

Untersuchungen zum Aufbau eines Reibwertvorhersagesystems im fahrenden Fahrzeug

Dem Fachbereich Maschinenbau
der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
eingereichte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Frank Klempau
aus Stuttgart

Berichterstatter: Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Cameron Tropea

Tag der Einreichung:

Tag der mündlichen Prüfung: 21. Oktober 2003

Darmstadt 2003

D 17

Vorwort

Die hier vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik von Prof. Dr.-Ing. B. Breuer im Zeitraum von November 1997 bis August 2001. Während dieser Zeit war ich unter anderem in dem dreijährigen Europäischen Forschungsprojekt VERT (**VE**hicle **R**oad **T**yre Interaction) tätig. Viele der Ergebnisse dieser Arbeit basieren auf Forschungen, die innerhalb dieses Projektes durchgeführt wurden.

Mein Dank gilt dem ehemaligen Leiter des Fachgebiets Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Herrn Professor Dr.-Ing. Bert Breuer, der mir während meiner Projektstätigkeit unter wissenschaftlicher Anleitung viel Vertrauen entgegenbrachte und mir ein sehr selbständiges Arbeiten ermöglichte. Mein weiterer Dank gilt Herrn Professor Dr. rer. nat. Hermann Winner, der sich bereit erklärte das Referat dieser Arbeit zu übernehmen. Ebenso möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Cameron Tropea für die Übernahme des Koreferats und die Hilfestellungen durch das Fachgebiet Aerodynamik und Strömungslehre bedanken.

Allen Partnern innerhalb des VERT Projektes sei an dieser Stelle Dank ausgesprochen. Die vielen fachlichen Diskussionen haben meine Arbeit befruchtet.

Diese Arbeit wäre ohne die sehr motivierende Zusammenarbeit mit den Studenten nicht denkbar. Speziell bei den Versuchen im Ausland wurde ein enormes Engagement mit eingebracht. Auch allen Kollegen, speziell der Reifenforschung, Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern im Sekretariat und den Werkstätten sei an dieser Stelle für die Hilfe und die freundschaftliche Atmosphäre gedankt. Speziell die Anregungen fachlicher und persönlicher Art meiner ehemaligen Kollegen Dr.-Ing. Volker Bachmann, Dr.-Ing. Markus Fach und Dipl.-Ing. Thomas Strothjohann bereiteten mir einen guten Start in meine Tätigkeit am Fachgebiet.

Ohne die finanzielle Unterstützung und die Sachspenden verschiedener Institutionen und Firmen wären die wissenschaftlichen Versuche nicht durchführbar gewesen. Mein Dank gilt der Europäischen Union, der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG, den Unternehmen Audi AG, BBS Kraftfahrzeugtechnik AG, Continental AG, DaimlerChrysler AG, Hella KG, Pirelli Reifenwerke GmbH und Porsche AG.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie. Nur durch die Unterstützung und Geduld meiner Frau, meiner Tochter und meiner Eltern, speziell in Phasen großer Hektik war der Erfolg möglich.

Darmstadt, im Juni 2003

Frank Klempau

Inhalt

1	EINLEITUNG	1
2	STAND DER FORSCHUNG	4
2.1	Mechanismen und Einflussgrößen der Reifen-/Fahrbahnreibung	4
2.1.1	Gummireibungsmechanismen.....	5
2.1.2	Einfluss der Fahrbahn	14
2.1.3	Einfluss des Zwischenmediums.....	16
2.1.4	Einfluss der Temperatur.....	19
2.1.5	Einfluss der Geschwindigkeit	20
2.1.6	Einfluss der Reifenprofiltiefe.....	22
2.1.7	Einfluss der Radlast	24
2.1.8	Einfluss des Reifeninnendrucks.....	25
2.1.9	Weitere Einflussparameter auf die Reifen-Fahrbahnreibung.....	26
2.1.10	Fazit und Bedeutung für die weitere Vorgehensweise.....	30
2.2	Reibwerterkennung	31
2.2.1	Globale Effekte am Fahrzeug	32
2.2.2	Globale Effekte am Rad.....	34
2.2.3	Lokale Effekte am Reifen	37
2.2.4	Parametergestütztes System.....	39
2.2.5	Fazit	40
3	WERKZEUGE, METHODIK UND EXPERIMENTE	41
3.1	Reifenmessanhänger PETRA	42
3.1.1	Aufbau des Messsystems	44
3.1.2	Kraftmessfelge	49
3.1.2.1	Aufbau und Signalverarbeitung.....	50
3.1.3	Vorbereitung und Ablauf der Reibwertmessungen.....	51
3.2	Texturcharakterisierung	54
3.2.1	Makrotextur	54
3.2.1.1	Topometrisches Messverfahren	54
3.2.1.2	Lasertriangulation	57
3.2.1.3	Ausflussmessung	62
3.2.1.4	Sandpatch Verfahren.....	63
3.2.1.5	Bestimmung und Vergleich der Kennwerte.....	63
3.2.2	Mikrotextur	66
3.2.2.1	Topometrisches Messverfahren	66

Inhalt

3.2.2.2	Brake Friction Coefficient BFC und Sideway-Force Coefficient Routine Investigation Machine SCRIM.....	68
3.2.2.3	Skid Resistance Tester SRT (Englisches Pendel)	69
3.2.2.4	Vergleich der ermittelten Kennwerte	70
3.2.3	Fazit.....	73
3.3	Bestimmung der Wasserfilmdicke.....	74
3.3.1	Absorptionssensor AS.....	76
3.3.2	Fahrbahnzustandserkennungssensor FbZS.....	83
3.4	Fazit	89
4	REIBWERT- UND BESCHLEUNIGUNGSMESSUNGEN	91
4.1	Einfluss der Fahrbahn	93
4.1.1	Fazit der Messungen zur Beschreibung des Fahrbahneinflusses.....	99
4.2	Einfluss der Wasserfilmdicke.....	100
4.2.1	Fazit der Messungen zur Beschreibung des Wasserfilmdickeneinflusses	103
4.3	Einfluss der Geschwindigkeit.....	103
4.3.1	Fazit der Messungen zur Beschreibung des Geschwindigkeiteinflusses...	106
4.4	Einfluss der Reifenprofiltiefe	107
4.4.1	Fazit der Messungen zur Beschreibung des Profiltiefeneinflusses	109
4.5	Einfluss der Radlast	109
4.5.1	Fazit der Messungen zur Bestimmung des Radlasteinflusses	111
4.6	Fazit	111
5	MODELLBILDUNG UND VALIDIERUNG.....	113
5.1	Semi-empirisches Reibwertvorhersagemodell (FPM).....	113
5.1.1	Aufbau des Modells	114
5.1.2	Berechnungsergebnisse und Vergleich mit Messungen	119
5.2	fzd – Kontakttiefemodell	129
5.2.1	Aufbau des Modells	130
5.2.2	Berechnungsergebnisse	138
5.3	Fazit	141
6	AUFBAU EINES REIBWERTVORHERSAGESYSTEMS IM FAHRZEUG	144
6.1	Zielsetzung	144
6.2	Systemaufbau.....	145

6.3	Grenzen des aktuellen und Gedanken zu zukünftigen Systemen.....	155
6.4	Abgrenzung zu Vorgängerarbeiten und Fazit	161
7	ABSCHLIEßENDE BETRACHTUNGEN UND AUSBLICK....	163
8	ZUSAMMENFASSUNG.....	165
9	LITERATUR	166
9.1	Quellenverzeichnis	166
9.2	Abbildungsverzeichnis	177
9.3	Betreute Studien- und Diplomarbeiten.....	182

Formelzeichen und Indizes

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A	[mm ²]	Fläche
ACA	[%]	Average Contact Area – Profiltraganteil
a _x	[m/s ²]	Längsbeschleunigung
a _y	[m/s ²]	Querbearschleunigung
a _z	[m/s ²]	Vertikalbeschleunigung
B	[mm]	Breite
BFC	[]	Brake Friction Coefficient - Gleitreibwert
BFC ₂₀	[]	Brake Friction Coefficient bei 20km/h Gleitgeschwindigkeit
c	[N/mm]	Steifigkeit
D	[]	Verlustfaktor, Verlusttangente
dyn		Dynamisch
E	[N/m ²]	Elastizitätsmodul
E'	[N/m ²]	Speichermodul
E''	[N/m ²]	Verlustmodul
E*	[N/m ²]	Komplexer Modul
ETD	[mm]	Estimated Texture Depth
F	[N]	Kraft
f	[Hz]	Frequenz
f	[]	Reibzahl
F _a	[N]	Adhäsionskraft
f _a	[]	Adhäsionsbeiwert
F _h	[N]	Hysteresekraft
f _h	[]	Hysteresebeiwert
F _k	[N]	Kohäsionskraft
F _N	[N]	Normalkraft
F _R	[N]	Reibkraft
F _S	[N]	Seitenkraft
F _U	[N]	Umfangskraft
F _v	[N]	viskose Kraft
F _x	[N]	Längskraft
F _y	[N]	Querkraft
F _z	[N]	Radlast
g	[m/s ²]	Erbbeschleunigung
G	[N]	Gewichtskraft
G	[N/mm ²]	Schubmodul
X		

G'	[N/mm ²]	Speicher – Schubmodul
G''	[N/mm ²]	Verlust - Schubmodul
G^*	[N/m ²]	Komplexer Schubmodul
H, h	[mm]	Höhe
i	[]	Index
L, l	[mm]	Länge
lat		Lateral
LOAD	[N]	Radlast, Vertikalkraft
long		Longitudinal
m	[kg]	Masse
max		Maximal
min		Minimal
MCD	[mm]	Mean Contact Depth
MPD	[mm]	Mean Profile Depth
MRT	[mm]	Mittlere Rautiefe
n	[]	Anzahl
n	[]	Brechungsindex, Brechungszahl
n	[min ⁻¹]	Drehzahl
NZ	[]	Nässezahl
p	[]	Irrtumswahrscheinlichkeit
PEV	[mm]	Profilelementverformung
p_i	[bar]	Reifeninnendruck
P_0	[N/mm ²]	Flächenpressung
q	[N/m ²]	Druck
R, r	[]	Bestimmtheitsmaß
r	[mm]	Radius
R_{dyn}	[m]	dynamischer Radhalbmesser
res		Resultierend
R_p	[mm]	Maximale Profilkuppenhöhe
s	[%]	Schlupf
s	[]	Standardabweichung
s_A	[%]	Antriebsschlupf
s_B	[%]	Bremsschlupf
SCRIM	[]	<u>S</u> ideforce <u>C</u> oefficient <u>R</u> outine <u>I</u> nvestigation <u>M</u> achine - Querreibwert
SFC	[]	<u>S</u> ide <u>F</u> ric <u>C</u> oefficient - Querreibwert
SRM	[]	<u>S</u> kid <u>R</u> esistance <u>M</u> easurement - Gleitreibwert
SRT	[]	Skid Resistance Test - Gleitreibwert
stat		Statisch

Formelzeichen und Indizes

t	[s]	Zeit
T	[°C]	Temperatur
T	[mm]	Tiefe
TD	[mm]	Tread Depth
v	[m/s]	Geschwindigkeit
v _A	[m/s]	Abtastgeschwindigkeit
v _a	[m/s]	Gleitgeschwindigkeit
v _d	[m/s]	Deformationsgeschwindigkeit
v _R	[m/s]	Radgeschwindigkeit
v _{Fzg}	[m/s]	Fahrzeuggeschwindigkeit
WD	[mm]	Water Depth
WT	[mm]	Water Thickness
x, y, z		Längs-, Quer- und Vertikalrichtung
α	[°]	Schräglaufwinkel
α	[°]	Fahrbahnlängsneigung
α _λ	[mm ⁻¹]	Absorptionskoeffizient bei einer Wellenlänge λ
β	[°]	Schwimmwinkel
δ	[°]	Verlustwinkel, Phasenverschiebung
δ	[°]	Fahrbahnquerneigung
Δ		Änderung, Differenz
ΔE	[]	Dissipierte Energie
ε	[mm]	Dehnung
Φ	[W]	Strahlungsleistung
γ	[°]	Sturzwinkel
λ	[mm]	Wellenlänge
μ	[]	Kraftschlussbeiwert, Reibwert
Θ	[°]	Brechungswinkel
ρ	[kg/m ³]	Dichte
σ	[N/mm ²]	mechanische Normalspannung
σ	[]	Standardabweichung
τ	[N/mm ²]	mechanische Schubspannung
ω	[s ⁻¹]	Kreisfrequenz

Abkürzungen und Eigennamen

Name	Bezeichnung
ABS	Antiblockiersystem
AM	Ausflussmesser
Applix	Messdatenerfassungsprogramm der Firma DaimlerChrysler
AS	Absorptionssensor
ASR	Antriebsschlupfregelung
ASTM	American Society for Testing and Materials
BAB	Bundesautobahn
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BFC	Brake Friction Coefficient – Gleitreibwert, gemessen mit PIARC/ASTM - Normreifen
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CCD	Charge Coupled Device
CETE	Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement de Lyon
COM	Continuation Of Message
CPU	Central Processing Unit
DAB	Digital Audio Broadcast
DIAdem	Messdatenerfassungsprogramm der Firma Gfs
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DMS	Dehnungsmessstreifen
ESP	Elektronisches Stabilitäts Programm
FEM	Finite Element Methode
FFT	Fast-Fourier-Transformation
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FPM	Friction-Prediction-Model
FPS	Friction-Prediction-System
FbZS	Fahrbahnzustands - Erkennungssensor
<i>fzd</i>	Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt
GPS	Global Position System
GTT	Geschätzte Texturtiefe nach E DIN ISO 13473-1
Heike	Messdatenvisualisierungsprogramm der Firma DaimlerChrysler
HRA	Hot Rolled Asphalt
HUT	Helsinki University of Technology
IKFF	Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der

Abkürzungen und Eigennamen

	TU Stuttgart
ISO	International Standardisation Organisation
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
MKS	Mehrkörpersystem
MPD	Mean Profile Depth – Mittlere Profiltiefe nach E DIN ISO 13473-1
MRT	Mittlere Rautiefe
MPT	Mittlere Profiltiefe nach E DIN ISO 13473-1
PIARC	Permanent International Association of Road Congresses – World Road Association
PC	Personal Computer
PCMCIA	PC Schnittstellenstandard
PETRA	PErsonenkraftwagen - TRAktionsmessanhänger
PEV	Profilelementverformung
Pkw	Personenkraftwagen
PPU	Pre-Processing Unit
PROMETHEUS	PROgraM for a European Traffic with Highest Efficiency Unprecedented Safety
PSD	Position Sensitive Device / Position Sensing Detector
PSV	Polished Stone Value
RDS	Radio Data System
SCRIM	Sideforce Coefficient Routine Investigation Machine
SRM	Stuttgarter Reibwertmesser
SRT	Skid Resistance Tester
StVZO	Straßenverkehrszulassungsordnung
TMC	Traffic Message System
TOMS	Tyre Behaviour on Multiple Surfaces
TRL	Transport Research Laboratory
TUD	Technische Universität Darmstadt
URM	Universeller Reibungsmesser
VERT	Vehicle Road Tyre Interaction
VTI	Statens väg- och transportforskningsinstitut - Swedish Road and Transport Research Institute
XFCD	Extended Floating Car System

1 Einleitung

Die Interaktion von Reifen und Fahrbahn und der daraus resultierende Reibwert ist von entscheidender Bedeutung für die Fahrsicherheit eines Fahrzeugs. Nahezu sämtliche zur Längs- und Querführung notwendigen Kräfte werden über vier etwa postkartengroßen Reifenaufstandsflächen abgestützt. Daher war und ist die Erforschung des Reifen-Fahrbahn-Reibwertes Bestandteil vieler Forschungsarbeiten und die Erhöhung des Kraftschlusspotentials ein Hauptziel von Reifen- und Fahrbahntwicklern. Leider muss jedoch der Reifen eine ganze Reihe von Aufgaben erfüllen, die teilweise sogar gegenläufige Auswirkungen haben, siehe **Abbildung 1**. So ist eine Erhöhung der Lenkpräzision meist einhergehend mit einer steiferen Seitenwand. Dies wiederum hat negative Auswirkungen auf den Vertikalkomfort. Ein bezüglich der Fahrsicherheit gravierender Zielkonflikt lag lange Zeit in der Abstimmung von Laufleistung und Nassreibwert. Eine Verbesserung des einen hatte unmittelbar eine Verschlechterung des anderen zur Folge. Erst in den letzten Jahren ist es durch den verstärkten Einsatz von Kieselsäure als Füller gelungen, diesen Zielkonflikt zu entschärfen (Silica-Reifen).

