Karlsruher Institut für Technologie, 2015

- Gna 15b** Gnadler, R.; Unrau, H.-J.: *Scriptum zur Vorlesung: Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen I*, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Karlsruher Institut für Technologie, 2015
- Gna 15c** Gnadler, R.; Unrau, H.-J.: *Scriptum zur Vorlesung: Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen II*, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Karlsruher Institut für Technologie, 2015
- Got 11** Gottschalk, F.: *Inbetriebnahme des Griffigkeits- und Abriebprüfstandes und Durchführung von Griffigkeitsmessungen auf unterschiedlichen Fahrbahntexturen*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST). Diplomarbeit, Nr. 11-F-0028, 2011
- Gri 10** Grimmig, F.: *Umbau des Gummiabriebprüfstandes zum Griffigkeitsprüfstand für nasse Fahrbahnbeläge*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST), Diplomarbeit, Nr. 10-F-0039, 2010
- Gro 96** Grosch, K. A.: *Laborbestimmung der Abrieb- und Rutschfestigkeit von Laufflächenmischungen – Teil 1: Rutschfestigkeit*, KGK – Kautschuk Gummi Kunststoffe, Jahrgang 49, Heft 6, Seiten 432 – 441, 1996
- Gro 14** Grote, K.-H.; Feldhusen, J.: *Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau*, 24. Auflage, Springer-Vieweg, ISBN: 978-3-642-38891-0, 2014
- Gül 15** Gültlinger, J.: *Kraftübertragung und Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen*, Dissertation, KIT Scientific Publishing, Karlsruher Schriftenreihe – Fahrzeugsystemtechnik, Band 34, ISBN: 978-3-7315-0,58-3, 2015

- Hah 80** Hahn, P.: *Der Einfluss der Laufflächenkrümmung und des Querschnittverhältnisses von Pkw-Reifen auf das Kraftschlussverhalten auf nasser Fahrbahn*, Kautschuk und Gummi – Kunststoffe, Jahrgang 33, Heft 7, S. 539 ff., 1980
- Har 19** Harkins, W. D.: *Cohesion, Internal Pressure, Adhesion, Tensile Strength, Tensile Energy, Negative Surface Energy, and Molecular Attraction*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Volume 5, Issue 12, Pages 562 – 568, 1919
- Har 91** Hartmann, B.: *Bremsen auf nassen Fahrbahnen*, VDI-Berichte, 916, ISBN: 3-18-090916-1, Seiten 185 – 215, 1991
- Hei 07** Heinz, M.; Grosch, K. A.: *A Laboratory Method to comprehensively evaluate Abrasion, Traction and Rolling Resistance of Tire Tread Compounds*, Rubber Chemistry and Technology, Volume 80, Number 4, Pages 580 – 607, 2007
- Hei 13** Heißing, B.; Ersoy, M.; Gies, S.: *Fahrwerkhandbuch – Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven*, ATZ/MTZ-Fachbuch, 4. Auflage, Springer-Vieweg-Verlag, ISBN: 978-3-658-01991-4, 2013
- Hie 87** Hiersche, E.-U.; Tenzinger, B.: *Zusammenhänge zwischen dem Strassenzustand und dem Unfallgeschehen, dem Energiebedarf sowie dem Zeitaufwand*, Straße und Autobahn: Zeitschrift fuer Strassen- und Brueckenbau, Strassenerhaltung, Strassenplan..., Jahrgang 38, Heft 2, S. 39 – 45, 1987
- Hip 07** Hipp, B.: *Konstruktion eines Prüfstandes zur Ermittlung der Abriebfestigkeit von Gummiprobe*n, Universität Karlsruhe (TH), Institut für Fahrzeugtechnik und Mobile Arbeitsmaschinen (IFFMA), Diplomarbeit, Nr. 08-F-0027, 2008

- Hla 05** Hlawacek, G.: *Kontaktwinkelmessung*, Institut für Physik, Montanuniversität Leoben, 2005, Link: <http://institute.unileoben.ac.at/physik/Me%DFtechnik/Kontaktwinkelmessung.pdf>, abgerufen am 23.09.2015
- Hor 83** Horne, W. B.; Buhlmann, F.; *A Method for Rating the Skid Resistance and Micro/Macrotecture Characteristics of Wet Pavements*, Frictional interaction of tire and pavement, ASTM STP 793, Pages 191 – 218, 1983
- Hüs 11** Hüsemann, T. C.: *Adaption von Labor-Reifenkennfeldern an reale Fahrbahnoberflächen*, Dissertation, Schriftenreihe Automobiltechnik, RWTH Aachen, ISBN: 978-3-940374-51-6, 2011
- Isr 11** Israelachvili, J. N.: *Intermolecular and Surface Forces*, Elsevier, Third Edition, ISBN: 978-0-12—375182-9, 2011
- Juh 11** Juhart, J.: *Adhäsion von UHPC an Stahl und Glas – Ein Beitrag zu Adhäsion und Haftfestigkeit von Hochleistungs- und Ultra-Hochleistungs-Feinkornbeton an Stahl und Glas unterschiedlicher Rauheit*, Dissertation, Technische Universität Graz, 2011
- Kal 86** Kalender, U.: *Wechselwirkung Reifen / Fahrbahnoberfläche auf den Kraftschluss bei Nässe und hohen Fahrgeschwindigkeiten bei Verwendung neuester Reifentypen Teil II*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 498, 1986
- Ken 05** Kendziorra, N.: *Reibtheorien als Schlüsselement bei der Einstellung der Fahrbahngriffigkeit und der Online Glättedetektion*, VDI-Berichte 1912, ISBN: 3-18-091912-4, 2005
- Ken 09** Kendziorra, N.; Wies, B.; Schulze, C.; Steinauer, B.; Meyer, A.; Ueckermann, A.: *Integrale Betrachtung der Fahrbahngriffigkeit aus Reifen / Fahrbahnsicht*, VDI-Berichte 2086, ISBN: 978-3-18-092086-3, 2009



- Kir 80** Kirste, T.: *Untersuchung über den Einfluss eines Schmierfilms auf die Fahrbahngriffigkeit*, Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren, FKFS-Bericht Nr. 7, 1980
- Klü 00** Klüppel, M; Heinrich, G.: *Rubber friction on self-affine road tracks*, Rubber Chemistry and Technology, Jahrgang 73, Heft 4, S. 578 – 606, 2000
- Koc 13** Kochendörfer, G.: *Konstruktion und Aufbau einer Vorrichtung zur automatisierten und manuellen Einstellung des Schräglaufwinkels am Griffigkeit- und Abriebprüfstand (GAT)*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST), Studienarbeit, Nr. 13-F-0014, 2013
- Kok 98** Kokkalis, A. G.; Panagouli, O. K.: *Fractal Evaluation of Pavement Skid Resistance Variations I – Surface Wetting*, Chaos, Solitons & Fractals, Volume 9, Issue 11, Pages 1875 – 1890, 1998
- Krü 15** Krüss – Advancing your Surface Science, *Glossar*, Krüss GmbH, <http://www.kruss.de/>, abgerufen am 28.09.15
- Kum 64** Meyer, W. E.; Kummer, H. W.: *Die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn*, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Jahrgang 66, Heft 9, S. 245 – 250, 1964
- Kum 66** Kummer, H. W.: *Unified Theory of Rubber and Tire Friction*, Engineering Research Bulletin, B-94, Pennsylvania State University, 1966
- Kum 67** Kummer, H. W.; Meyer, W. E.: *Verbesserter Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn – Ergebnisse einer neuen Reibungstheorie*, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Jahrgang 69, Heft 8, S. 245 – 251, 1967

- Kum 68** Kummer, H. W.: *Lubricated Friction of Rubber Discussion*, Rubber Chemistry and Technology, Jahrgang 41, Heft 4, S. 895 - 907, 1968
- LeG 05** Le Gal, A.; Yang, X.; Klüppel, M.: *Evaluation of sliding friction and contact mechanics of elastomers based on dynamic-mechanical analysis*, The Journal of Chemical Physics, Jahrgang 123, 014704, S. 1 – 11, 2005
- LeG 08** Le Gal, A.; Klüppel, M.: *Investigation and modelling of rubber stationary friction on rough surfaces*, Journal of Physics: Condensed Matter, Jahrgang 20, 015007, S. 1 – 13, 2008
- Li 04a** Li, K. W.; Chang, W.-R.; Leamon, T. B.; Chen, C. J.: *Floor slipperiness measurement: friction coefficient, roughness of floors, and subjective perception under spillage conditions*, Safety Science, Jahrgang 42, S. 547 – 565, 2004
- Li 04b** Li, K. W.; Chen, C. J.: *The effect of shoe soling tread groove width on the coefficient of friction with different sole materials, floors, and contaminations*, Applied Ergonomics, Jahrgang 35, S. 499 – 507, 2004
- Lin 14** Linke, T.; Wangenheim, M.; Lind, H.; Ripka, S.: *Experimental Friction and Temperature Investigation on Aircraft Tires*, Tire Science and Technology, TSTCA, Volume 42, Number 3, Pages 116 – 144, 2014
- Lit 88** Litzka, J.; Friedl, E.: *Untersuchungen über den maßgebenden Reibwert*, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Straßenforschung, Heft 376, 1988
- Lor 15** Lorenz, B.; Oh, Y. R.; Nam, S. K.; Jeon, S. H.; Persson, B. N. J.: *Rubber friction on road surfaces: Experiment and theory for low sliding speeds*, The Journal of chemical Physics, Volume 142, Pages 1 - 12, 2015