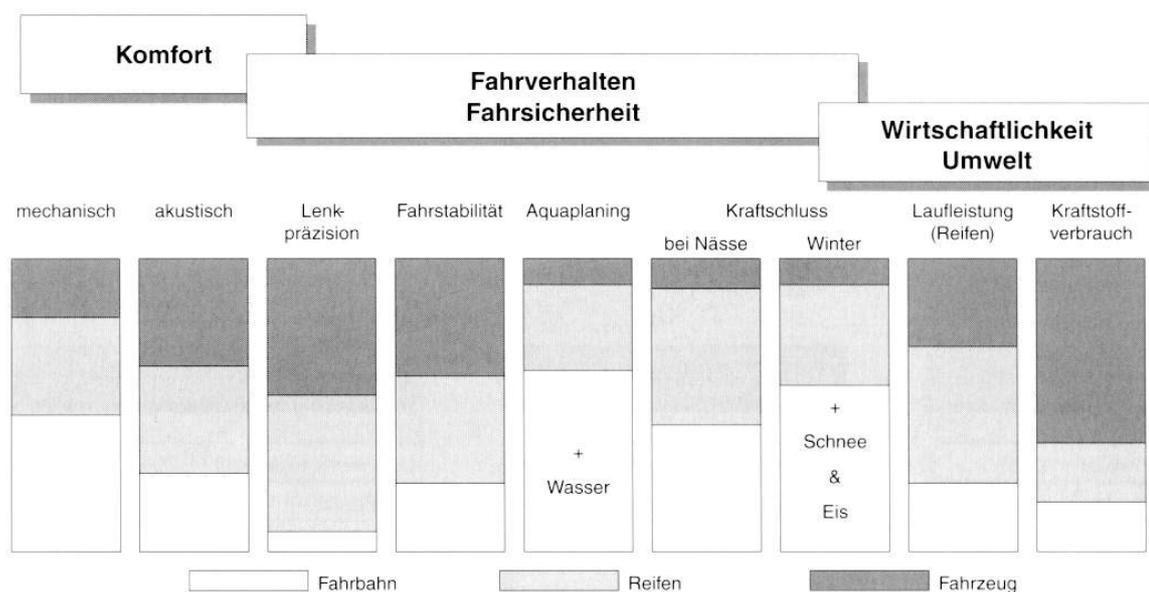


Abbildung 1: Einfluss von Fahrzeug, Reifen und Fahrbahn auf das Gesamtfahrzeugverhalten [19]
 Influence of vehicle, tyre and pavement on vehicle behaviour

Jedoch ist weniger der Absolutreibwert einer Reifen-Fahrbahn-Kombination von entscheidender Bedeutung für die Fahrsicherheit, als vielmehr die Geschwindigkeit der Veränderung der Kraftschlussverhältnisse durch Variation der verschiedenen

Einleitung

Einflussparameter. Sofern der „Normalfahrer“ die Veränderung der Kraftschlussbedingungen erkennt und Zeit hat, sich auf diese einzustellen, ist die Fahrsituation für ihn beherrschbar und die Gefahr eines Unfalls trotz Reduzierung des zur Verfügung stehenden Maximalreibungswerts relativ gering. Tritt diese Veränderung jedoch für den Fahrer nicht erkennbar auf, so ergibt sich ein deutlich höheres Gefahrenpotential. Problematisch sind diese Situationen, da sie für den Fahrzeuglenker nur anhand weniger Fahrzeugreaktionen erkennbar sind (z.B. Lenkradmoment und/oder Gierwinkelbeschleunigung) und er daraus seine Handlungen ableiten muss.

In Statistiken fallen diese Unfälle meist in die Bereiche „nicht angepasste Geschwindigkeit“, „ungenügender Abstand“ und „falsche Straßenbenutzung“, siehe **Abbildung 2**.

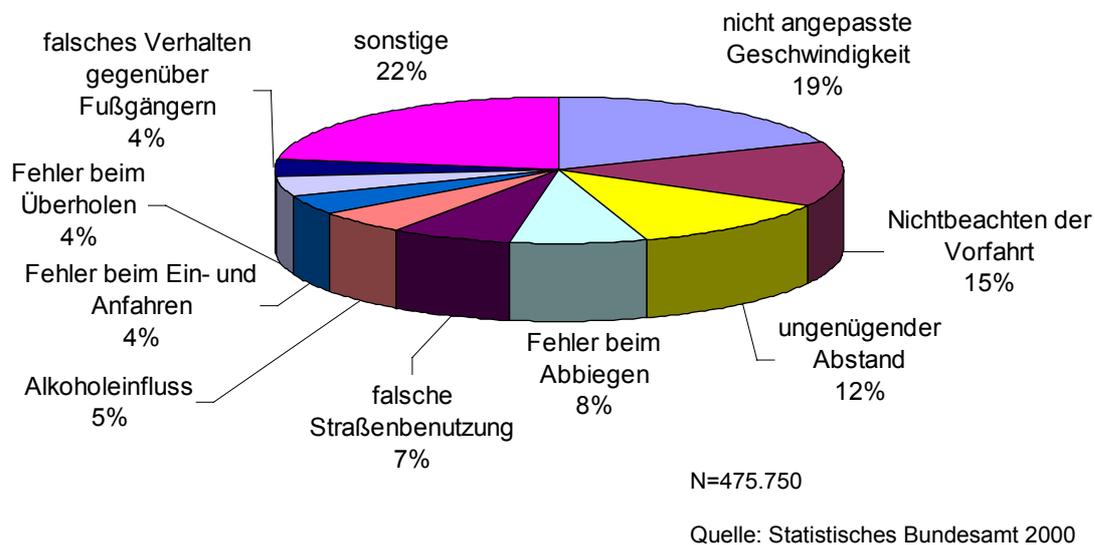


Abbildung 2: Unfallursachen [1]
Reasons for accidents

Daher muss ein Ziel der Forschung die Bestimmung des zur Verfügung stehenden Kraftschlusspotentials und das Nutzarmachen dieser Information für den Fahrer sein. Dies kann durch eine direkte Warnung optischer, akustischer oder haptischer Art erfolgen. Primär jedoch sollten diese Daten an ein System zur Fahrerunterstützung geleitet werden, welches die notwendigen Maßnahmen selbständig einleitet.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Möglichkeit für ein Reibwertvorhersagesystem im fahrenden Fahrzeug aufzuzeigen. Dieses System soll zum einen auf einem Reibwertmodell basieren, welches die Haupteinflussgrößen auf die Reifen – Fahrbahn – Reibung berücksichtigt. Zum anderen soll das System die Möglichkeit beinhalten eine Kraftschlussinformation zur Verfügung zu stellen, bevor eine kritische Fahrsituation, bzw. das Kraftschlusspotential aufgebraucht ist, siehe **Abbildung 3**.

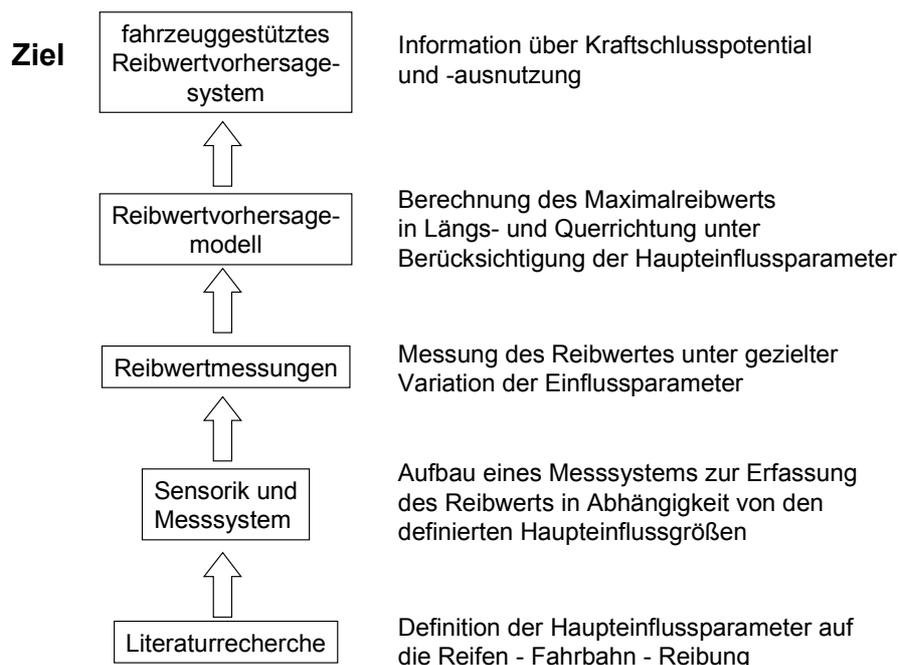


Abbildung 3: Top-Down Ansatz der vorliegenden Arbeit
Top-Down approach of this work

Um das Reibwertvorhersagemodell entwickeln zu können, müssen zunächst die Haupteinflussparameter auf die Reifen – Fahrbahn – Reibung definiert werden. Dies wird mittels Durchführung und Auswertung einer Literaturrecherche erreicht. Anschließend werden mittels geeigneter Messtechnik die Parameter erfasst und der Einfluss dieser auf das Kraftschlusspotential in Längs- und Querrichtung quantifiziert. Der Aufbau der dafür nötigen Messsysteme und die Beurteilung der eingesetzten Sensorik bzgl. ihrer Eignung ist ebenfalls Bestandteil dieser Arbeit.

2 Stand der Forschung

2.1 Mechanismen und Einflussgrößen der Reifen-/Fahrbahnreibung

Die Kenntnis der Reibungsmechanismen und die Untersuchung der verschiedenen Einflussparameter der Reifen-Fahrbahn-Interaktion, siehe **Abbildung 4**, sind Voraussetzung für den Aufbau eines Modells zur Beschreibung des Kraftschlusspotentials. Unter Beachtung der jeweiligen Randbedingungen müssen hierbei sowohl die Abläufe in dem Laufstreifengummi selbst als auch die Vorgänge in der Reifen-Fahrbahn-Kontaktzone berücksichtigt werden. Ziel ist es, den Einfluss der verschiedenen Parameter zu beschreiben und Wirkzusammenhänge aufzuzeigen. Des Weiteren gilt es, die Bedeutung der Einflussgrößen zu quantifizieren und die Haupteinflussparameter, welche in einer Modellbildung berücksichtigt werden müssen, zu bestimmen.

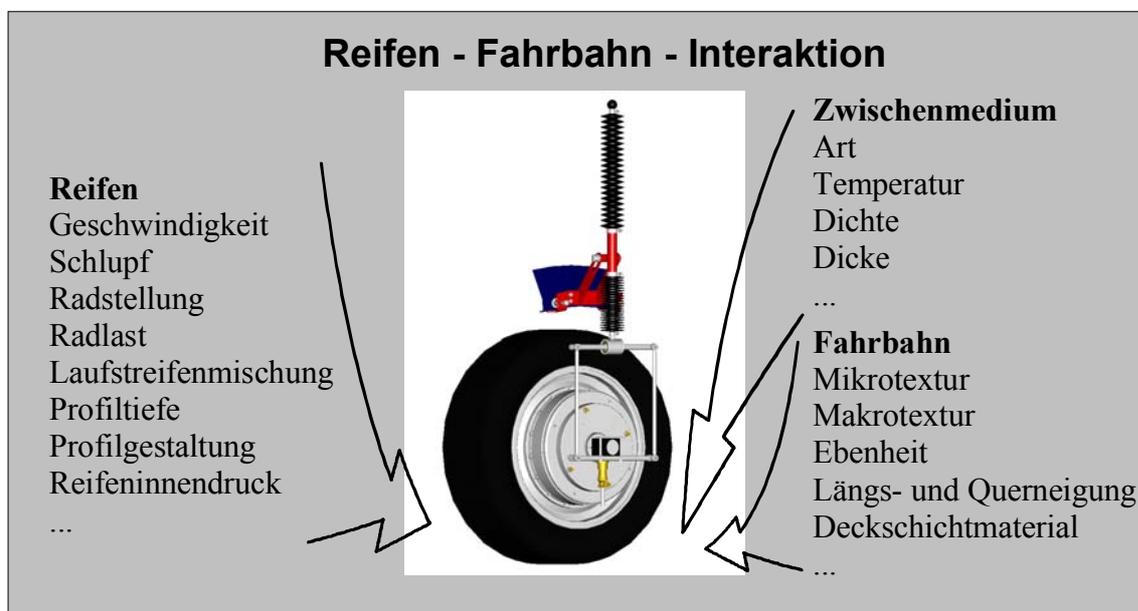


Abbildung 4: Reifen – Fahrbahn – Interaktion
Tyre - Pavement - Interaction

2.1.1 Gummireibungsmechanismen

Um die Auswirkungen unterschiedlicher Einflussparameter auf das Kraftschlusspotential untersuchen zu können, ist es zunächst nötig, die Gummireibungsmechanismen zu betrachten. Da es sich bei Gummi um einen polymeren Werkstoff handelt, besitzt dieser ein viskoelastisches Verhalten, welches auf die fadenförmigen Gummimolekülketten zurückzuführen ist. Diese sind in Abhängigkeit von ihrer Vernetzungsdichte stark ineinander verknäult und in Segmenten beweglich [6, 64].

Während sich vollkommen elastische Stoffe dadurch auszeichnen, dass die Verformungsenergie, die in einen Körper gesteckt wird, bei Entlastung wieder vollständig zurückgewonnen werden kann, wandeln viskoelastische Stoffe einen Teil der Bewegungsenergie in Wärme um. Dadurch ergibt sich eine Phasenverschiebung (Verlustwinkel) zwischen der aufgetragenen Spannung σ und der erzeugten Dehnung ε , **Abbildung 5 links**. Die Höhe der Verlustenergie ist, neben der Temperatur und der Erregeramplitude, abhängig von der Bewegungsgeschwindigkeit bzw. Erregerfrequenz ω , so dass sich folgender Zusammenhang ergibt:

$$\sigma(\omega) = E(\omega) \cdot \varepsilon(\omega) \quad (1)$$

Der frequenzabhängige Elastizitätsmodul setzt sich zusammen aus dem elastischen Anteil E' (Speichermodul) und dem Dämpfungsanteil E'' (Verlustmodul):

$$\sigma(\omega) = \varepsilon \max \cdot [E' \cdot \sin(\omega t) + E'' \cdot \cos(\omega t)] \quad (2)$$

Dieser Sachverhalt lässt sich auch in der komplexen Zahlenebene durch den ebenfalls frequenzabhängigen komplexen Modul E^* darstellen:

$$E^*(\omega) = E'(\omega) + i \cdot E''(\omega) \quad (3)$$

$$\text{bzw.: } G^*(\omega) = G'(\omega) + i \cdot G''(\omega) \quad (4)$$

Aus dem Verhältnis von Speicher- und Verlustmodul definiert sich der Verlustfaktor (Verlusttangente) als:

$$D = \tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (5)$$

$$\text{bzw.: } D = \tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (6)$$

Abbildung 5 rechts zeigt die Verläufe von Speicher-, Verlustmodul und Verlustfaktor. Es zeigt sich, dass der Verlustmodul bei niedrigen und hohen Frequenzen sehr gering ist [90]. Dies bedeutet, dass das Gummi dort ein überwiegend elastisches Materialverhalten besitzt. Des weiteren ergibt sich bei sehr hohen Frequenzen oder sehr tiefen Temperaturen eine deutliche Steigerung der Materialsteifigkeit [19, 98].

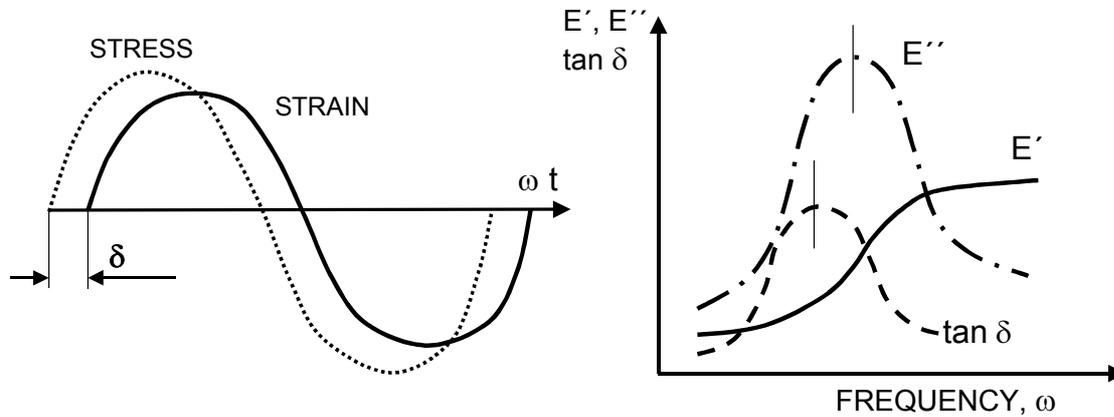


Abbildung 5: Verlustwinkel und Module eines viskoelastischen Materials in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz [48, 90]
 Lost angle and moduls depending to excitation frequency

Die Höhe der inneren Reibung und damit der dissipierten Energie hängt neben der Frequenz von dem verdrängten bzw. bewegten Materialvolumen ab. Damit ergibt sich für den einachsigen Spannungszustand eines gestauchten Zylinders folgender Zusammenhang [98]:

$$\Delta E = \frac{V}{2\pi} \int d\omega \cdot \omega \cdot \operatorname{Im} \left(\frac{1}{E(\omega)} \right) |\sigma(\omega)|^2 \quad (7)$$

Um nun die Erkenntnisse aus der Gummimechanik auf das Reibverhalten übertragen zu können, ist es zweckmäßig, zunächst die verschiedenen Reibungsmechanismen zu definieren und zu analysieren. Nach [81] setzt sich die Gesamtreibungskraft F_R einer Gummiprobe beim Gleiten über eine Oberfläche aus folgenden Komponenten zusammen:

$$F_R = F_A + F_H + F_K + F_V \quad (8)$$

Mit: F_A = Adhäsionskraft

F_H = Hysterese kraft

F_K = Kohäsionskraft

F_V = Viskose Kraft

Die Adhäsionskomponente der Gesamtreibung, siehe **Abbildung 6**, basiert auf den molekularen Bindungskräften (van de Waals Kräfte) zwischen einer Oberfläche und dem Gummi. Die Größe dieser Komponente hängt u. a. von der Höhe der freien Oberflächenenergie [98] ([82]: „elektrische Rauigkeit“), der Größe der Kontaktfläche und der Anzahl der molekularen Bindungen ab [81].