- Maz 13** Mazzola, L.; Galderisi, A.; Fortunato, G.; Ciaravola, V.; Giustiniano, M: *Influence of Surface Free Energy and Wettability on Friction Coefficient between Tire and Road Surface in Wet Conditions*, Advances in Contact Angle, Wettability and Adhesion, Scrivener Publishing, Volume 1, ISBN: 978-1-118-47292-7, Pages 389 – 410, 2013
- Mic 05** Michelin Reifenwerke KGaA, *Der Reifen – Haftung – was Auto und Straße verbindet*, Société de Technologie, Michelin, Deutsche Erstauflage, ISBN: 2-06-711659-2, 2005
- Mih 13** Mihajlovic, S.; Wallaschek, J.; Kutscher, U.; Schulze, T; Torbrügge, S.; Wiese, K.: *Portable Linear Friction Tester – Eine Messmethode zur objektiven Charakterisierung der Reibung im Reifen-Fahrbahn-Kontakt*, Tagungsband: 14. Internationale VDI-Tagung Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn, ISBN: 978-3-18-092211-9, Seiten 41 – 42, 2013
- Miz 10** Mizote, N.; Katakai, A.; Tamada, M.; Matsuoka, H.: *Surface Modification of Vulcanized Rubber by Radiation Grafting, Part 1: Improvement in Friction Behaviour*, Journal of Applied Polymer Science, Jahrgang 117, Heft 5, S. 2825 – 2830, 2010
- Mof 08** Mofidi, M.; Prakash, B.; Persson, B. N. J.; Albohr, O.: *Rubber friction on (apparently) smooth lubricated surfaces*, Journal of Physics: Condensed Matter, Jahrgang 20, S. 1 - 8, 2008
- Moo 65** Moore, D. F.: *Drainage Criteria for Runway Surface Roughness*, Journal of the Royal Aeronautical Society, Volume 69, May, Pages 337 – 342, 1965
- Moo 72** Moore, D. F.: *The Friction and Lubrication of Elastomers*, Pergamon Press, Oxford, 1972
- Owe 69** Owens, D. K.; Wendt, R. C.: *Estimation of the Surface Free Energy of Polymers*, Journal of Applied Polymer Science, Volume 13, Pages 1741 – 1747, 1969

- Pac 12** Pacejka, H. B.: *Tire and vehicle dynamics*, Elsevier, Amsterdam, ISBN: 978-0-08-097016-5, 2012
- Pel 79** Pelloli, R.: *Griffigkeitsmessungen mit dem Skiddometer – weitere Messungen*, Mitteilung Nr. 41, Institut für Straßen-Eisenbahn- und Felsbau, ETH-Zürich, 1979
- Per 98** Persson, B. N. J.: *On the theory of rubber friction*, Surface Science, Volume 401, Issue 3, Pages 445 – 454, 1998
- Per 99** Persson, B. N. J.: *Sliding friction*, Surface Science Reports, Volume 33, Issue 3, Pages 83 – 119, 1999
- Per 00a** Persson, B. N. J.; Tosatti, E.: *Qualitative theory of rubber friction and wear*, Journal of Chemical Physics, Volume 112, Number 4, Pages 2021 - 2029, 2000
- Per 00b** Persson, B. N. J.: *Sliding Friction – Physical Principles and Applications*, 2<sup>nd</sup> Edition, Springer Verlag, ISBN: 3-54067192-7, 2000
- Per 01** Persson, B. N. J.: *Theory of rubber friction and contact mechanics*, Journal of Chemical Physics, Volume 115, Issue 8, Pages 3840 – 3861, 2001
- Per 02** Persson, B. N. J.: *Adhesion between Elastic Bodies with Randomly Rough Surfaces*, Physical Review Letters, Volume 89, Number 24, Pages 1 – 4, 2002
- Per 04a** Persson, B. N. J.: *Rubber Friction on Wet Rough Substrates at Low Sliding Velocity: The Sealing Effect*, KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe, Jahrgang 57, Heft 10, S. 532 – 537, 2004
- Per 04b** Persson, B. N. J.; Tartaglino, U.; Albohr, O.; Tosatti, E.: *Sealing is at the origin of rubber slipping on wet roads*, Nature Materials, Jahrgang 3, S. 882 – 885, 2004

- Per 04c** Persson, B. J. N.; Albohr, O.; Creton, C.; Peveri, V: Contact area between a viscoelastic solid and a hard, randomly rough, substrate, *The Journal of chemical Physics*, Volume 120, Number 18, Pages 8779 – 8793, 2004
- Per 05** Persson, B. N. J.; *Rubber friction on wet and dry road surfaces: The sealing effect*, *Physical Review B*, Volume 71, Issue 3, Pages 1 – 8, 2005
- Per 06** Persson, B. N. J.; Volokitin, A. I.: Rubber friction on smooth surfaces, *The European Physical Journal E*, Volume 21, Issue 1, Pages 69 – 80, 2006
- Per 11** Persson, B. N. J.: *Rubber friction and tire dynamics*, *Journal of Physics: Condensed Matter*, Volume 23, Pages 1 – 14, 2011
- Pop 09** Popov, V. L.: *Kontaktmechanik und Reibung – Ein Lehr- und Anwendungsbuch von der Nanotribologie bis zur numerischen Simulation*, Springer-Verlag, ISBN: 978-3-540-88837-6, 2009
- Rab 71** Rabel, W.: *Einige Aspekte der Benetzungstheorie und ihre Anwendung auf die Untersuchung und Veränderung der Oberflächeneigenschaften von Polymeren*, Farbe und Lack, 77. Jahrgang, Nr. 10, 1971
- Res 09** Restolho, J.; Mata, J. L.; Saramago, B.: *On the interfacial behavior of ionic liquids: Surface tensions and contact angles*, *Journal of Colloid and Interface Science*, Volume 340, Issue 1, Pages 82 – 86, 2009
- Ric 08** Richter, D.; Heindel, M.: *Straßen- und Tiefbau*, Teubner, 10. Auflage, ISBN: 978-3-8351-0057-2, 2008