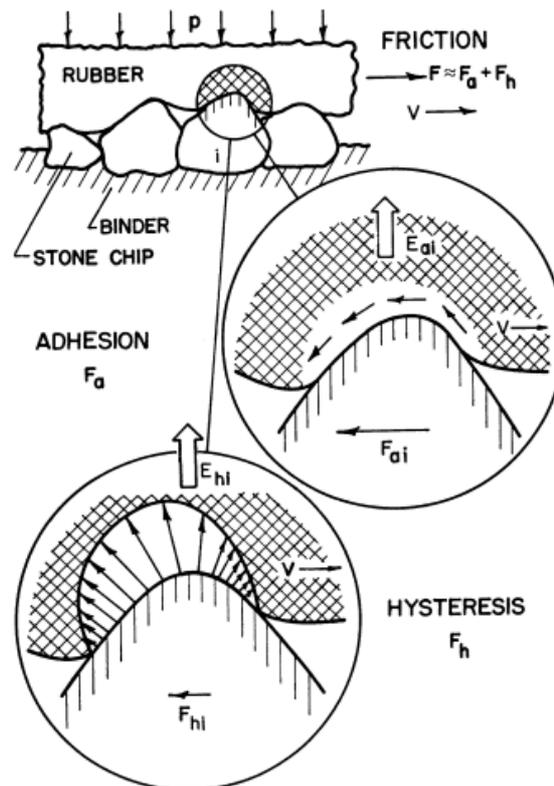


Abbildung 6: Gummireibungsmechanismen [82]
Friction mechanisms

Da sich die molekularen Bindungskräfte jedoch nur bei direktem Kontakt der Reibpartner ausbilden können, wird deutlich, dass der Einfluss der Adhäsionskomponente hauptsächlich bei trockenen und nicht verschmutzten Oberflächen auftritt. Die Höhe des Adhäsionskoeffizienten ist abhängig von der Höhe des Verlustmoduls und verringert sich mit zunehmenden Kontaktdruck [82, 98].

Die Hysterese Komponente der Reibung bezeichnet die Dämpfungsverluste, die im Gummi beim Eindringen des Reibpartners entstehen. Hierdurch ergibt sich eine asymmetrische Druckverteilung in der Kontaktzone, siehe Abbildung 6. Die Höhe der Hysteresereibung ist u.a. abhängig von dem Verlustfaktor, dem verformten Materialvolumen und dem Kontaktdruck [82].

Kommt es infolge eines viskosen Zwischenmediums zu keinem Kontakt zwischen dem Gummi und der Oberfläche des Reibpartners und wird das Gummi nicht verformt, so

Mechanismen und Einflussgrößen der Reifen-/Fahrbahnreibung

wirken in der Schicht zwischen den Reibpartnern ausschließlich viskose Scherspannungen. Dieser Zustand tritt bei realen Fahrzeugreifen in Form von Aquaplaning auf. Die Höhe der wirkenden Kräfte ist abhängig von der Viskosität des Zwischenmediums, der Schichtdicke und der Gleitgeschwindigkeit [33]. Im Allgemeinen kann diese Reibungskomponente jedoch vernachlässigt werden.

Einen weiteren, i. a. ungewollten Reibungsmechanismus stellt die Kohäsionsreibung dar. Diese resultiert aus dem Energieaufwand, der benötigt wird, um die Molekülketten des Gummis zu zerreißen.

Die Ausprägung bzw. Aktivierung der beiden Hauptreibungsmechanismen, Adhäsion und Hysterese, ist in starkem Maße abhängig von der Gleitgeschwindigkeit. Da bei sehr niedriger Anregungsfrequenz (und konstanter Wegamplitude) der Verlustmodul E'' und damit auch die Verlusttangente $\tan \delta$ sehr klein sind, erzeugen Adhäsion und Hysterese nur sehr geringe Reibkräfte. Mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit erhöht sich vor allem die Adhäsionskomponente und erreicht bei einer kritischen Gleitgeschwindigkeit, bei der auch der Verlustmodul sein Maximum besitzt, ihren Maximalwert [82]. Bei weiterer Steigerung der Anregungsfrequenz kann das Gummi, bedingt durch die innere Dämpfung und die Erhöhung der Gummisteifigkeit, den kleinen Unebenheiten der Gleitoberfläche nicht mehr vollständig folgen. Hierdurch verringert sich die wirksame Kontaktfläche, woraus wiederum eine Verringerung der Adhäsionsreibung resultiert [98]. Die Hysteresekomponente hingegen nimmt mit der Gleitfrequenz stetig zu. Dies überrascht zunächst, da auch das verformte Volumen, bedingt durch die Erhöhung der Gummisteifigkeit, abnimmt. Jedoch erhöht sich durch die Geschwindigkeitszunahme auch die Stoßenergie, woraus eine deutliche Erhöhung der Flächenpressung an den Kontaktstellen resultiert [130].

Zusätzlich zu diesen stark gleitgeschwindigkeitsabhängigen Reibungsmechanismen muss es auch maßgebliche Reibungsanteile geben, die weitestgehend geschwindigkeitsunabhängig sind [41]. Anders wäre z.B. das sichere Haften eines Gummiblocks auf geneigter Oberfläche ohne jegliche Gleitgeschwindigkeit nicht zu erklären. Diese Anteile können vor ihrer Natur her als Adhäsionskräfte interpretiert werden [41].

Der Verlauf der Adhäsions- und Hysteresereibungskoeffizienten bei sinusförmiger Anregung ist in **Abbildung 7** dargestellt.

Der steile Anstieg der Hysteresekomponente bei Gleitgeschwindigkeiten oberhalb von $v = 80 \text{ mph} (\approx 35,7 \text{ m/s})$ wird auf den eben beschriebenen Stoßeffect zurückgeführt und kann laut [82] hauptsächlich bei landenden Flugzeugen beobachtet werden.

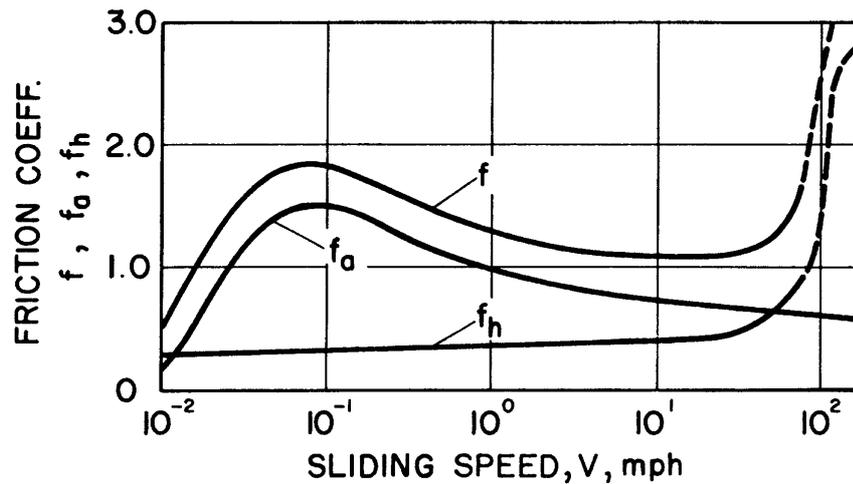


Abbildung 7: Zusammenwirken der Hauptreibungsmechanismen [82]
Interaction of the main friction mechanisms

Die Aufteilung der vorhandenen Reibung in einen Adhäsions- und einen Hystereseanteil wird, wie bereits kurz angerissen, nicht nur von der Gleitgeschwindigkeit beeinflusst, sondern es existiert eine starke Abhängigkeit vom Oberflächenzustand des Reibpartners, siehe **Abbildung 8** [98].

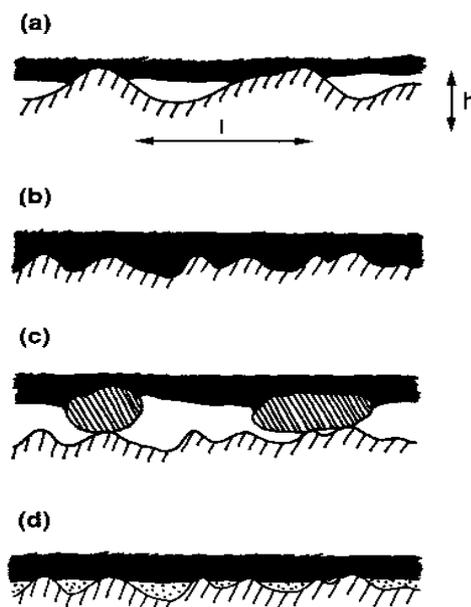


Abbildung 8: Reibung bei Variation von Gummielastizität und Oberflächenzustand [98]
Friction by variation of rubber elasticity and texture surface

So bewirkt eine Oberfläche mit grober Makrotextur, Bild 7 a), eine Verformung des Gummis, wodurch die Hysteresekomponente aktiviert wird. Gleichzeitig bildet sich an

den Kontaktstellen eine Adhäsionskomponente aus. Durch die hohe Steifigkeit des dargestellten Gummis sind sowohl die Eindringtiefe, als auch die wirksame Kontaktfläche relativ gering. In Bild 7 b) ist eine weiche Gummimischung bei relativ geringer Makrorauhigkeit und geringer Gleitgeschwindigkeit dargestellt. Man erkennt, dass der Gummiwerkstoff dem Oberflächenverlauf gut folgen kann und eine große Kontaktfläche gebildet wird. Dadurch ergibt sich eine starke Adhäsionskomponente, und auch die Hysterese wird durch ausreichend hohe Verformungen aktiviert. In Bild 7 c) befinden sich feste Körner zwischen dem Gummi und der relativ glatten Oberfläche aus 7 b). Dadurch, dass das Gummi keinerlei Kontakt mit der Oberfläche besitzt, können sich keine Adhäsionskräfte zwischen diesen beiden Stoffen aufbauen. Durch die Gummiverformung ergeben sich Hysteresekräfte, welche laut [98] zumindest teilweise die fehlenden Adhäsionskräfte ersetzen. In Bild 7 d) wurden die festen Körner durch ein flüssiges Zwischenmedium ersetzt. Es ergibt sich hieraus sowohl eine starke Verringerung der Adhäsionskomponente (durch die Verringerung der wirksamen Kontaktfläche), als auch eine starke Verringerung der Hysteresekomponente, da sich das Deformationsvolumen deutlich verringert.

Eine Möglichkeit, die Erkenntnisse bzgl. der unterschiedlichen Aktivierungsfrequenzen der beiden Haupttreibungsmechanismen zur Beurteilung von Laufflächenmischungen nutzen zu können, liegt in der Verwendung der sogenannten WLF-Transformation (Williams-Landel-Ferry). Diese Zuordnungsvorschrift ermöglicht es, Prüfstandsversuche zur Bestimmung von Materialkennwerten (E' , E'' , G' , G'' aus Stauch- bzw. Torsionsversuchen) bei geringen Temperaturen und niedriger Frequenz durchzuführen und diese anschließend einer hohen Frequenz bei höherer Temperatur zuzuordnen. Das Verfahren beruht darauf, dass eine niedrige Temperatur bei einer sinusförmigen Anregung eines viskoelastischen Werkstoffs zu einer vergleichbaren Veränderung des Materialverhaltens führt wie eine Erhöhung der Frequenz [66]. Wird nun bei konstanter Frequenz und unter Variation der Temperatur die Verlusttangente $\tan \delta$ bestimmt, so ergibt sich eine Zuordnung von Reibungsmechanismen und Temperatur, **Abbildung 9**. Diese Temperatur-Frequenz-Äquivalenz wird Meisterkurve genannt. Hierbei wird angestrebt, im reibwertrelevanten Bereich (kleiner 25°C) eine möglichst hohe Verlusttangente und im Bereich des Rollwiderstands einen möglichst geringen Verlustfaktor zu erreichen [66]. Da die Adhäsionskomponente, wie bereits erläutert, ihre maximale Ausprägung bei geringen Makrorauhigkeiten (charakteristische Längenskalen: 1 bis 1000nm) und geringen Gleitgeschwindigkeiten (0,0001 bis 0,1km/h) erreicht, ergibt sich hieraus eine Anregungsfrequenz im Bereich von 10^5 bis 10^{10} Hz. Die Hysteresekomponente, welche zur Aktivierung größere Rauigkeiten (charakteristische Längenskalen von 10 bis 1000 μm) und höhere Gleitgeschwindigkeiten (1 bis 10km/h) benötigt, liegt im Bereich der Anregungsfrequenzen von 10^3 bis 10^5 Hz. Dies bedeutet auf die Meisterkurve bezogen,

dass die Hysteresereibung ihre maximale Ausprägung bei Temperaturen erreicht, die etwas oberhalb derer der Adhäsionsreibung liegen.

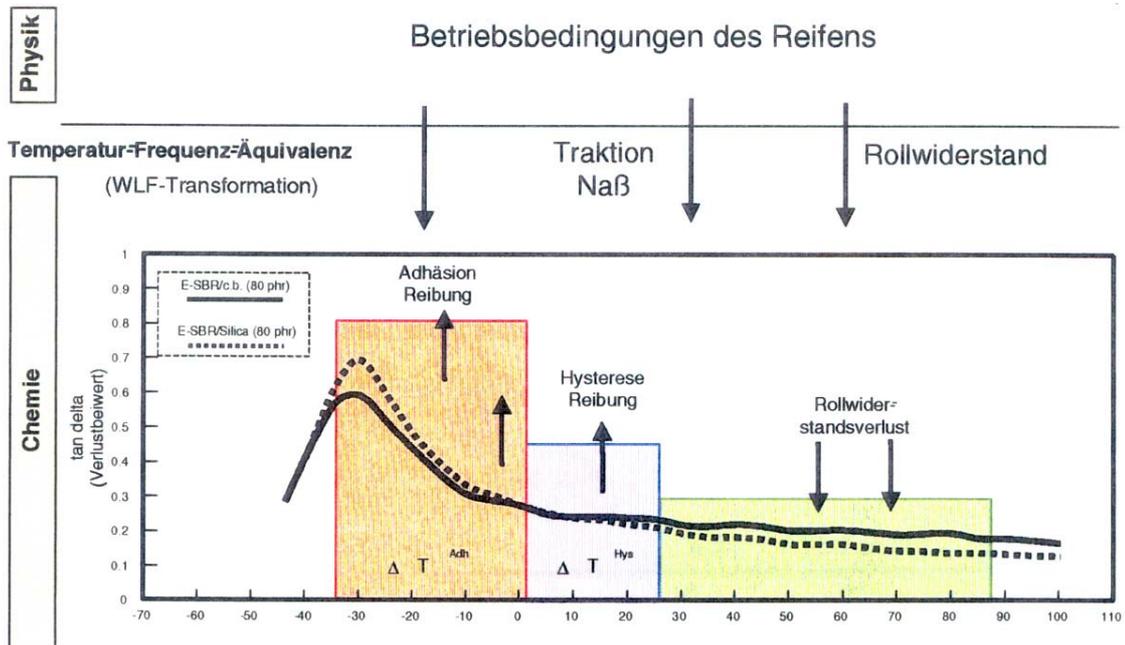


Abbildung 9: Meisterkurve einer Laufstreifenmischung (Verlustwinkel aufgetragen über der Temperatur)[66]
Master curve of tread compound

Um u. a. den Verschleißwiderstand der Laufstreifenmischung zu erhöhen und den Rollwiderstand zu verringern, wird der Reifenmischung Ruß als „Füller“ zugemischt. Eine Zuführung von Öl hingegen bewirkt eine weichere Gummimischung und eine Erhöhung des Reibwerts - speziell bei Nässe. Diese Schere ließ sich bis vor wenigen Jahren nicht verändern. Es waren nur Detailoptimierungen möglich (durchgezogene Linie in Abbildung 9). Durch die Entwicklung von Silicareifen, die u. a. einen kieselensäurebasierten Füller verwenden, konnte dieser Interessenkonflikt zumindest teilweise entschärft werden (gestrichelte Linie). So ergibt sich in dem reibwertrelevanten Bereich eine deutliche Erhöhung der Verlusttangente und in dem Bereich, in dem der Rollwiderstand betrachtet wird (sehr geringe Anregungsfrequenz simuliert durch eine hohe Probestemperatur), eine Verringerung der Verluste.

Damit Reibungskräfte im Reifenlatsch erzeugt werden können, ist das Vorhandensein von Schlupf nötig. Dieser entsteht aus der Differenz zwischen der Abrollgeschwindigkeit des Reifens und der Geschwindigkeit des Fahrzeugs über Grund:

$$\text{Antriebsschlupf: } s_A = \frac{v_{\text{Rad}} - v_{\text{Fzg}}}{v_{\text{Rad}}} \cdot 100\% \quad (9)$$

$$\text{Bremschlupf: } s_B = \frac{v_{\text{Fzg}} - v_{\text{Rad}}}{v_{\text{Fzg}}} \cdot 100\% \quad (10)$$

Mechanismen und Einflussgrößen der Reifen-/Fahrbahnreibung

Mit: v_{Rad} = Radgeschwindigkeit

v_{Fzg} = Fahrzeuggeschwindigkeit

Hierbei wird unterschieden in Deformations- und Gleitschlupf, siehe **Abbildung 10**.

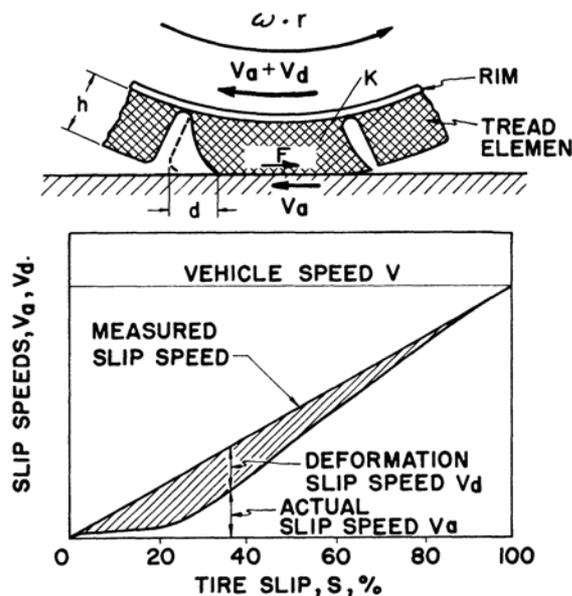


Abbildung 10: Zusammenhang von Deformations- und Gleitschlupf [82]
Interaction of deformation and sliding slip

Der Deformationsschlupf resultiert aus elastischen Verformungen des Profilelements, welche durch die Antriebs- bzw. Bremskräfte hervorgerufen werden und sich an der Fahrbahn abstützen. Der Gleitschlupf wirkt in der Berührungsfläche zwischen Reifen und Fahrbahn und erzeugt eine Relativbewegung der Oberfläche des Profilelements gegenüber der Fahrbanoberfläche. Diese Relativbewegung bewirkt durch die Fahrgeschwindigkeit eine Gleitgeschwindigkeit, welche zu einer Anregung der Reibungsmechanismen führt. Da bis zum Erreichen des Kraftschlussmaximums (und unter Annahme einer homogenen Gleitgeschwindigkeitsverteilung) der Gleitschlupf nur sehr gering ist, kommt es vor allem im unteren Fahrgeschwindigkeitsbereich fast ausschließlich zu einer Aktivierung der Adhäsionskomponente. Mit steigender Geschwindigkeit und größerem Gesamtschlupf erhöht sich der Anteil des Gleitschlupfes deutlich. Dies bewirkt, wie bereits ausgeführt, über die Erhöhung der Gleitgeschwindigkeit eine Aktivierung der Hysteresekomponente.

Hierbei gilt es jedoch zu beachten, dass im Reifenlatsch keine homogene Gleitgeschwindigkeit existiert [41]. Dadurch treten Haft- und Gleitbereiche gleichzeitig in der Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche auf. Das Verhältnis der Haft- und Gleitbereiche ist u. a. abhängig vom Fahrbahnzustand.

Bis zum Erreichen des Kraftschlussmaximums dominiert der Deformationsschlupf. Dies bedeutet eine maximale elastische Verspannung der Profilelemente. Bei weiterer Steigerung des Gesamtschlupfzustands tritt verstärkt lokales Gleiten auf und der Deformationsschlupf verringert sich. Dies äußert sich in einer Reduzierung der Reibkräfte [41]. Beim blockierten Rad existiert ausschließlich Gleitschlupf.

Die Auswirkung des aktuellen Schlupfzustands auf den Reibwert in Längsrichtung lässt sich am anschaulichsten anhand der Reibwert-Schlupf-Kurve beschreiben. In **Abbildung 11** ist der qualitative Verlauf der μ -s-Kurve eines Pkw-Sommerreifens der Dimension 195/65 R15 auf trockener Fahrbahn dargestellt.

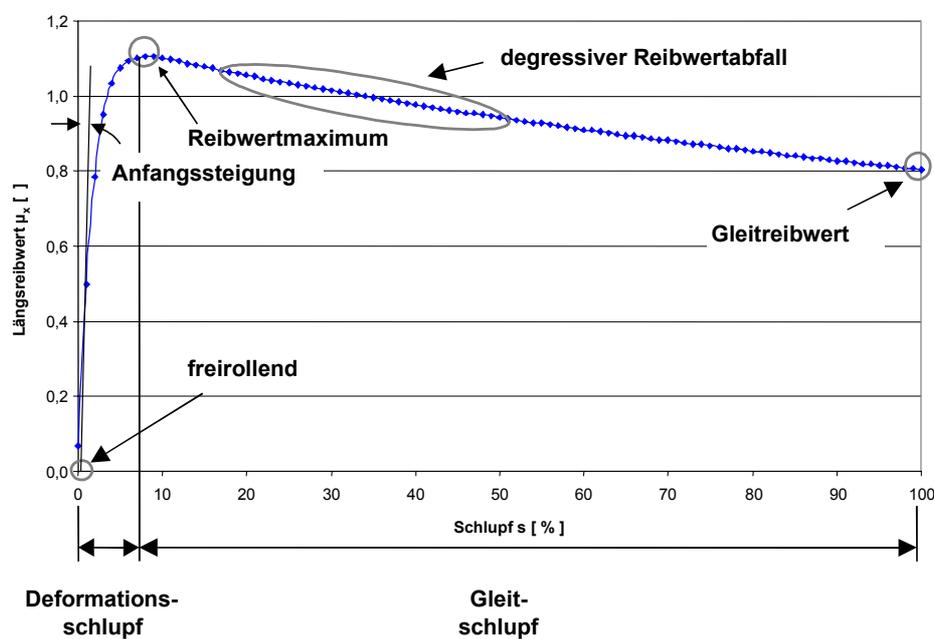


Abbildung 11: Reibwert-Schlupf-Kurve
Friction-slip-curve

Der Reibwert beginnt im Nullpunkt und steigt bis zum Erreichen des Kraftschlussmaximums an. Der Anfangsgradient ist hauptsächlich abhängig von der Reifenlängssteifigkeit [7, 52]. Dies zeigt sich vor allem in Bereichen höherer maximaler Reibwerte [41]. Bei geringerem Kraftschlusspotential hingegen ist eine Korrelation der Anfangssteigung mit dem Maximalreibwert zu beobachten [30, 41, 59]. Dies liegt daran, dass infolge des niedrigen Kraftschlusspotentials auch bei sehr geringen Schlupfwerten (Mikroschlupf mit $s < 2\%$) bereits lokales Gleiten auftritt [59]. Die Lage und Höhe des Reibwertmaximums variiert je nach Fahrbahn (Textur, Bauart, u. a.), Fahrbahnzustand (trocken, nass, u. a.), Reifen (Mischung, Profil, u. a.), Fahrzustand (Radlast, Schräglaufwinkel, u. a.) und Umgebungsbedingung (Temperatur, u. a.). Nach Erreichen des Kraftschlussmaximums fällt der Reibwert mit zunehmenden Schlupf ab.

Die Ausprägung des Abfalls wird in [96, 97] beschrieben. Bei einem Schlupf von 100% steht ausschließlich der Gleitreibwert für die Kraftübertragung zur Verfügung. Da bei 100% Radlängsschlupf in Reifenquerrichtung keine Kräfte zur Fahrzeugstabilisierung mehr übertragen werden können, besitzt der Reibwert-Schlupf-Zusammenhang eine große Bedeutung für Bremssysteme. Während bei einer unregelmäßigen Bremsung das Rad nach dem Erreichen des Reibwertmaximums in Sekundenbruchteilen in die Blockade läuft, versucht ein ABS den Schlupfzustand, bei dem der Maximalreibwert auftritt, zu erreichen und zu halten. Es kommt somit zu einer Schlupfregelung um das Kraftschlussmaximum herum.

2.1.2 Einfluss der Fahrbahn

Einer der Haupteinflussparameter auf den Reibwert ist die Fahrbahn und speziell deren Oberflächentextur. Diese wird unterteilt in verschiedene Wellenlängenbereiche, wobei der Bereich mit $\lambda \leq 0,5\text{mm}$ als Mikrotextrur, $0,5\text{mm} < \lambda \leq 50\text{mm}$ als Makrotextrur, $50\text{mm} < \lambda \leq 0,5\text{m}$ als Megatextrur und $0,5\text{m} < \lambda \leq 50\text{m}$ als Unebenheit bezeichnet wird [71, 91]. Diesen Wellenlängen werden unterschiedliche Eigenschaften zugewiesen, siehe **Abbildung 12**.

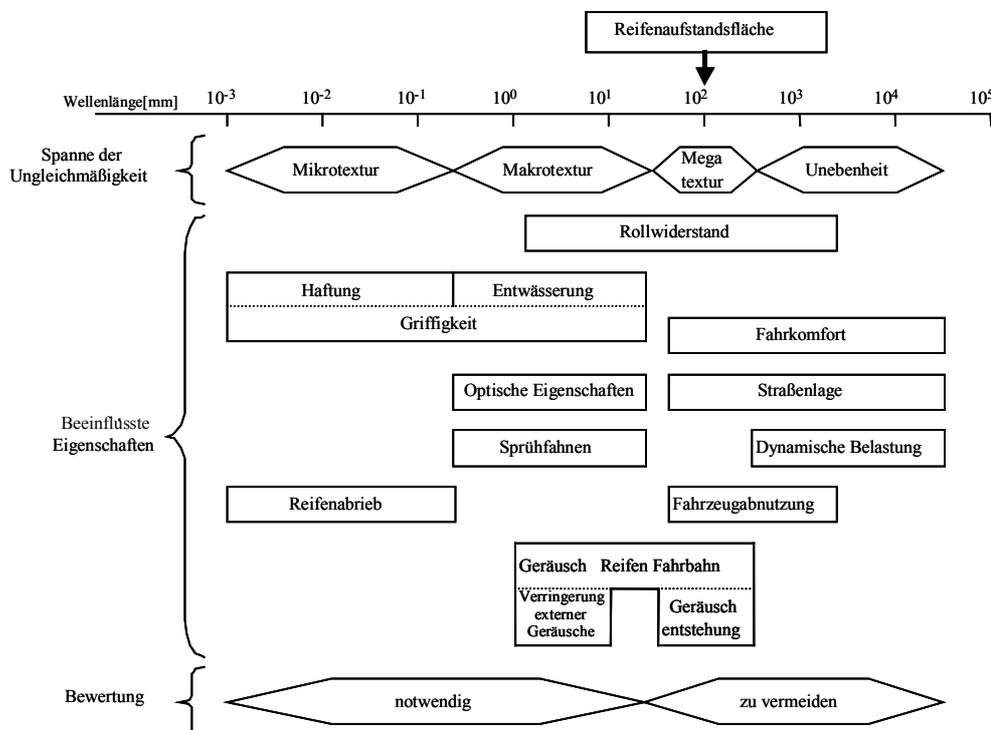


Abbildung 12: Einteilung der Fahrbahn und deren Eigenschaften nach [91]
 Division of road and its qualities

So sind beispielsweise die Mikro- und Makrotextur für die Griffigkeit einer Fahrbahn verantwortlich. Megatextur und Unebenheiten beeinflussen den Fahrkomfort und bewirken auch bei stationärer Fahrt Radlastschwankungen. Dies kann zum einen die Fahrsicherheit negativ beeinflussen, zum anderen ergeben sich hieraus Belastungen für das Fahrwerk und die Fahrbahn.

Um jedoch die Auswirkungen der Fahrbahntextur auf den Reibwert quantifizieren zu können, müssen die einzelnen Einflussfaktoren (Mikro- und Makrotextur) charakterisiert und hinsichtlich ihrer Wirkungen bewertet werden. Eine qualitative Beschreibung des Einflusses ist in **Abbildung 13** dargestellt.

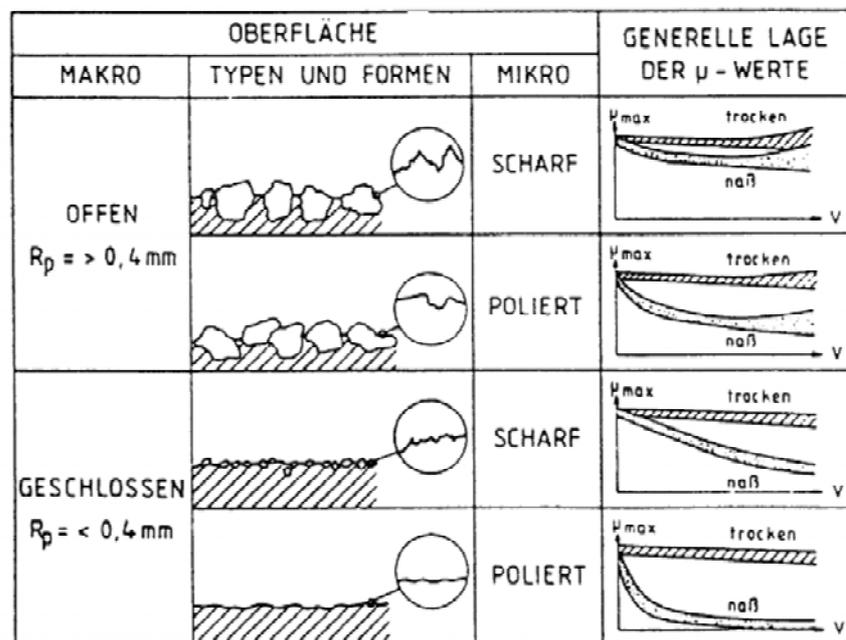


Abbildung 13: Einfluss der Oberflächentextur auf den Maximalreibwert [128]
Influence of pavement texture on maximum friction

In Analogie zu [82, 106, 108] wird deutlich, dass ein hoher Maximalreibwert auf nasser Fahrbahn nur in Kombination mit einer scharfen Mikro- und einer groben Makrotextur erreicht werden kann. Die Mikrotextur (mit Korngrößen zwischen 0,01 und 0,1mm) ermöglicht eine große Berührungsfläche, welche zur Ausbildung von Adhäsionsreibung benötigt wird [81, 127]. Die Makrotextur (mit Korngrößen um 1mm) bewirkt zum einen, dass Fahrbahnnässe innerhalb der Fahrbahnrauigkeit gespeichert werden kann, ohne dass sich ein geschlossener Wasserfilm ausbreitet (Wasseraufnahmevermögen). Zum anderen hilft sie durch Texturkanäle, das Wasser aus der Reifen-Fahrbahn-Kontaktstelle zu verdrängen (Drainagevermögen).

In der Reifenaufstandsfläche wiederum ergeben sich erneut zwei Mechanismen, die den Reibwert entscheidend beeinflussen: Zunächst bewirken die aus dem Wasserfilm

herausragenden Texturspitzen, dass es zu einem „trockenen“ Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn kommt und damit eine Aktivierung der Adhäsionskomponente hervorgerufen wird. Des weiteren ergibt sich durch das Eindringen der Textur in das Laufflächengummi eine Verzahnungswirkung und das Aktivieren der Hysteresekomponente. Diese ist, wie in **Kapitel 2.1.1** beschrieben maßgeblich für den Nassgriff verantwortlich.

Die Auswirkungen auf den Reibwert, die sich aus den unterschiedlichen Texturen von verschiedenen Fahrbahnbelägen ergeben, sind in **Abbildung 14** dargestellt.

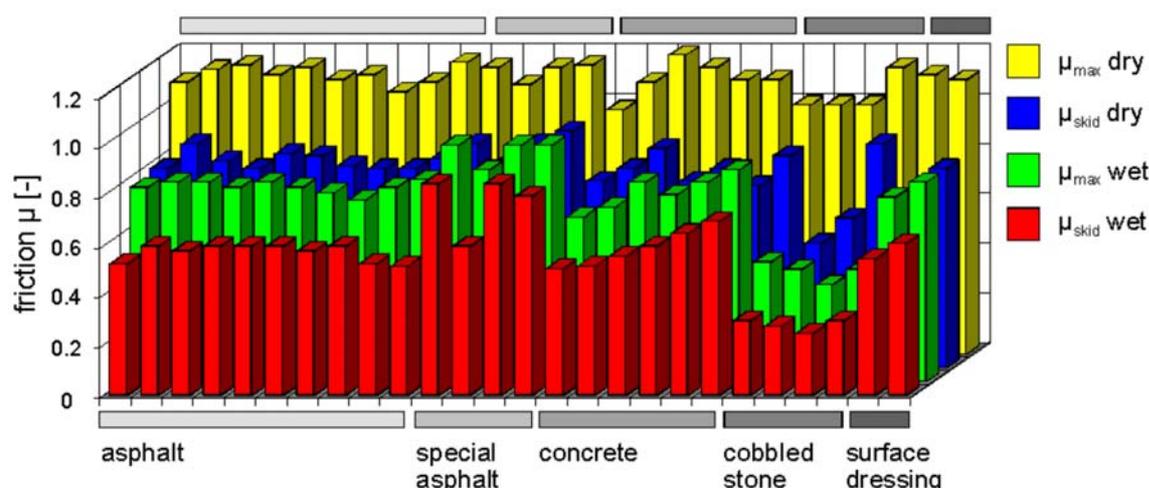


Abbildung 14: Einfluss verschiedener Fahrbahndecken auf den Reibwert
Influence of different road pavements on friction [33]

In Übereinstimmung mit [127, 129] ist deutlich zu erkennen, dass Asphaltoberflächen mit in der Regel hoher Schärfe und grober Textur bei trockenen und nassen Fahrbahnzuständen hohe Maximalreibwerte ermöglichen. Spezialasphalte (z.B. Flugplätze und Rennstrecken) und Fahrbahnoberflächen, die zusätzlich aufgeraut wurden, übertreffen diese Werte noch. Im Gegensatz hierzu stehen die Kopfsteinpflasterbeläge (mit Blocklängen von $>70\text{mm}$), deren Reibwerte durch geringe Mikro- und vor allem Makrotextur bei Nässe extrem abfallen.

2.1.3 Einfluss des Zwischenmediums

Eine der Haupteinflussgrößen auf den Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn ist die Art und Schichtdicke des Zwischenmediums. Durch die herausragende Bedeutung dieses Parameters war und ist er Ziel einer Fülle von Forschungsaktivitäten [5, 7, 33, 35, 38, 49, 52, 97, 100]. Diese beschäftigen sich sowohl mit der Erfassung und

Beschreibung der Zwischenmedien, als auch mit der Untersuchung der Effekte, die eine Änderung des Fahrbahnzustands auf die Reifen-Fahrbahn-Interaktion ausübt.

In **Abbildung 15** sei stellvertretend für die oben angesprochenen Messungen ein Überblick über den Einfluss unterschiedlicher Fahrbahnzustände gegeben.