- Rie 15** Riehm, P.; Unrau, H.-J.; Gauterin, F.; Torbrügge, S.; Wies, B.: *Einfluss der Fahrbahntextur auf die longitudinale Charakteristik von PKW-Reifen bei trockener und nasser Fahrbahn*, 15. Internationale VDI-Tagung „Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn“, ISBN: 978-3-18-092241-6, Seiten 131 - 155, 2015
- Rou 13** Rouxhet, P. G.: *Contact Angles and Surface Energy of Solids: Relevance and Limitations*, Advances in Contact Angle, Wettability and Adhesion, Scrivener Publishing, Volume 1, ISBN: 978-1-118-47292-7, Pages 349 – 376, 2013
- Sam 07a** Samy, A. M.; Mahmoud, M. M.; Khashaba, M. I.; Ali, W. Y.: *Friction of Rubber Sliding Against Ceramics Part I – Dry and Water Lubricated Conditions*, KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe, Jahrgang 60, Heft Juni, S. 322 - 327, 2007
- Sam 07b** Samy, A. M.; Mahmoud, M. M.; Khashaba, M. I.; Ali, W. Y.: *Friction of Rubber Sliding Against Ceramics Part II – Influence of Oil and Oil-Water Lubrication*, KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe, Jahrgang 60, Heft Dezember, S. 693 - 696, 2007
- Sam 08** Samy, A. M.; Mahmoud, M. M.; Khashaba, M. I.; Ali, W. Y.: *Friction of Rubber Sliding Against Ceramics Part III – Influence of Sand Contamination of Lubricating Fluids*, KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe, Jahrgang 61, Heft Januar/Februar, S. 43 - 48, 2008
- Sca 12** Scaraggi, M.; Persson, B. N. J.: *Time-Dependent Fluid Squeeze-Out Between Soft Elastic Solids with Randomly Rough Surfaces*, Tribology Letters, Volume 47, Issue 3, Pages 409 – 416, 2012
- Sch 69** Schulze, K. H.: *Zur quantitativen Bewertung der Rauheit von Straßenoberflächen in Beziehung zum Reibungswiderstand bei Nässe*, Dissertation, Technische Universität Berlin, Wachtberg-Vilip, 1969

- Sch 79** Schulze, K. H.: *Griffigkeit und Rauheit*, Handbuch des Straßenbaus, Band 1, Herausgeber Wehner; Schulze, Siedek, Springer-Verlag, 1979
- Sch 95** Schrader, M. E.: *Young-Dupre Revisited*, Langmuir, Volume 11, Issue 9, Pages 3585 – 3589, 1995
- Sch 09** Schmid, A.; Förschl, S.: *Vom realen zum virtuellen Reifen – Reifenmodellparametrierung*, ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift, Jahrgang 111, Heft 3, Seiten 188 – 193, 2009
- Sch 10** Schulze, T.; Bolz, G.; Strübel, C.; Wies, B.: *Reifen im Zielkonflikt zwischen Rollwiderstand und Nassgriff*, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Jahrgang 112, Heft 7/8, S. 516 – 523, 2010
- Slu 02** van der Sluis, S.; Mayer, G.; Steinauer, B.; Platen, C.; *Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen*, Forschung Straßenbau und Straßenwesen, Heft 841, ISBN 3-934458-71-8, 2002
- TLA 14** Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen, *Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsbefestigungen: TL Asphalt-StB 07/13*, FGSV, 797, ISBN: 978-3-939715-69-6, 2014
- TLB 08** Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsausschuss Technische Vertragsbedingungen – Betonstrassen, *Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton: TL Beton-StB 07*, FGSV, 891, ISBN: 978-3-939715-59-7, 2008
- TLG 08** Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsausschuss Gesteinskörnung, *Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau: TL Gestein-StB 04*, FGSV, 613, ISBN: 978-3-939715-50-4, 2008