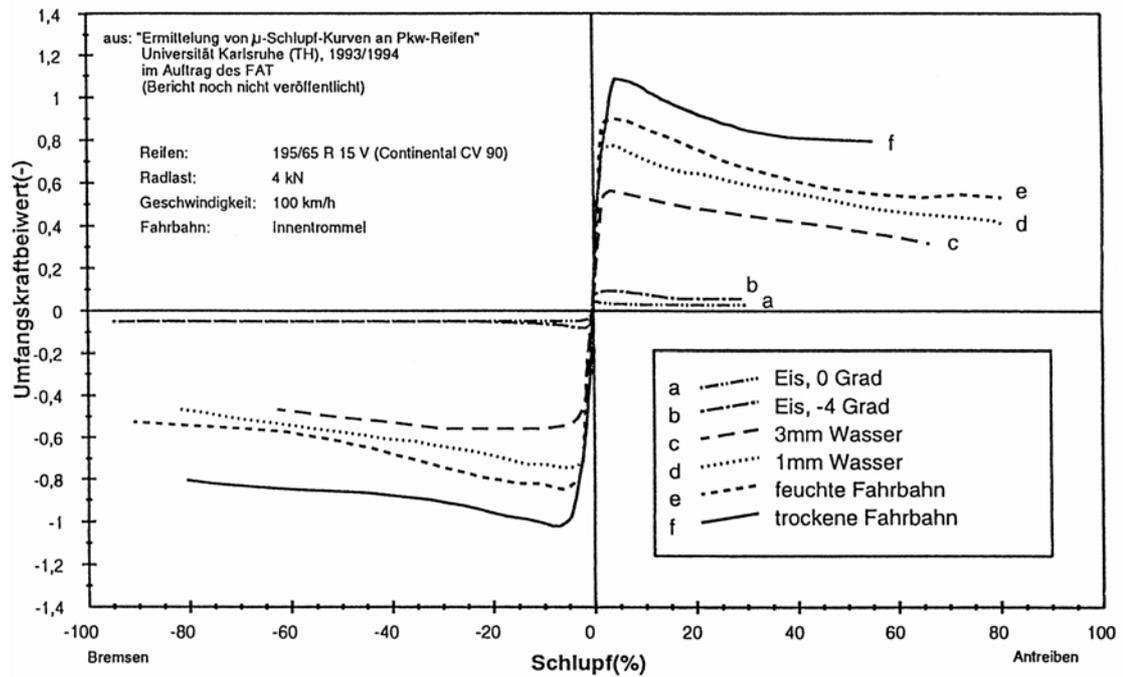


Abbildung 15: Einfluss des Zwischenmediums [65]
 Influence of intermediate medium

Deutlich ist der Abfall des Kraftschlussmaximums beim Übergang von trockener zu feuchter Fahrbahn zu erkennen. Dies ist, wie bereits in **Kapitel 2.1.1** erläutert, zu einem großen Teil auf die Verringerung der Adhäsionskomponente der Reifen-Fahrbahn-Reibung zurückzuführen. Dieser Effekt verstärkt sich noch bei Erhöhung der Wasserfilmdicke, so dass bei gleichen Randbedingungen und einer Wasserfilmtiefe von 3mm nur noch etwa die Hälfte der Kräfte wie im trockenen Fahrbahnzustand übertragen werden können.

Besonders deutlich wird der Einfluss des Zwischenmediums beim Wechsel des Aggregatzustands von flüssig zu fest. Dabei reduziert sich der Maximalreibwert auf Werte kleiner 0,2. Neben dem Zwischenmedium als eigenständigem Einflussfaktor ist auch dessen Wechselwirkung mit der Fahrbahn und deren Textur von großer Bedeutung (siehe **Kapitel 2.1.2**). Dabei ergibt sich für verschiedene Fahrbahnen ein unterschiedlich starker Abfall des Reibwertmaximums bei zunehmender Wasserfilmdicke [5], siehe **Abbildung 16**.

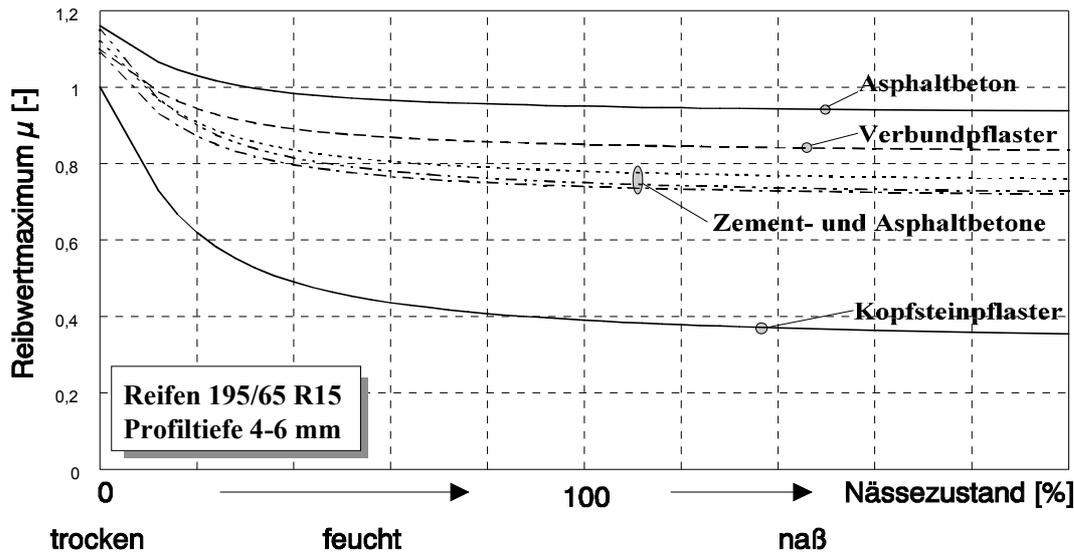


Abbildung 16: Einfluss von Fahrbahnnässe und -oberfläche auf das Reibwertmaximum [5]
Influence of road wetness and pavement on maximum friction

Die Fahrbahnnässe in diesem Diagramm wurde mittels Reflexionssensor ermittelt, siehe **Kapitel 3.3**, wobei eine Nässezahl $NZ=1$ einem Nässezustand von 100% entspricht und den Gleichgewichtszustand [73] beschreibt, d. h. die Wasserzufuhr bei einem längeren Regen und der Wasserablauf halten sich die Waage. Der Wasserfilm hat hierbei die Fahrbahn bedeckt, so dass ausschließlich einzelne Rauigkeitsspitzen die Wasseroberfläche durchdringen. Besonders sensibel auf Wasserfilme reagieren Fahrbahnen mit sehr glatter Oberfläche, d. h. ohne ausreichende Makro- und Mikrorauigkeiten.

Neben dem Fahrbahnuntergrund, der Art des Zwischenmediums und dessen Aggregatzustand ist auch dessen spezielle Ausprägung von reibwertbeeinflussender Bedeutung. So ergibt sich nach [5] für eine raue Eisfahrbahn, wie sie bei sehr tiefen Temperaturen entsteht, ein Maximalreibwert von 0,4. Demgegenüber weist eine glatte Eisfahrbahn bei Temperaturen um den Gefrierpunkt nur Reibwerte im Bereich von 0,1 bis 0,2 auf. Dies zeigt, dass große Reibwertdifferenzen auftreten können, obwohl es sich um das gleiche Zwischenmedium handelt. Untersuchungen von [61, 120] bestätigen dieses Ergebnis.

Eine deutliche Erhöhung des Komplexitätsgrades bei der Beschreibung des Sachverhalts entsteht, wenn das Zwischenmedium nicht ausschließlich aus Wasser (in seinen verschiedenen Aggregatzuständen) besteht, sondern zusätzliche Fremdstoffe miteinfließen. Bereits ein Salz-Schmierfilm, wie er auf gestreuten Winterfahrbahnen vorkommt, kann gegenüber einer angehängten Oberfläche den zur Verfügung stehenden Gleitreibwert um ca. 0,03 Reibwerteinheiten verringern. Dies verschlechtert sich noch

deutlich, wenn statt des Salz-Schmierfilms ein Dieselkraftstoff-Schmierfilm vorhanden ist. Hierdurch nimmt der Gleitreibwert Größenordnungen an, die nur knapp über denen griffiger Schneefahrbahnen liegen [75].

Auch laubbedeckte Fahrbahnen erzeugen einen deutlichen Reibwertsprung beim Überfahren [33]. Stellt ein trockener Laubbelag noch akzeptable Maximalreibwerte zur Verfügung ($\mu_{\max} > 0,6$), so verringert sich das Kraftschlusspotential bei nassem Laub auf ca. 0,3 Reibwerteinheiten. Dies ist besonders kritisch, da sich trockene und feuchte Stellen für den Fahrer nur schwer erkennbar abwechseln.

2.1.4 Einfluss der Temperatur

Der Parameter Temperatur hat einen direkten Einfluss auf die Materialeigenschaften des Laufstreifengummis. Deshalb hängt auch die Art und Höhe der Auswirkungen von Temperaturänderungen auf das Kraftschlusspotential stark von der Laufstreifenmischung ab. Generell kann festgestellt werden, dass eine Verringerung der Temperatur eine Erhöhung der Reifenlängssteifigkeit und damit eine Erhöhung des Reibwertgradienten $d\mu/ds$ bewirkt [33].

Des weiteren zeigt sich der Temperatureinfluss in der Höhe und Lage des Reibwertmaximums: Eine Verringerung der Temperatur bewirkt über die Erhöhung der Laufflächensteifigkeit, d.h. die Erhöhung der Steifigkeit der einzelnen Profilelemente, dass sich die Größe des Deformationsschlupfs verringert. Dies führt zu einer geringeren Verformung der Profilelemente und zu einem früheren Gleitbeginn, wodurch das Erreichen höherer Maximalreibwerte teilweise verhindert wird, siehe **Abbildung 17**.

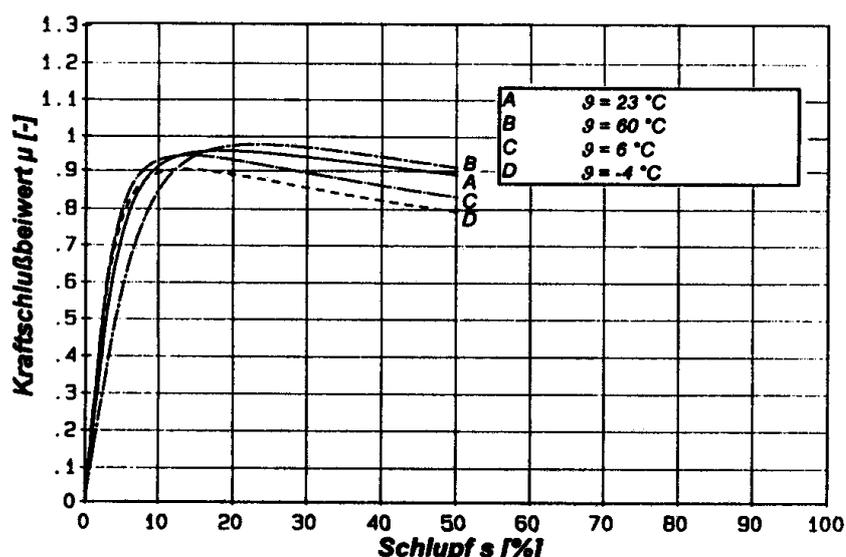


Abbildung 17: Einfluss der Temperatur auf den Reibwert in Längsrichtung [102]
Influence of temperature on longitudinal friction

Der Schlupf, bei dem das Kraftschlussmaximum erreicht wird, wandert bei niedriger Temperatur folglich zu geringeren Werten [37]. Dies liegt, wie bereits ausgeführt, zum einen an der Verringerung des Deformationsschlupfs. Zum anderen verschiebt sich die Gleitgeschwindigkeit, bei der die Adhäsions- und Hysterese Komponente ihre Maximalwerte erreichen, zu niedrigeren Werten. Dies bedeutet, dass bei konstanter Radgeschwindigkeit die kritische Gleitgeschwindigkeit (Gleitgeschwindigkeit, bei der der Verlustbeiwert sein Maximum besitzt) bei niedrigeren Gleitschlupfwerten erreicht wird, als dies bei höheren Temperaturen der Fall ist [102].

Eine Übertragbarkeit der Zuordnung von Temperatur- und Reibwertänderung eines Reifens auf einen anderen ist ohne Berücksichtigung der Profilgestaltung und der physikalischen Eigenschaften der Laufflächenmischung nicht möglich. So erreichen beispielsweise Reifen mit sehr weichen, kältegeeigneten Mischungen und beweglichen Profilelementen hohe Reibwerte in niedrigen Temperaturbereichen. Bei höheren Temperaturen jedoch kommt es infolge der Verformung zu einem Verkanten der Profile und einer Verringerung der Kontaktfläche, woraus eine Reduktion der übertragbaren Kräfte resultiert.

2.1.5 Einfluss der Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit ist als einziger vom Fahrer frei wählbarer Parameter von entscheidender Bedeutung für die Höhe des Kraftschlusspotentials zwischen Reifen und Fahrbahn. Durch die Rad- und Gleitgeschwindigkeit werden nicht nur die Betriebszustände der verschiedenen Reibungsmechanismen angeregt, sondern es ergeben sich Auswirkungen auf die Materialeigenschaften, die Reifengeometrie und die Gewichtung, bzw. Bedeutung weiterer Einflussgrößen (z.B. Wasserfilmdicke) beim Reifen-Fahrbahn-Kontakt. So bewirkt, wie in **Kapitel 2.1.1** erläutert, eine hohe (Gleit-)geschwindigkeit, dass das Gummi der Fahrbahnoberfläche nur noch teilweise folgen kann, wodurch sich die wirksame Kontaktfläche und damit die Adhäsionskomponente reduziert [98]. Gleichzeitig ergibt sich durch das Aufschlagen eines Profilelements beim Abrollen des Rades ein geschwindigkeitsabhängiger Stoßeffect, welcher die Ausprägung der Hysterese Komponente anregt.

Eine weitere Auswirkung der Geschwindigkeit, die sich bei modernen Pkw-Gürtelreifen jedoch in Grenzen hält, ist die Vergrößerung des dynamischen Radhalbmessers (ca. 1% Differenz von R_{dyn} bei 60 und 200km/h) [100]. Damit einher geht eine Veränderung der Form und Größe der Reifenaufstandsfläche.

Während auf trockener Fahrbahn der Einfluss der Geschwindigkeit durch die geschilderte Verringerung der Adhäsionskomponente und den geschwindigkeitsunabhängigen Anteil der Reibkraft noch relativ gering ist, kommt dieser auf nasser

Fahrbahn voll zum Tragen [7, 49, 52]. Dies liegt zum großen Teil an der geringen Zeit (weniger als 0,005s bei 100km/h), die dem Reifen zur Verdrängung des Wasserfilms bleibt, siehe auch **Kapitel 2.1.6**. Aus diesem Grund besteht auch eine starke Wechselwirkung des Geschwindigkeitseinflusses mit der Makrotextur und der Profiltiefe, die durch Kanäle die Aufnahme und den Abtransport des Wassers ermöglichen. Des weiteren bewirkt eine Erhöhung der Geschwindigkeit den Aufbau von hydrodynamischen Kräften [108]:

$$\text{Druckkraft pro Flächeneinheit (Druck)} \quad q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad [\text{N/m}^2] \quad (11)$$

Besonders deutlich zeigt sich der Einfluss bei Geschwindigkeiten größer 50 bis 60km/h [49, 51, 52, 100, 124]. Die Lage des Reibwertmaximums verschiebt sich zu geringeren Schlupfwerten [39]. Der Grund hierfür liegt darin, dass bei Erhöhung der Radgeschwindigkeit zum einen verstärkt lokales Gleiten auftritt, zum anderen ein geringerer Gleitschlupf nötig ist, um die kritische Gleitgeschwindigkeit zu erreichen.

In **Abbildung 18** ist eine Messung der maximalen Seitenkraft bei 3500N Radlast und einer Wasserfilmtiefe von 3mm dargestellt.

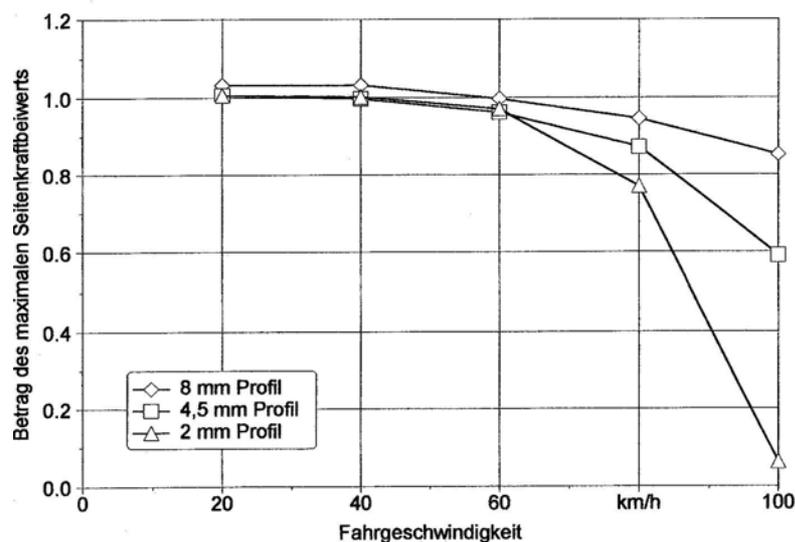


Abbildung 18: Einfluss von Geschwindigkeit und Profiltiefe auf maximalen Querreibwert [87]
Influence of speed and tread depth on maximum lateral friction

In diesem Zusammenhang sei am Rande erwähnt, dass die zulässige minimale Profiltiefe für Pkw-Reifen in Deutschland bei TD= 1,6mm liegt.

2.1.6 Einfluss der Reifenprofiltiefe

Vor allem auf Fahrbahnoberflächen mit geschlossenem Wasserfilm hat die Profiltiefe eines Reifens einen entscheidenden Einfluss auf die übertragbaren Kräfte in Längs- und Querrichtung [49], siehe auch Abbildung 18.

Nach [82] unterteilt sich der Vorgang der Wasserverdrängung in zwei voneinander unabhängige Abläufe. Zunächst muss das Wasserhauptvolumen im vorderen Teil der Reifenaufstandsfläche verdrängt werden. Dieser Vorgang ist neben den Trägheitskräften der Flüssigkeit abhängig von den im Reifen und der Fahrbahn zur Verfügung stehenden Querschnitten der Abflusskanäle. Im zweiten Vorgang wird der verbleibende Flüssigkeitsfilm reduziert. Dies ist speziell für die Ausprägung der Adhäsionskomponente von großer Bedeutung. Während dieser Mechanismus in großem Maße durch die Profilgestaltung und die Radlast (Flächenpressung) beeinflusst wird, siehe **Kapitel 2.1.7**, ermöglichen beim ersten Vorgang die Profiltrillen den Abtransport des Wassers aus der Reifenaufstandsfläche, wodurch hydrodynamische Effekte, welche zu Aquaplaning führen, entweder komplett verhindert oder zumindest zu höheren Geschwindigkeiten verschoben werden [5, 28, 67, 115, 127]. Die Entstehung von Aquaplaning lässt sich anschaulich am 3 Zonen Modell darstellen, siehe **Abbildung 19**.

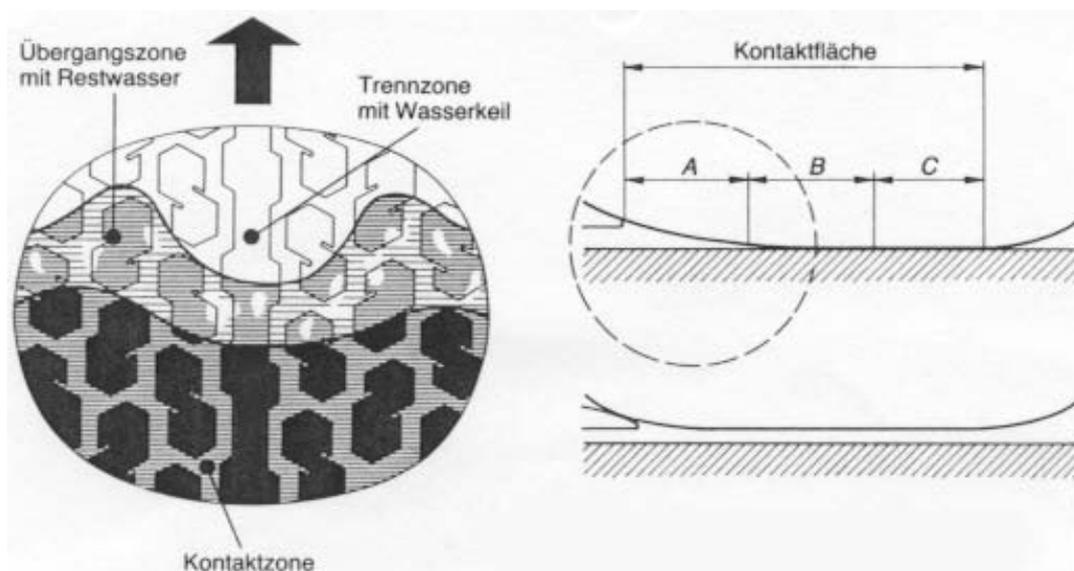


Abbildung 19: 3 Zonen Modell [100]
3 zone model

Während in der dritten Zone (C) das Wasser vollständig aus der Reifenaufstandsfläche verdrängt wird und sich Adhäsions- und Hysteresereibung ausbilden können, liegt in der Übergangszone (B) Mischreibung vor, d.h. die Adhäsionskomponente wird größtenteils unterbunden, da sich ein dünner Wasserfilm zwischen der Fahrbahn und den Profil-

elementen ausbildet. In der ersten Zone (A) kommt es zu keinem Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn. Wird nun die Geschwindigkeit gesteigert, so schiebt sich der Wasserkeil zunehmend in die Reifenaufstandsfläche. Ist der Reifen vollständig aufgeschwommen, wirken ausschließlich viskose Scherkräfte zwischen Reifen und Fahrbahn.

Da bei Geschwindigkeiten um 100km/h nur wenige Millisekunden zur Verfügung stehen, um das Wasser aus dem Reifenlatsch zu verdrängen, sind vor allem die Längen der Transportwege, die das Wasser zurückzulegen hat, um aus der Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche zu gelangen, von großer Bedeutung. Dies bedeutet, dass neben dem reinen Negativanteil auch die Profilgestaltung zu berücksichtigen ist.

Um bei konstanter Radlast gegen die hydrodynamischen Auftriebskräfte wirken zu können und damit Kontaktflächen zwischen Reifen und Fahrbahn zu erzeugen, bedarf es örtlich hoher Flächenpressungen [5, 49]. Auch dies gelingt bei ansonsten konstanten Einflussparametern durch ausreichende Profilierung.

In **Abbildung 20** ist der Längsreibwert bei einer Geschwindigkeit von 100km/h und einer Wasserfilmtiefe von 3mm dargestellt [124].

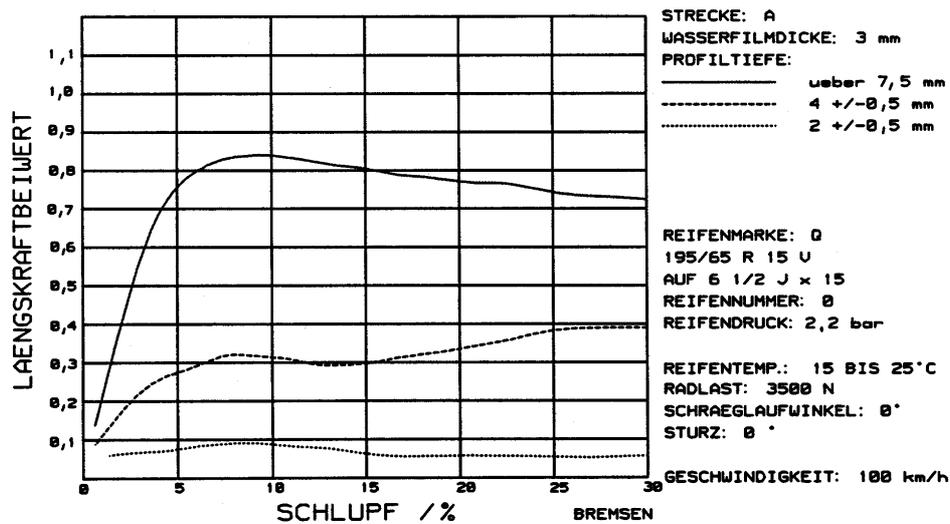


Abbildung 20: Einfluss der Profiltiefe auf den Reibwert in Längsrichtung [124]
Influence of tread depth on longitudinal friction

Es ist deutlich der starke Abfall des Kraftschlusspotentials vom Neureifen mit einer Profiltiefe von über 7,5mm hin zu einem stark abgefahrenen Reifen mit einem Restprofil von 2mm zu erkennen. Bei letzterem liegt Aquaplaning vor, so dass ausschließlich viskose Scherspannungen in der Zone zwischen Reifen und Fahrbahn wirken (siehe auch **Kapitel 2.1.1**). Aquaplaning liegt laut [36, 86] vor, wenn bei nasser Fahrbahn der Reibwert $\mu \leq 0,1$ beträgt ($\mu \leq 0,15$ [51]). Besonders bei Bedingungen, die zu Aquaplaning führen können, ist der Einfluss der Profilgestaltung (Form, Negativ-

anteil, u.a.) von signifikanter Bedeutung. So können sich zwischen unterschiedlichen Reifen Differenzen in der Aufschwimmgeschwindigkeit von 20% und mehr ergeben [5].

Im Gegensatz zur nassen Fahrbahn bewirkt eine geringere Profiltiefe auf trockenen Oberflächen eine Erhöhung des Kraftschlusspotentials [41]. Dies hängt zum einen damit zusammen, dass zum Profilgrund hin die Profilelemente an Dicke zunehmen und sich dadurch mit wachsendem Verschleiß eine größere Reifenaufstandsfläche ergibt.

Zum anderen stellt sich bei großen Profiltiefen eine erhöhte Beweglichkeit der Profilelemente in Längs- und Querrichtung ein. Diese Beweglichkeit kann zu einem „Verkippen“ der Profile und damit zu einer Verringerung der Reifenaufstandsfläche führen. Zudem ergeben sich aus Profilstauchungen und Bewegungen in Querrichtung laterale Schubspannungen, die das Kraftschlusspotential in Längsrichtung verringern.

2.1.7 Einfluss der Radlast

Die Radlast gehört ebenso wie die Profiltiefe zu den Parametern, die in Abhängigkeit vom Fahrbahnzustand sowohl einen positiven als auch einen negativen Einfluss auf das Kraftschlussmaximum haben können. So zeigt sich bei trockener Fahrbahnoberfläche ein degressiver Verlauf des maximalen Längs- und Querreibwerts über der Radlast [49, 52, 102]. Dies ist nach der Gummireibungstheorie auch nicht anders zu erwarten, da sich der Reibungsbeiwert mit zunehmendem Normaldruck verringert [82]. Bezieht man diese Erkenntnisse auf einen vollprofilierten Pkw-Reifen, so werden die Vorgänge innerhalb der Reifenkontaktfläche noch deutlicher: Durch eine hohe Radlast kommt es im Reifenlatsch zu einer stark inhomogenen Flächenpressungsverteilung mit örtlichen Druckspitzen. Dadurch werden abplattungsbedingte Schubspannungen induziert, welche das Kraftschlusspotential reduzieren [41]. Diese erhöhte Belastung in der Reifenaufstandsfläche bewirkt eine stärkere Verformungsarbeit, die mit einer Temperaturerhöhung einhergeht. Außerdem kommt es zu einer Vergrößerung des Reifenlatsches, was zu einem steileren Anstieg der Reibwert-Schlupf-Kurve aus dem Ursprung heraus führt.

Auf nasser Fahrbahn ändert sich der Einfluss der Radlast auf das Kraftschlusspotential deutlich: So können mit zunehmender Radlast bei größeren Wasserfilmdicken und höheren Geschwindigkeiten größere Reibwerte in Längs- und Querrichtung erreicht werden [38, 49, 50, 86, 124]. Einer der Hauptgründe hierfür liegt in der besseren Wasserverdrängung im Reifenlatsch. Dadurch wird verhindert, dass der Wasserkeil, der sich im Reifeneinlauf ausbildet, in die Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche eindringt. Hier wirkt die Radlast der hydrodynamischen Auftriebskraft und den Trägheitskräften des Wassers entgegen. Desweiteren ermöglichen die Druckspitzen im Reifenlatsch, die

aufgrund der inhomogenen Flächenpressungsverteilung entstehen, ein besseres Durchdringen des Wasserfilms und damit einen größeren Reifen-Fahrbahn-Kontakt [49].

Die Auswirkung einer Radlasterhöhung bei einer Wasserfilmdicke von 3mm und einer Fahrgeschwindigkeit von 80km/h auf die maximale Längskraft ist in **Abbildung 21** dargestellt: Die Kraft des Reifens mit dem Nenndruck von 2,2bar und dem mit 3bar steigt nahezu linear an. Die Effekte, die sich beim Reifen mit 1,4bar einstellen, werden in **Kapitel 2.1.8** diskutiert.

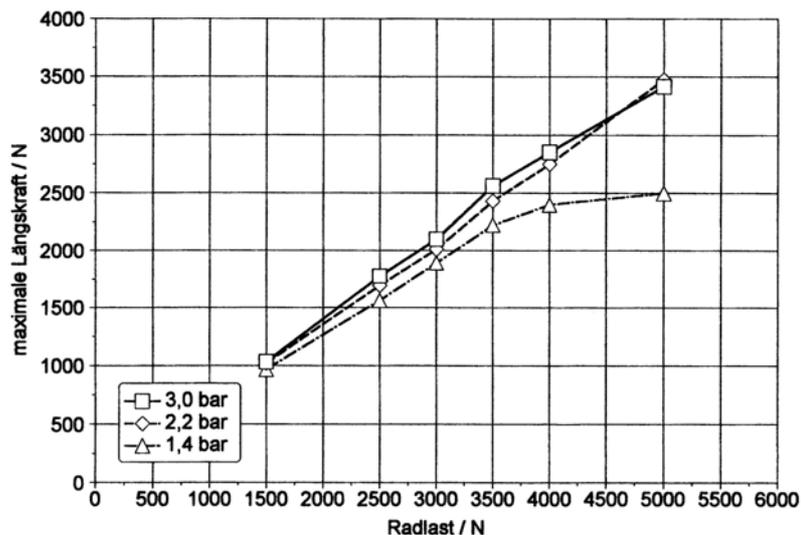


Abbildung 21: Einfluss von Radlast und Reifeninnendruck auf die maximale Längskraft in der Reifenaufstandsfläche [35]
Influence of wheel load and tyre pressure on maximum longitudinal force in the tire contact patch

2.1.8 Einfluss des Reifeninnendrucks

Der Reifeninnendruck stellt eine schwierig zu handhabende Größe dar, da er stets im Zusammenwirken mit der Radlast gesehen werden muss. Zusammen zeichnen sich beide Größen, unter Berücksichtigung des Karkassenaufbaus und der Profilgestaltung, verantwortlich für die Flächenpressungsverteilung im Reifenlatsch.

Der Einfluss des Reifeninnendrucks ist nicht nur vom Fahrbahnzustand abhängig, er hat auch unterschiedliche Auswirkungen auf den Reibwert in Längs- und Querrichtung: Bei sonst gleichen Randbedingungen bewirkt ein geringerer Luftdruck eine Vergrößerung des Reifenlatsches. Dies führt bei trockener Fahrbahn zu einer Erhöhung der maximalen Längsreibwerte [7] und der Anfangssteigung [52]. Dadurch, dass durch die größere Reifenaufstandsfläche mehr Profilelemente mit der Fahrbahnoberfläche im Eingriff sind, reduziert sich die Gesamtdeformation (Deformationsschlupf) und das Kraftschlussmaximum wird früher erreicht [102].

Mechanismen und Einflussgrößen der Reifen-/Fahrbahnreibung

Auf nasser Fahrbahn wirkt sich die Vergrößerung der Reifenaufstandsfläche durch einen niedrigen Reifenluftdruck negativ aus [35, 124], siehe auch Abbildung 21. Durch die geringere Flächenpressung im Reifenlatsch kommt es zu einer schlechteren Wasserverdrängung [38] und der Wasserkeil im Reifeneinlauf schiebt sich in die Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche, siehe Abbildung 19. Eine höhere Radlast mit entsprechend angepasstem Luftdruck (größer 2,2bar) begünstigt die Wasserverdrängung und verschiebt die kritische Geschwindigkeit, bei der ein Aufschwimmen des Reifens auftritt, hin zu höheren Werten [5]. Der Einfluss ist hierbei über ein großes Druckintervall konstant. D.h. Luftdruckvariationen im Bereich von 2,5 bis 4,5bar bewirken keine signifikanten Änderungen des Längsreibungswerts [25, 38]. Eine weitere Erhöhung des Drucks führt jedoch zu einer deutlichen Aufweitung des Radhalbmessers und zu einer Verkürzung der Latschlänge [38, 102]. Dadurch reduzieren sich die übertragbaren Längs- und Seitenkräfte.

In Querrichtung bewirkt ein niedriger Luftdruck auf trockener und nasser Fahrbahn eine deutliche Reduzierung der Seitensteifigkeit und der übertragbaren Seitenkräfte [100]. Lediglich sehr geringe Reifeninnendrucke (ca. 1bar) bewirken auf nasser Fahrbahn einen Anstieg der Querreibungswerte. Dies ist laut [49] darauf zurückzuführen, dass es an der Außenschulter des Reifens zu einer starken Erhöhung der Flächenpressung kommt. Diese wiederum hilft, den Wasserfilm zu verdrängen.

2.1.9 Weitere Einflussparameter auf die Reifen-Fahrbahnreibung

Einer der bedeutendsten Einflussparameter auf das Kraftschlusspotential ist die **Laufstreifenmischung** des Reifens. Diese kann durch den Fahrer zwar nicht verändert werden, jedoch bestimmt sie den (sinnvollen) Einsatzbereich des Fahrzeugs bezüglich Temperatur, Geschwindigkeit u.a. Eine typische Laufstreifenmischung setzt sich zusammen aus: Kautschuken, Füllstoffen, Ölen, Alterungsschutzmitteln, Verarbeitungsmitteln, Vernetzern und Beschleunigern [95].

Speziell der Kraftschluss bei Nässe (Nassgriff) wurde in den letzten Jahren durch die Einführung von Silica-Reifen, die Kieselsäure als Füller verwenden, stark verbessert. Der Füllstoff (Ruß und/oder Kieselsäure) hat die Aufgabe, der Gummistruktur Festigkeit zu geben und für einen möglichst geringen Reifenverschleiß zu sorgen. Daraus ergab sich früher (und in Grenzen noch heute) der Zielkonflikt, dass eine Verbesserung des Abriebverhaltens durch Zugabe von Ruß den Nassreibungswert verschlechtert. Diese Interessensschere konnte durch Verwendung von Kieselsäure als Füller in Richtung eines besseren Nassgriffverhaltens bei gleichzeitig hoher Laufleistung verschoben werden [7, 95].

Zur Beschreibung bzw. Vorhersage der Mischungseigenschaften bzgl. Kraftschluss- und Reibverhalten werden verschiedene Kennwerte verwendet: Zum einen ist die Glasübergangstemperatur T_g (Einfriertemperatur) zu nennen. Wird ein Polymer erwärmt, so bezeichnet T_g die Temperatur, ab der die Beweglichkeit der Molekülketten deutlich zunimmt. Der Schubmodul nimmt infolge dessen stark ab und die Dämpfung erreicht ein ausgeprägtes Maximum. Damit bestimmt die Glasübergangstemperatur zu einem großen Teil den Temperatureinsatzbereich der Mischung. So ist grundsätzlich für ein gutes Nassgriffverhalten ein Polymer mit hoher Glasübergangstemperatur anzustreben. Liegt die Gewichtung mehr auf einer guten Schnee- und Eistraktion, so ist eine niedrige Glasübergangstemperatur nötig [58].