- TLP 06** Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitskreis: ZTV-Pflaster, *Technische Lieferbedingungen für Bauprodukte zur Herstellung von Pflasterdecken, Plattenbelägen und Einfassungen: TL Pflaster-StB 06*, FGSV, 643, ISBN: 3-937356-89-4, 2006
- Tor 14** Torbrügge, S.; Wies, B.; Neddenriep, T.; Ehlich, J.: *Vollautomatisierte Hallenprüfanlage für Reifen und ABS-Bremssysteme*, ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift, Jahrgang 116, Heft 05, Seiten 62 – 66, 2014
- Tor 15** Torbrügge, S.; Ignatyev, P. A.; Ripka, S.; Wies, B.: *Friction of tyre tread compounds on rough surfaces: A combined experimental and theoretical study*, Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Tyre Colloquium – Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis, ISBN: 978-1-84469-032-9 Seiten 234 – 242, 2015
- Unr 97** Unrau, H.-J.; Zamow, J.: *TYDEX-Format – Description and Reference Manual – Release 1.3*, Bezugsquelle: [https://www.fast.kit.edu/download/DownloadsFahrzeugtechnik/TY100531\\_TYDEX\\_V1\\_3.pdf](https://www.fast.kit.edu/download/DownloadsFahrzeugtechnik/TY100531_TYDEX_V1_3.pdf), Link vom 26.06.2015, 1997
- Van 88** Van Oss, C. J.; Chaudhury, M. K.; Good, R. J.: *Interfacial Lifshitz-van der Waals and Polar Interactions in Macroscopic Systems*, American Chemical Society, Chemical Reviews, Volume 88, Number 6, Pages 927 – 941, 1988
- Van 97** Van Oosten, J. J. M.; Unrau, H.-J.; Riedel, A.; Bakker, E.: *TYDEX Workshop: Standardisation of Data Exchange in Tyre Testing and Tyre Modelling*, Vehicle System Dynamics, International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, Jahrgang 27, S1, S. 272 – 288, 1997
- Vel 13** Velske, S.; Mentlein, H.; Eymann, P.: *Strassenbau, Strassenabutechnik*, Werner-Verlag, 7. Auflage, ISBN: 978-3-8041-3883-4, 2013



- Weh 70** Wehner, B.; Schulze, K.-H.: *Internationales Colloquium über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe*, Berichte des Instituts für Straßen- und Verkehrswesen, Technische Universität Berlin, ISBN: 3-433-00177-4, 1970
- Weh 75** Wehner, B.; Schulze, K.-H.; Dames, J.; Lange, H.: „*Untersuchung über die Verkehrssicherheit bei Nässe*“ und „*Griffigkeitsmessungen bei hohen Geschwindigkeiten*“, Forschungsberichte, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 189, 1975
- Wei 13** Weiß, L.: *Inbetriebnahme einer Vorrichtung zur Verstellung des Schräglaufwinkels am GAT und Durchführung erster Untersuchungen*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST), Diplomarbeit, Nr. 13-F-0116, 2013
- Wie 05** Wiehler, H.-G.; Wellner, F.: *Strassenbau – Konstruktion und Ausführung*, Huss-Medien GmbH, Verlag Bauwesen, 5. Auflage, ISBN: 3-345-00812-2, 2005
- Woh 01** Wohanka, U.: *Ermittlung von Reifenkennfeldern auf definiert angeordneten Fahrbahnen*, Dissertation, Universität Stuttgart, Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Band 18, ISBN: 3-8169-2105-1, 2001
- Wu 73** Wu, S.: *Polar and Nonpolar Interactions in Adhesion*, The Journal of Adhesion, Volume 5, Pages 39 – 55, 1973
- Yin 11** Yin, C.; Meyer, A.: *Influence of Adhesion on the Tire-Road Friction Process regarding Asphalt Type and Sliding Speed*, ASCE American Society of Civil Engineers, Road Pavement and Material Characterization, Modelling, and Maintenance, S. 122 - 129, 2011

- Zal 09** Zaal, A: *Optimierung eines Prüfstandes zur Durchführung von reproduzierbaren Gummiabriebmessungen*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST), Studienarbeit, Nr. 10-F-0022, 2010
- Zel 13** Zelenev, A. S.; Lett, N.: *Surface Free Energy and Wettability of Different Oil and Gas Reservoir Rocks*, Advances in Contact Angle, Wettability and Adhesion, Scrivener Publishing, Volume 1, ISBN: 978-1-118-47292-7, Pages 377 – 388, 2013
- Zho 15** Zhou, Y.; Gauterin, F.; Unrau, H.-J.; Frey, M.: *Experimental Study of Wheel-Suspension Dynamics in Rolling over Cleat and Abrupt Braking Conditions*, Tire Science and Technology, Volume 43, Number 1, Pages 42 – 71, 2015
- ZTV 06** Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitskreis: ZTV-Pflaster, *Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Herstellung von Pflasterdecken, Plattenbelägen und Einfassungen: ZTV Pflaster-StB 06*, FGSV, 699, ISBN: 3-937356-88-6, 2006
- ZTV 08** Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Betonbauweisen, *Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton: ZTV Beton-StB 07*, FGSV, 899, ISBN: 978-3-939715-58-0, 2008
- ZTV 13** Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen, *Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt: ZTV Asphalt-StB 07/13*, FGSV, 799, ISBN: 978-3-939715-68-9, 2013





# Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

---

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 1** Urs Wiesel  
**Hybrides Lenksystem zur Kraftstoffeinsparung im schweren Nutzfahrzeug.** 2010  
ISBN 978-3-86644-456-0
- Band 2** Andreas Huber  
**Ermittlung von prozessabhängigen Lastkollektiven eines hydrostatischen Fahrantriebsstrangs am Beispiel eines Teleskopladers.** 2010  
ISBN 978-3-86644-564-2
- Band 3** Maurice Bliesener  
**Optimierung der Betriebsführung mobiler Arbeitsmaschinen. Ansatz für ein Gesamtmaschinenmanagement.** 2010  
ISBN 978-3-86644-536-9
- Band 4** Manuel Boog  
**Steigerung der Verfügbarkeit mobiler Arbeitsmaschinen durch Betriebslastfassung und Fehleridentifikation an hydrostatischen Verdrängereinheiten.** 2011  
ISBN 978-3-86644-600-7
- Band 5** Christian Kraft  
**Gezielte Variation und Analyse des Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen mittels elektrischer Linearaktuatoren im Fahrwerksbereich.** 2011  
ISBN 978-3-86644-607-6
- Band 6** Lars Völker  
**Untersuchung des Kommunikationsintervalls bei der gekoppelten Simulation.** 2011  
ISBN 978-3-86644-611-3
- Band 7** 3. Fachtagung  
**Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 17. Februar 2011, Karlsruhe.** 2011  
ISBN 978-3-86644-599-4

# Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

---

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 8** Vladimir Iliev  
**Systemansatz zur anregungsunabhängigen Charakterisierung des Schwingungskomforts eines Fahrzeugs.** 2011  
ISBN 978-3-86644-681-6
- Band 9** Lars Lewandowitz  
**Markenspezifische Auswahl, Parametrierung und Gestaltung der Produktgruppe Fahrerassistenzsysteme. Ein methodisches Rahmenwerk.** 2011  
ISBN 978-3-86644-701-1
- Band 10** Phillip Thiebes  
**Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. Grundlegende Erkenntnisse und Zusammenhänge, Vorstellung einer Methodik zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses und deren Validierung am Beispiel einer Forstmaschine.** 2012  
ISBN 978-3-86644-808-7
- Band 11** Martin Gießler  
**Mechanismen der Kraftübertragung des Reifens auf Schnee und Eis.** 2012  
ISBN 978-3-86644-806-3
- Band 12** Daniel Pies  
**Reifenungleichförmigkeitserregter Schwingungskomfort – Quantifizierung und Bewertung komfortrelevanter Fahrzeugschwingungen.** 2012  
ISBN 978-3-86644-825-4
- Band 13** Daniel Weber  
**Untersuchung des Potenzials einer Brems-Ausweich-Assistenz.** 2012  
ISBN 978-3-86644-864-3
- Band 14** **7. Kolloquium Mobilhydraulik.**  
**27./28. September 2012 in Karlsruhe.** 2012  
ISBN 978-3-86644-881-0
- Band 15** 4. Fachtagung  
**Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen**  
**20. Februar 2013, Karlsruhe.** 2013  
ISBN 978-3-86644-970-1

# Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

---

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 16** Hans-Joachim Unrau  
**Der Einfluss der Fahrbahnoberflächenkrümmung auf den Rollwiderstand, die Cornering Stiffness und die Aligning Stiffness von Pkw-Reifen.** 2013  
ISBN 978-3-86644-983-1
- Band 17** Xi Zhang  
**Untersuchung und Entwicklung verschiedener Spurführungsansätze für Offroad-Fahrzeuge mit Deichselverbindung.** Noch nicht erschienen  
ISBN 978-3-7315-0005-6
- Band 18** Stefanie Grollius  
**Analyse des gekoppelten Systems Reifen-Hohlraum-Rad-Radführung im Rollzustand und Entwicklung eines Rollgeräuschmodells.** 2013  
ISBN 978-3-7315-0029-2
- Band 19** Tobias Radke  
**Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien.** 2013  
ISBN 978-3-7315-0069-8
- Band 20** David Gutjahr  
**Objektive Bewertung querdynamischer Reifeneigenschaften im Gesamtfahrzeugversuch.** 2014  
ISBN 978-3-7315-0153-4
- Band 21** Neli Ovcharova  
**Methodik zur Nutzenanalyse und Optimierung sicherheitsrelevanter Fahrerassistenzsysteme.** 2014  
ISBN 978-3-7315-0176-3
- Band 22** Marcus Geimer, Christian Pohlandt  
**Grundlagen mobiler Arbeitsmaschinen.** 2014  
ISBN 978-3-7315-0188-6
- Band 23** Timo Kautzmann  
**Die mobile Arbeitsmaschine als komplexes System.** 2014  
ISBN 978-3-7315-0187-9

# Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

---

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 24** Roman Weidemann  
**Analyse der mechanischen Randbedingungen zur Adaption der oszillierenden Hinterschneidtechnik an einen Mobilbagger.** 2014  
ISBN 978-3-7315-0193-0
- Band 25** Yunfan Wei  
**Spurführungsregelung eines aktiv gelenkten Radpaars für Straßenbahnen.** 2014  
ISBN 978-3-7315-0232-6
- Band 26** David Schmitz  
**Entwurf eines fehlertoleranten Lenkventils für Steer-by-Wire Anwendungen bei Traktoren.** 2014  
ISBN 978-3-7315-0264-7
- Band 27** Christian Schwab  
**Beitrag zu einer universellen Baggerschnittstelle zur Übertragung elektrischer und hydraulischer Leistung sowie elektronischer Signale für komplexe Anbaugeräte.** 2014  
ISBN 978-3-7315-0281-4
- Band 28** Peter Dengler  
**Untersuchung zum effizienten Betrieb von Hydraulikzylindern in Konstantdrucksystemen unter Verwendung einer Zwischendruckleitung.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0295-1
- Band 29** Manuel Bös  
**Untersuchung und Optimierung der Fahrkomfort- und Fahrdynamikeigenschaften von Radladern unter Berücksichtigung der prozessspezifischen Randbedingungen.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0310-1
- Band 30** 5. Fachtagung  
**Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen**  
**25. Februar 2015, Karlsruhe.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0323-1



# Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

---

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 31** Michael Eckert  
**Energieoptimale Fahrdynamikregelung  
mehrmotoriger Elektrofahrzeuge.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0332-3
- Band 32** Martin Scherer  
**Beitrag zur Effizienzsteigerung mobiler Arbeitsmaschinen.  
Entwicklung einer elektrohydraulischen Bedarfsstromsteuerung  
mit aufgeprägtem Volumenstrom.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0339-2
- Band 33** Rinaldo Arnold  
**Automatische Abstimmung der Sekundärseite eines  
dreiphasigen Systems zur berührungslosen induktiven  
Energieübertragung.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0355-2
- Band 34** Johannes Gültlinger  
**Kraftübertragung und Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0358-3
- Band 35** Thorsten Dreher  
**Energieeffizienz von Konstantdrucksystemen mit  
sekundärgeregelten Antrieben beim Einsatz in  
mobilen Arbeitsmaschinen.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0377-4
- Band 36** Steffen Kölling  
**Konzeptionelle Untersuchung zur Neigekompensation  
von Stromabnehmern.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0387-3
- Band 37** Michael Fritz  
**Entwicklungswerkzeuge für die Fahrzeugklimatisierung  
von Nutzfahrzeugen.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0384-2

# Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

---

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 38** Ralf Oberfell  
**Stochastische Simulation von Energieflüssen im Nutzfahrzeug. Ein einsatzorientiertes Bewertungs- und Optimierungsverfahren.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0403-0
- Band 39** Christoph Sturm  
**Bewertung der Energieeffizienz von Antriebssystemen mobiler Arbeitsmaschinen am Beispiel Bagger.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0404-7
- Band 40** Florian Netter  
**Komplexitätsadaption integrierter Gesamtfahrzeugsimulationen.** 2016  
ISBN 978-3-7315-0414-6
- Band 41** Markus Springmann  
**Auslegung eines asynchronen Langstatorlinearmotors mit großem Luftspalt als Straßenbahnantrieb.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0418-4
- Band 42** Alexander Basler  
**Eine modulare Funktionsarchitektur zur Umsetzung einer gesamtheitlichen Betriebsstrategie für Elektrofahrzeuge.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0421-4
- Band 43** Hans-Georg Wahl  
**Optimale Regelung eines prädiktiven Energiemanagements von Hybridfahrzeugen.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0422-1
- Band 44** Jennifer Heck  
**Zur Simulation des Rad-Schiene-Verschleißes bei Straßenbahnen.** 2016  
ISBN 978-3-7315-0443-6

# Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

---

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 45** Moritz Vaillant  
**Design Space Exploration zur multikriteriellen Optimierung elektrischer Sportwagenantriebsstränge: Variation von Topologie und Komponenteneigenschaften zur Steigerung von Fahrleistungen und Tank-to-Wheel Wirkungsgrad.** 2016  
ISBN 978-3-7315-0452-8
- Band 46** Philip Nagel  
**Entwicklung einer Betriebsstrategie zur Energierückgewinnung in hybriden Mehrverbrauchersystemen.** 2016  
ISBN 978-3-7315-0479-5
- Band 47** Matthias Pfriem  
**Analyse der Realnutzung von Elektrofahrzeugen in kommerziellen Flotten zur Definition einer bedarfsgerechten Fahrzeugauslegung.** 2016  
ISBN 978-3-7315-0489-4
- Band 48** Mohanad El-Haji  
**Ontologie-basierte Definition von Anforderungen an Validierungswerkzeuge in der Fahrzeugtechnik.** 2016  
ISBN 978-3-7315-0496-2
- Band 49** **9. Kolloquium Mobilhydraulik**  
**22./23. September 2016 in Karlsruhe.** 2016  
ISBN 978-3-7315-0573-0
- Band 50** 6. Fachtagung  
**Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen**  
**15. Februar 2017, Karlsruhe.** 2017  
ISBN 978-3-7315-0601-0
- Band 51** Fabian Schirmaier  
**Experimentelle Untersuchung und Simulation des Umformverhaltens nähgewirkter unidirektionaler Kohlenstofffasergelege.** 2017  
ISBN 978-3-7315-0620-1

# Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

---

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 52** Mathias Cabrera Cano  
**Neuronale Netze mit externen Laguerre-Filtern zur automatischen numerischen Vereinfachung von Getriebemodellen.** 2017  
ISBN 978-3-7315-0621-8
- Band 53** Arwed Schmidt  
**Flottenbetrieb von elektrischen und autonomen Serviceagenten im städtischen Personennahverkehr.** 2017  
ISBN 978-3-7315-0633-1
- Band 54** Katharina Knaisch  
**Untersuchung von Spulensystemen zur induktiven Energieübertragung von Elektrofahrzeugen. Vergleich von Topologien und Entwicklung einer Auslegungsmethodik.** 2017  
ISBN 978-3-7315-0630-0
- Band 55** Frank Christof Stalter  
**Ansätze zur akustischen Optimierung von Reifen und Fahrbahnen für Elektrofahrzeuge unter Antriebsmoment.** 2017  
ISBN 978-3-7315-0645-4
- Band 56** Steffen Rose  
**Modellbildung und Simulation von mobilen Arbeitsmaschinen. Untersuchungen zu systematischen Modellvereinfachungen in der Simulation von Antriebssystemen am Beispiel Bagger.** 2017  
ISBN 978-3-7315-0684-3
- Band 57** Ulrico Peckelsen  
**Objective Tyre Development. Definition and Analysis of Tyre Characteristics and Quantification of their Conflicts.** 2017  
ISBN 978-3-7315-0713-0
- Band 58** Stefan Haag  
**Sequentieller Versuch zur HiL-unterstützten Validierung hybrider Antriebssysteme mit gekoppelten Antriebseinheiten.** 2018  
ISBN 978-3-7315-0752-9

# Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

---

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 59** Dirk Hülsebusch  
**Fahrerassistenzsysteme zur energieeffizienten Längsregelung - Analyse und Optimierung der Fahrsicherheit.** 2018  
ISBN 978-3-7315-0755-0
- Band 60** Christian Pohlandt  
**Intelligentes Gesamtmaschinenmanagement für elektrische Antriebssysteme.** 2018  
ISBN 978-3-7315-0774-1
- Band 61** Oliver Maier  
**Modellbasierte Entwicklung eines aktiven Sicherheitssystems für elektrifizierte Fahrräder.** 2018  
ISBN 978-3-7315-0778-9
- Band 62** Stephan Rhode  
**Robust and Regularized Algorithms for Vehicle Tractive Force Prediction and Mass Estimation.** 2018  
ISBN 978-3-7315-0807-6
- Band 63** Péter Megyesi  
**Methode zur Einbindung realer Nutzerprofile in die ökologische und ökonomische Bewertung von Fahrzeugkonzepten.** 2018  
ISBN 978-3-7315-0808-3
- Band 64** Benedikt Reick  
**Methode zur Analyse und Bewertung von stufenlosen Traktorgetrieben mit mehreren Schnittstellen.** 2018  
ISBN 978-3-7315-0815-1
- Band 65** Matthias Graf  
**Entwicklung und Validierung einer neuen Methode zur Charakterisierung des Scherverhaltens von Carbonfasergewebe mit Binderauftrag unter Normkraft und viskoser Reibung bei hohen Prozesstemperaturen.** 2018  
ISBN 978-3-7315-0838-0

# Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

---

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 66** Christoph Kühn  
**Simulation von Fahrspielen und Energieflüssen  
in Nahverkehrssystemen.** 2018  
ISBN 978-3-7315-0740-6
- Band 67** 7. Fachtagung  
**Hybride und energieeffiziente Antriebe  
für mobile Arbeitsmaschinen**  
**20. Februar 2019, Karlsruhe.** 2019  
ISBN 978-3-7315-0873-1
- Band 68** Oliver Krauss  
**Experimentelle Untersuchungen zum Innengeräusch  
von Fahrzeugluftreifen.** 2019  
ISBN 978-3-7315-0867-0
- Band 69** Tristan Reich  
**Beurteilung der Prüfprozesseignung bei Fahrzeugversuchen  
mit mobilen Arbeitsmaschinen.** 2019  
ISBN 978-3-7315-0848-9
- Band 70** Matthias Bürckert  
**Realitätsnahe Bewertung des Einflusses der  
Oberflächenspannung flüssiger Zwischenmedien  
auf den maximalen Reibschluss zwischen Reifen  
und Fahrbahn.** 2019  
ISBN 978-3-7315-0891-5



Nach längeren Trockenperioden und einsetzendem Regen scheint die Fahrbahnoberfläche oft rutschig oder schmierig zu sein. Dieser Effekt kann auf im Wasser gelöste Substanzen zurückgeführt werden, die auf der Fahrbahnoberfläche vorkommen können. Diese Substanzen können zu einer Veränderung der Viskosität und/oder des Benetzungsverhaltens des Zwischenmediums Wasser führen und dadurch den maximalen Reibschluss zwischen Reifen und Fahrbahn reduzieren.

Ziel dieser Forschungsarbeit war es, den Einfluss des Benetzungsverhaltens des Wassers auf den maximalen Reibschluss zwischen Reifen und Fahrbahn realitätsnah zu untersuchen. Es wird eine Modellvorstellung entwickelt und vorgestellt, die diesen Einfluss qualitativ erklärt. Weiterhin werden die ermittelten Zusammenhänge quantitativ auf ein vereinfachtes praxisnahes Beispiel übertragen, um die Praxisrelevanz des untersuchten Einflusses aufzuzeigen.