Zum anderen wird neben der Glasübergangstemperatur vor allem der Verlustwinkel $\tan\delta$, siehe **Kapitel 2.1.1**, eingesetzt, um den Reibwert einer Laufstreifenmischung bei Nässe im Vorfeld abzuschätzen. So ergibt die Gegenüberstellung eines Nassgriff-Ratings verschiedener Gummimischungen (auf Ruß Basis) mit dem Verlustfaktor eine sehr gute Korrelation, siehe **Abbildung 22**. Dies deckt sich mit Ergebnissen von [7].

Eine weitverbreitete Methode zur Beschreibung des Nassreibwerts ist die Verwendung des Skid Resistance Tester SRT (auch British Pendulum BP genannt), siehe **Kapitel 3.2.2.3**. Dieses ermöglicht den schnellen Vergleich verschiedener Laufstreifenproben auf realen Oberflächen. Die Gleitgeschwindigkeiten, die hierbei erreicht werden, decken den unteren Teil der bei einer realen Reifen-Fahrbahn-Interaktion auftretenden Geschwindigkeiten und Aktivierungsfrequenzen ab [63].

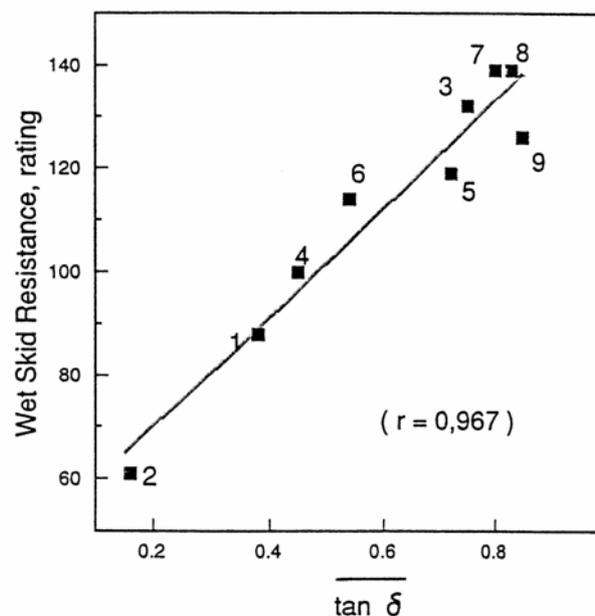


Abbildung 22: Korrelation von Nassreibwert (Rating) und Verlustfaktor [63]
Correlation of wet skid resistance (rating) and lost factor

Ebenso wie die Laufstreifenmischung ist auch die **Profilgestaltung** nicht durch den Fahrer veränderlich, wenn man von „Sägezahnbildung“ der Profilelemente durch ungleichmäßigen Reifenverschleiß (infolge starker Brems- oder Antriebskräfte) absieht.

Grundsätzlich kann das Profil in eine Grob- und eine Feingestalt unterteilt werden. Untersuchungen zum prinzipiellen Einfluss der Grobprofilierung wurden u.a. von [49] und [57] durchgeführt. Hierbei zeigte sich, wie auch bereits in **Kapitel 2.1.6** erläutert, dass das Wasseraufnahme- und Verdrängungsvermögen des Reifens auf nasser Fahrbahn von entscheidender Bedeutung ist. Dies wurde anhand von Reifen mit einer idealisierten Profilgestaltung untersucht.

Während [49] und [57] sich in der Bewertung von reinen Quer- und Längsprofilen bezüglich des Kraftschlussmaximums auf nassen Fahrbahnen widersprechen, herrscht Einstimmigkeit bezüglich Reifen mit gefeilter Profilform: Hierbei ist unbedingt darauf zu achten, dass die Pfeilung in Laufrichtung geht und damit beim Abrollkontakt den Wasserfilm durchtrennt und nach außen leitet. Wird der Reifen andersherum montiert, ergibt sich der Effekt, dass das Wasser in die Reifenkontaktfläche geleitet wird und dadurch hydrodynamische Kräfte erzeugt. Moderne Reifen haben dieses Prinzip übernommen und zeigen verstärkt eine laufrichtungsgebundene Profilierung. Zur besseren Wasseraufnahme wird auch oftmals eine breite Mittelrinne vorgesehen.

Während auf nasser Fahrbahn ein möglichst großer Negativanteil gewünscht wird (handelsübliche Pkw-Reifen besitzen einen Negativanteil von ca. 30%), um durch eine Erhöhung der Flächenpressung den Wasserfilm besser verdrängen zu können, wird auf trockener Fahrbahn eine möglichst geringe Profilierung benötigt: Je geringer der Negativanteil bei gegebener Reifenbreite, um so größer ist die zur Verfügung stehende Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche. Des weiteren bewirken breitere Profilelemente eine höhere Längs- und Quersteifigkeit. Dadurch wird zum einen das Kraftschlussmaximum bei geringeren Schlupfwerten erreicht, zum anderen ergibt sich ein besseres Ansprechverhalten bei geringeren Lenkwinkeln.

Anders sehen die Gestaltungsziele bei Winterreifen aus. Hier gilt es einen noch größeren Zielkonflikt zu bewältigen: Zum einen muss das Profil die Aufnahme und vor allem das Kompaktieren des Schnees im Reifenlatsch und die Selbstreinigung nach dem Verlassen der Reifenaufstandsfläche ermöglichen. Zum anderen muss durch eine Feinlamellierung erreicht werden, dass möglichst viele Griffkanten im Einsatz sind, d. h. dass sich eine möglichst große Gesamtkantenlänge im Eingriff befindet. Die sehr weiche Struktur hat außerdem die Aufgabe, einen möglichst hohen Deformationsschlupf ohne lokalem Gleiten zuzulassen, um auch auf sehr glatten Fahrbahnen Kräfte aufbauen zu können. Dies bewirkt, dass auch auf trockenen Fahrbahnen das Kraftschlussmaximum erst bei sehr hohen Schlupfwerten erreicht wird und niedriger ist als bei Sommerreifen (ohne Berücksichtigung von Mischung und Temperatur) [7]. Auf Eis wiederum ergibt sich die

Forderung nach einem möglichst geringen Negativanteil, damit eine große Kontaktfläche zur Verfügung steht [100].

Ein weiterer, bislang nicht angesprochener Einflussparameter ist die **Reifenbreite**. Diese bestimmt bei sonst konstanten Randbedingungen (Reifengröße, Reifeninnendruck, Radlast) die Größe des Reifenlatsch. Durch breitere Reifen verringert sich die Flächenpressung in der Reifenaufstandsfläche. Dies führt gemäß Gummireibungstheorie, siehe **Kapitel 2.1.1**, zu größeren Reibwerten [7]. Um eine gleichmäßige Flächenpressungsverteilung zu erreichen bedarf es eines sehr steifen Karkassenaufbaus.

Durch die hohe Längs- und Quersteifigkeit des Reifens nimmt der Deformationsschlupf ab und es ergibt sich ein steiler Kraftanstieg. Dies bewirkt, verbunden mit einem geringeren Höhe/Breite-Verhältnis, eine bessere Lenkpräzision [11].

Auf nasser Fahrbahn kehren sich die Vorteile des breiteren Reifens teilweise um, siehe **Abbildung 23**: Bei hohen Geschwindigkeiten und geringer Wasserfilmtiefe erreicht ein moderner Breitreifen durch spezielle laufrichtungsgebundene Profilierung noch sehr hohe Kräfte, die über denen schmalerer Reifen liegen [38]. Erhöht sich jedoch die Wasserfilmdicke, so reichen die Kanäle und die Flächenpressung nicht aus, das Wasser aus der Reifenaufstandsfläche zu verdrängen. Dadurch erreichen breitere Reifen bei diesen Verhältnissen geringere Längskräfte.

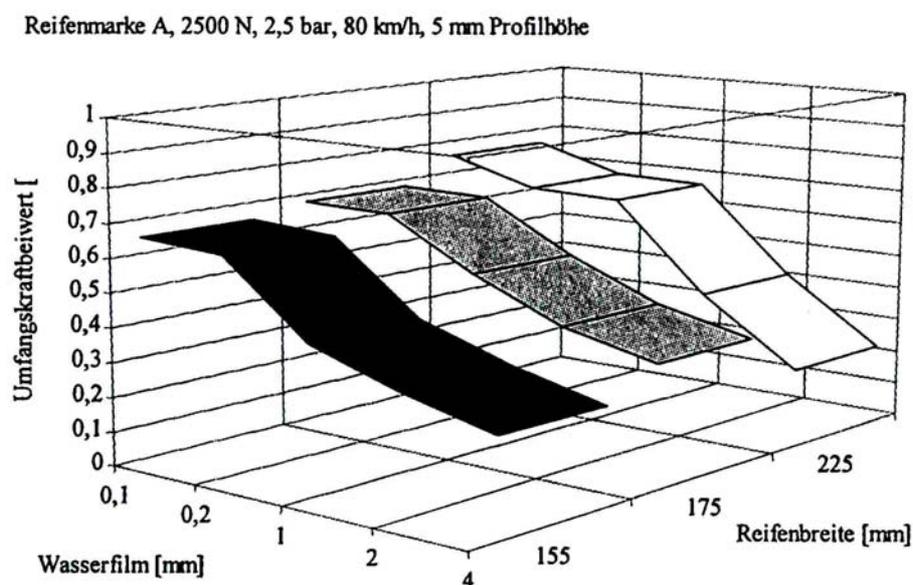


Abbildung 23: Einfluss der Reifenbreite auf die maximale Längskraft [38]
Influence of tyre width on maximum longitudinal force

2.1.10 Fazit und Bedeutung für die weitere Vorgehensweise

Für den Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn zeichnen eine Vielzahl von Einflussparametern verantwortlich. Eine Gewichtung bzw. Rangfolge der Bedeutung dieser fällt schwer, zumal eine starke Interaktion der Einflussgrößen untereinander zu beobachten ist. Auch unterscheidet sich die Bedeutung je nachdem aus welchem Blickwinkel die einzelnen Faktoren betrachtet werden. So hat ein Reifenentwickler seinen Fokus mehr auf Mischung und Profilgestaltung, und weniger auf der Fahrbahntextur. Ein Fahrbahnforscher dagegen die Mikro- und Makrotextur als die entscheidende Komponente ansieht.

Betrachtet man die verschiedenen Quellen, die zur Beschreibung der o.g. Einflussgrößen herangezogen wurden, u.a. [4, 5, 6, 7, 33, 35, 37, 38, 39, 49, 57, 102, 124, 128, 129, 130], so werden hinsichtlich der Untersuchungshäufigkeit / Forschungsbedarf und der bemessenen Bedeutung folgende Einflussparameter als wichtig hervorgehoben:

- Fahrbahnnässe, Aquaplaning, Wasserfilmtiefe
- Makrotextur der Fahrbahn
- Geschwindigkeit
- Profilgeometrie / Profiltiefe
- Schnee und Eis
- Schlupf
- Mikrotextur
- Reifeninnendruck
- Gleiten (100% Schlupf)
- Radlast

Um zu entscheiden, welche dieser Parameter in den weiteren Untersuchungen näher betrachtet und anschließend in einem Reibwertmodell berücksichtigt werden sollen, werden folgende Überlegungen angestellt: Zunächst muss der gewünschte Einsatzbereich des Modells definiert werden. In dieser Arbeit wird eine Beschreibung der Reifen-Fahrbahn-Interaktion unter Verwendung von Sommerreifen angestrebt. Dies bedeutet, dass Einflussgrößen wie Schnee und Eis keine Verwendung in den weiteren Untersuchungen finden.

Ein weiterer Parameter, der während der Messungen innerhalb dieser Arbeit zwar überprüft, jedoch nicht variiert wird, ist der Reifeninnendruck. Dieser ist zwar, siehe Kapitel 2.1.8, von großer Bedeutung für die Fahrsicherheit, den Reifenverschleiß und den Rollwiderstand, jedoch wird für jedes Fahrzeug, den angestrebten Geschwindigkeitsbereich und den Beladungszustand ein Reifendruck empfohlen. Im Bereich dieses Sollluftdrucks ($\pm 0,2\text{bar}$) ergab die Literaturrecherche keinen wesentlichen Einfluß auf den Reibwert. Daher wird der Luftdruck nicht als zu variierender Einflussparameter verwendet.

Des Weiteren wird vorausgesetzt, dass bei aktuellen und erst recht bei zukünftigen Fahrzeugregelsystemen (ABS, ASR, ESP, usw.) der Gleitreibwert stark an Bedeutung verliert und höchstens noch zur Beurteilung von Griffigkeiten (Fahrbahnen, Gummiprüfen u. ä.) herangezogen wird. Aus diesem Grund wird auch das Gleiten nicht Bestandteil von Untersuchungen mit realen Fahrzeugreifen.

Damit ergibt sich eine Anzahl von 7 Parametern, deren Einflüsse auf den Maximalreibwert in den Untersuchungen dieser Arbeit erfasst und quantifiziert werden müssen.

2.2 Reibwarterkennung

Bedingt durch die zunehmende Verbreitung von Fahrerassistenz- und Fahrdynamikregelsystemen im Fahrzeug ergibt sich der Wunsch, den Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn zu kennen. Dies ergibt Möglichkeiten zur Fahrerwarnung, zur selbständigen Einleitung von Aktionen (z.B. Verringerung der Geschwindigkeit, Vorkonditionierung einer Bremse u.a.) oder einer geregelten Bremsung im Kraftschlussmaximum. Ein (erster) großer Schritt zur Verwirklichung dieses Wunsches wurde innerhalb des Forschungsprojektes PROMETHEUS getan: An verschiedenen Forschungseinrichtungen in Deutschland wurden in enger Zusammenarbeit mit der Automobilindustrie Möglichkeiten erdacht, eine Reibwarterkennung im fahrenden Fahrzeug zu realisieren. Die verschiedenen Ansätze hierzu lassen sich nach [33] aufgliedern in Systeme zur Erfassung und Beschreibung der Effekte, die eine Reibwertänderung am Gesamtfahrzeug, am Rad oder im Reifenlatsch hervorruft, und in Systeme, die die Einflussparameter erfassen und daraus das Kraftschlusspotential ableiten, siehe **Abbildung 24**.

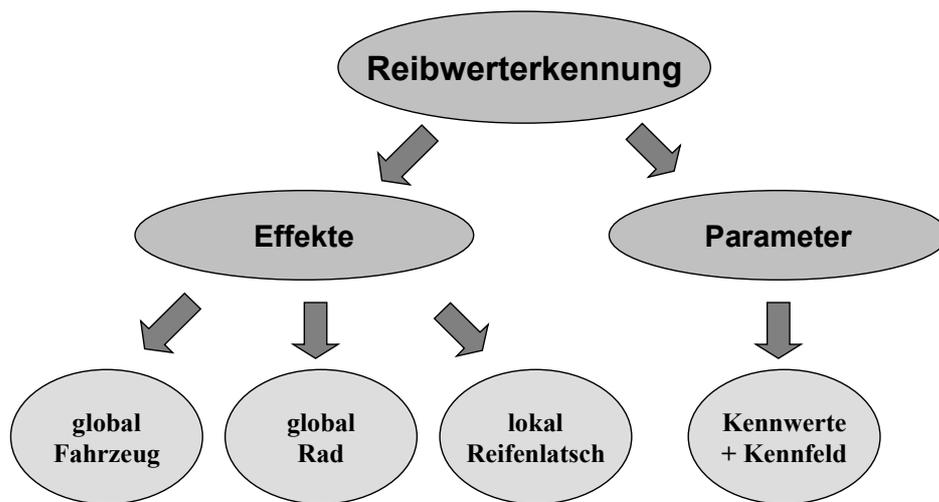


Abbildung 24: Einteilung der Reibwerterkennungssysteme nach [33]
Division of friction prediction systems

Im folgenden sollen nun kurz die verschiedenen Ansätze erläutert werden.

2.2.1 Globale Effekte am Fahrzeug

Um das Kraftschlusspotential eines fahrenden Fahrzeugs in Längs- und Querrichtung zu bestimmen, wurde von [54] ein kennfeldgestütztes onlinefähiges Reibwertvorhersagesystem entwickelt. Dieses prognostiziert durch Kenntnis des Fahrbahnzustands und der Fahrgeschwindigkeit den maximalen im Reifenlatsch wirkenden Längsreibwert. Hierbei wird zunächst eine Radlast von 4000N vorausgesetzt. Unter Verwendung verschiedener experimentell ermittelter Berechnungsalgorithmen, die für jeden Reifen und jedes Fahrzeug neu bestimmt werden müssen, wird anschließend auf die maximalen Längs- und Seitenkräfte unter Berücksichtigung der tatsächlichen (stationären) Radlast geschlossen, siehe **Abbildung 25**. Zuletzt erfolgt die Berechnung des Kraftschlusspotentials des Gesamtfahrzeugs.

Um eine Prognose des Kraftschlusspotentials zu erhalten, ist es notwendig, die Parameter zur Berechnung des Kraftschlusspotentials und dessen Ausnutzung hinreichend genau zu bestimmen. Berücksichtigt werden hierbei: Fahrbahnzustand, Fahrgeschwindigkeit, Längs- und Querbeschleunigung, Gierwinkelgeschwindigkeit und Lenkradwinkel. Die statischen Radlasten werden vorgegeben und der korrekte Reifeninnendruck eingestellt. Die Profiltiefe beträgt stets mehr als 80% des Neuzustands.

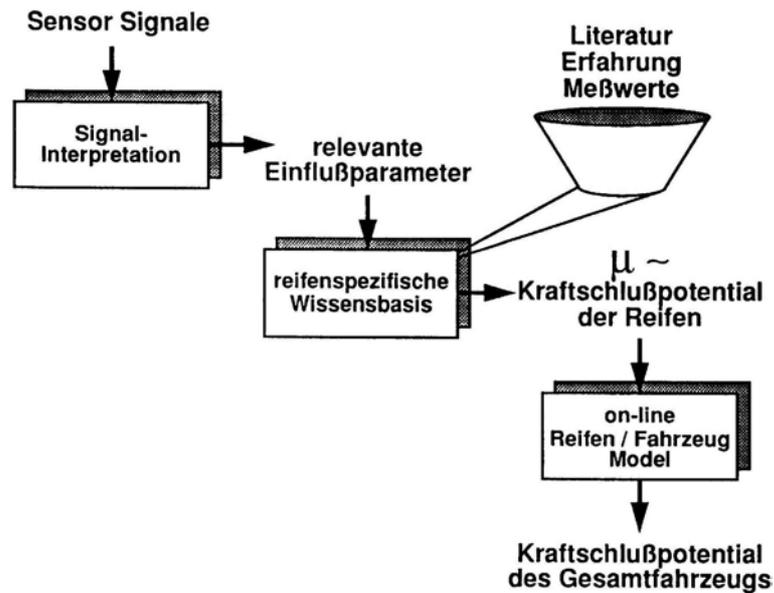


Abbildung 25: Funktionschema des Systems [55]
Schematic system design

Die Erfassung von Fahrbahnnässe und Makrorauigkeit erfolgt durch Frequenzanalyse der Körperschallsignale mehrerer Beschleunigungsaufnehmer in den Radkästen. Die aufgezeichneten Spektren im Frequenzbereich von 2,5 bis 4,5 kHz ermöglichen die trocken/nass Erkennung, der Frequenzbereich von 70 bis 120 Hz beinhaltet die Information bezüglich der Fahrbahnmakrorauigkeit.

Eine Erkennung von Fahrbahnglätte erfolgt durch Auswertung der Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Charakteristik. Fällt die Schräglaufsteifigkeit unter einen definierten Grenzwert ab, so wird vom System Winterglätte erkannt.

Ein weiteres System, welches die Effekte am Gesamtfahrzeug nutzt, um das Reibwertpotential zu bestimmen, wurde von [123] vorgestellt. Das System beruht auf der Annahme, dass das Kraftschlusspotential in Längs- und Querrichtung durch den Gradienten der Längsreibwert-Schlupf- bzw. Querreibwert-Schräglaufwinkel-Kurve in Ursprungsnähe vorausgesagt werden kann (siehe auch **Kapitel 2.2.2**).

Grundlage hierfür ist die Messung realer μ -s- und μ - α -Kurven im Fahrzeug unter Verwendung einer Kraftmessfelge. Durch diese Messungen sollen alle späteren Einsatzbereiche des Systems abgedeckt werden. Die verschiedenen Kurven werden nun durch Division ihres jeweiligen Maximalwerts normiert, wodurch sich der Ausnutzungsgrad μ/μ_{\max} ergibt. Durch Mittelung der Ausnutzungskurven erhält man ein für sämtliche Fahrbahnzustände gültiges vereinfachtes Reifen- bzw. Reibwertmodell.

Um nun den aktuellen Betriebspunkt des Reifens (Ausnutzungsgrad für Längs- und Querrichtung) in diesem Modell feststellen zu können, müssen für jedes Rad sehr

Reibwerterkennung

präzise Schlupf und Schräglaufwinkel bestimmt werden. Das Messfahrzeug wurde daher mit folgenden Sensoren ausgerüstet: Correvit zur Bestimmung der Längs- und Quergeschwindigkeit, Beschleunigungssensoren für Längs- und Querrichtung, Lenkradwinkelsensor, Giergeschwindigkeitssensor, Bremsdrucksensoren und Raddrehzahlensensoren. Durch die Kenntnis der statischen Radlast und der Schwerpunktlage, sowie durch Messung der o.g. Größen werden die Einzelradlasten und -beschleunigungen ermittelt. Damit ist es unter Verwendung des beschriebenen Reifenmodells möglich, die Maximalreibungswerte der einzelnen Räder und des Gesamtfahrzeugs zu ermitteln, siehe **Abbildung 26**.

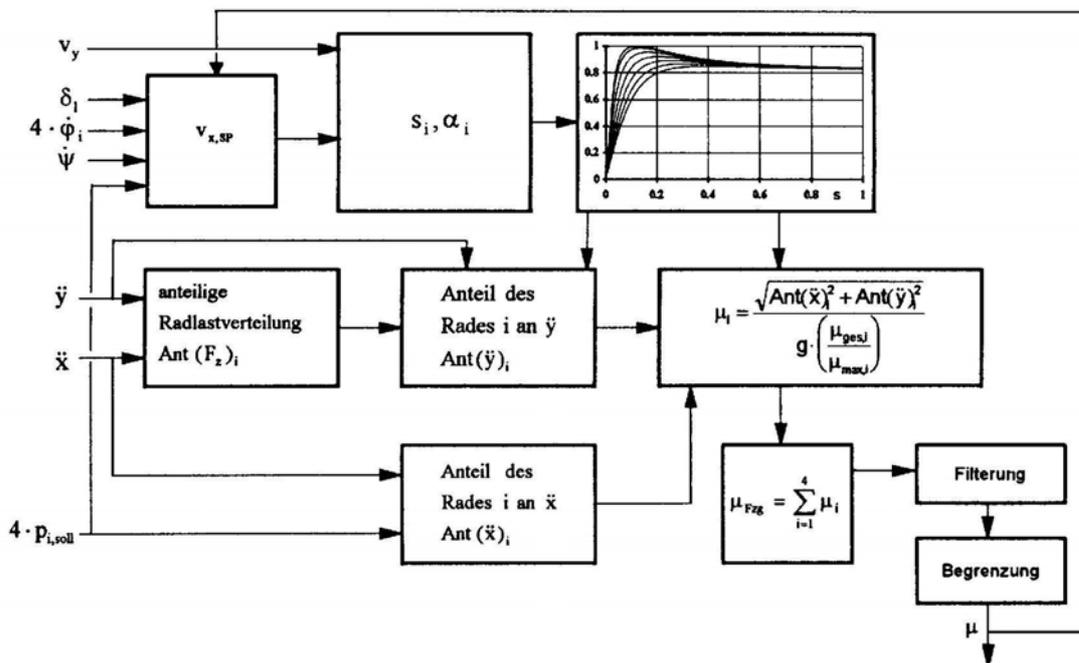


Abbildung 26: Ablauf der Reibwerterkennung [123]
Flow of friction prediction

Durch die Unterschiede zwischen den realen und gemittelten Kennlinien des Modells ergeben sich Fehler, die vor allem bei geringen Kraftschlussausnutzungen Größen bis zu 40% annehmen können. Bei hoher Kraftschlussausnutzung, d. h. in der Nähe des Regelbereichs von Fahrdynamiksystemen reduziert sich dieser Fehler jedoch deutlich [123]. Die Gültigkeit des Systems beschränkt sich stets auf den im Reifenmodell abgelegten Reifendatensatz und ist daher nicht übertragbar.

2.2.2 Globale Effekte am Rad

Das globale Verhalten eines Reifens bei Änderung der im Reifenlatsch wirkenden Kräfte bzw. Kraftschlussverhältnisse kann durch Messung der Effekte zu einer Reibwerterkennung genutzt werden.

Ein Ansatz, den Effekt eines Reibwertsprungs auf die Reibwert-Schlupf-Kennlinie zu nutzen, wurde von [30] und [59] beschrieben. Das Prinzip beruht darauf, dass die Reibwert-Schlupf-Kurve im Bereich von 0 bis ca.1% Schlupf einen linearen Verlauf aufweist. Die Steigung in diesem sogenannten „**Mikroschlupfbereich**“ unterscheidet sich zwar beim Übergang von trockener zu nasser Fahrbahn nicht (noch kein Aquaplaning). Jedoch ergeben sich signifikante Unterschiede der Gradienten beim Vergleich mit einer winterglatten Fahrbahn ($\mu_{\max} < 0,4$), siehe **Abbildung 27**.

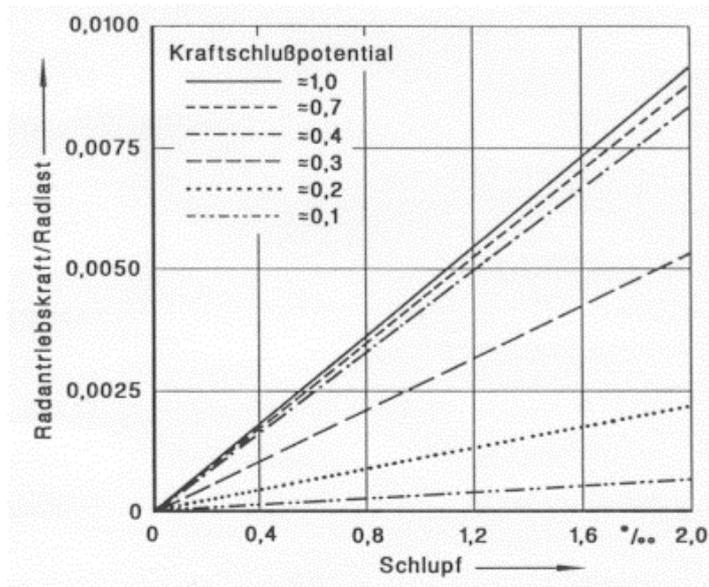


Abbildung 27: Mikroschlupfkennfeld [30]
Micro slip map

Um diesen „Mikrobereich“ der Reibwert-Schlupf-Kurve erfassen zu können, ist vor allem eine hochauflösende Erfassung des aktuellen Schlupfzustands nötig. Dies geschieht durch Nutzung der ABS-Raddrehzahlensignale, die an den angetriebenen und freirollenden Rädern erfasst und mittels eines geeigneten Algorithmus‘ ausgewertet werden.

Des weiteren wird auf die Antriebskräfte durch Nutzung von Signalen der Motorsteuerung geschlossen. Dadurch, dass dieses System von der hochgenauen Bestimmung einer Größe abhängt, die nicht direkt gemessen werden kann, ist es naturgemäß anfällig für Störungen. Aus diesem Grund müssen Parameter, die den Reifenabrollumfang beeinflussen (Luftdruck, Temperatur, usw.) erfasst und das System mittels Autokalibrierung aktualisiert werden. Da die Veränderung der Kennliniensteigung des Reifens leider nicht proportional zu dem vorhandenen Kraftschlußpotential ist, ergibt sich keine stufenlose Prognose der Maximalreiwerts. Jedoch bietet das System die Möglichkeit, durch Kenntnis des Luftdrucks eines Reifens und durch

Reibwerterkennung

Messung der o.g. Größen auf die Drücke der anderen Reifen zu schließen und eine Überwachung durchzuführen.

Eine weitere Möglichkeit zur Nutzung von Effekten, die global am Rad auftreten, stellt der **Seitenwandtorsionssensor** dar [14]. Dieser beruht darauf, dass der Reifen das weichste Element (die weichste Feder) zwischen den im Reifenlatsch wirkenden Kräften und der Radaufhängung ist. Daher treten dort auch die größten Verformungen auf. Um diesen Sachverhalt zu nutzen, werden radial verlaufende magnetische Felder auf bzw. in der Seitenwand eines Reifens aufgebracht. Diese Felder werden bei Rotation des Reifens durch zwei magneto-resistive Sensoren abgetastet. Die Sensoren, die starr an der Radaufhängung befestigt sind, werden dabei so positioniert, dass der innere die Seitenwand in der Nähe der Felge und der äußere die Seitenwand in der Nähe des Laufstreifens erfasst.

Rollt der Reifen kraftfrei ab, so stellt sich am Ort der Sensoren eine gleichmäßige Deformation infolge der statischen Radlast ein, siehe **Abbildung 28**. Diese äußert sich darin, dass an der Felge keine Verschiebung auftritt während in der Nähe des Laufstreifens eine messbare Verschiebung der Seitenwand nach oben zu beobachten ist.

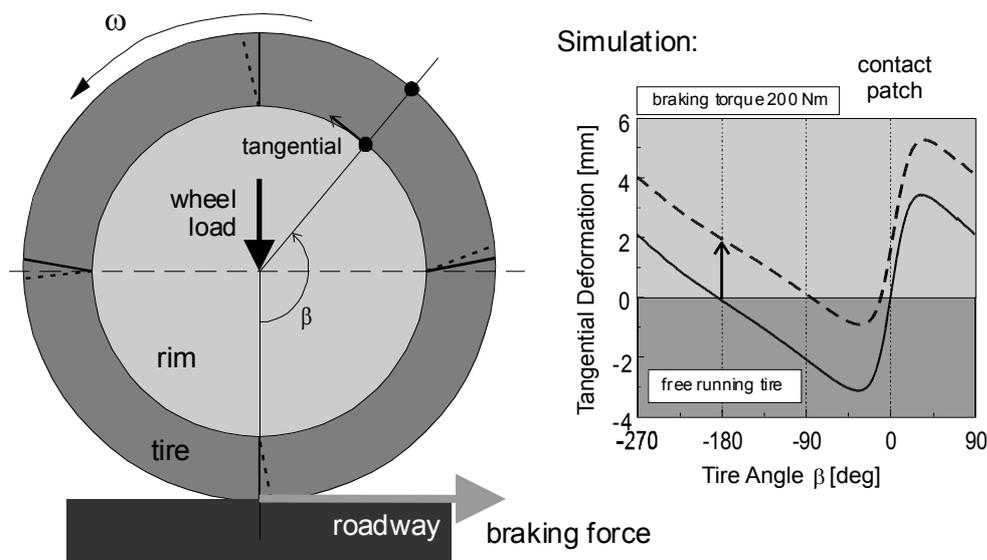


Abbildung 28: Reifendeformation im freirollenden und gebremsten Zustand [14]
Deformation of tyre while free rolling and braking

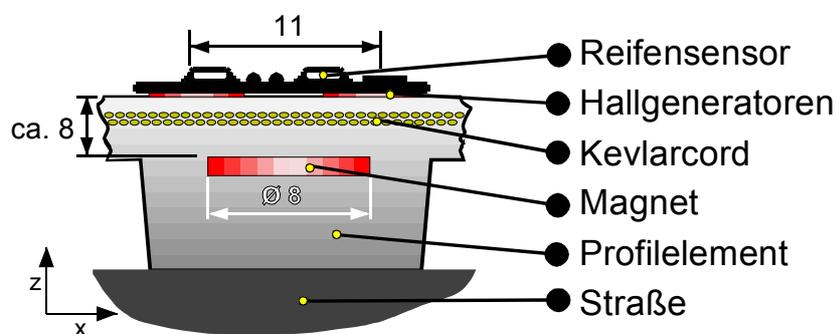
Kommt es infolge einer Brems- oder Antriebskraft zu einer Überlagerung der statischen Effekte, so äußert sich dies in einer stärkeren Deformation der Seitenwand in tangentialer Richtung. Erfasst wird die Verformung durch Messung der Zeitdifferenz, die beim Vorbeilaufen eines magnetischen Seitenwandelements an den Sensoren besteht. Je größer die Zeitdifferenz zwischen felgen- und laufflächennahem Element, um so stärker die Seitenwandtorsion.

Durch Gegenüberstellung von tangentialer Verformung und Kraft kann auf die im Reifenlatsch wirkenden Längskräfte geschlossen werden. Um auch die Seitenkräfte zu erfassen, wird gleichzeitig der Abstand der Seitenwand von den magnetoresistiven Sensoren erfasst.

Die Schwierigkeiten, die bei diesem System bislang noch zu lösen sind, liegen u.a. in der Robustheit der Anordnung gegenüber Störungen und der echtzeitfähigen Signalverarbeitung.

2.2.3 Lokale Effekte am Reifen

Da die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn an den Kontaktstellen der Profilelemente mit den Texturkörnern stattfindet, ist es nur logisch zu versuchen, möglichst nah an diese Berührungszonen zu gelangen. Eine Möglichkeit der Realisierung liegt in dem Darmstädter Reifensensor [10], [41], [85], [102], [115] und [117]. Dieser wurde am Fachgebiet Fahrzeugtechnik entwickelt und mittlerweile existieren vier Generationen. Der Aufbau des Sensors besteht aus einem Permanentmagneten, der in einem Profilelement des Laufstreifens sitzt und aus einer Platine (bestehend aus 4 bis 5 Hallensoren), die je nach Reifenaufbau entweder an der Innenseite des Reifengürtels oder ebenfalls in einem Profilelement untergebracht ist, siehe **Abbildung 29**.



Reifensensor 2. Generation

Abbildung 29: Darmstädter Reifensensor 2. Generation [41]
Darmstadt tyre sensor 2nd generation

Kommt es nun zu einer Verformung des Profilelements, so bewirkt dies eine Verschiebung des Magneten relativ zur Platine. Dies hat eine Veränderung der Flussdichte an den Hallgeneratoren und damit eine Änderung der Ausgangssignale zur Folge.

Ziel des Sensors ist es, die Verformung eines Profilelements im Reifenlatsch beim Rollen zu erfassen. Dazu werden die Auswirkungen von äußeren Kräften auf die Reifensensorsignale untersucht, Kennwerte gebildet und diese den Kräften zugeordnet.

Reibwerterkennung

Hierdurch ist es möglich, auf die lokalen Kraftverhältnisse zwischen Reifenelement und Fahrbahn zu schließen, lokales Gleiten zu detektieren und eine Reibwerterkennung zu realisieren.

Der Verlauf des x-Signals zur Beschreibung der Längskräfte ist in **Abbildung 30** dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die Verringerung des Verformungssignals in der Einlaufzone (linke Signalspitze) und das stärker negative Signal in der Auslaufzone (rechte Signalspitze) mit zunehmender Bremskraft. Des weiteren ist es möglich (hier nicht dargestellt), aus der Veränderung des Signalgradienten zwischen Ein- und Auslaufzone einen Rückschluss auf das Kraftschlusspotential zu erhalten.

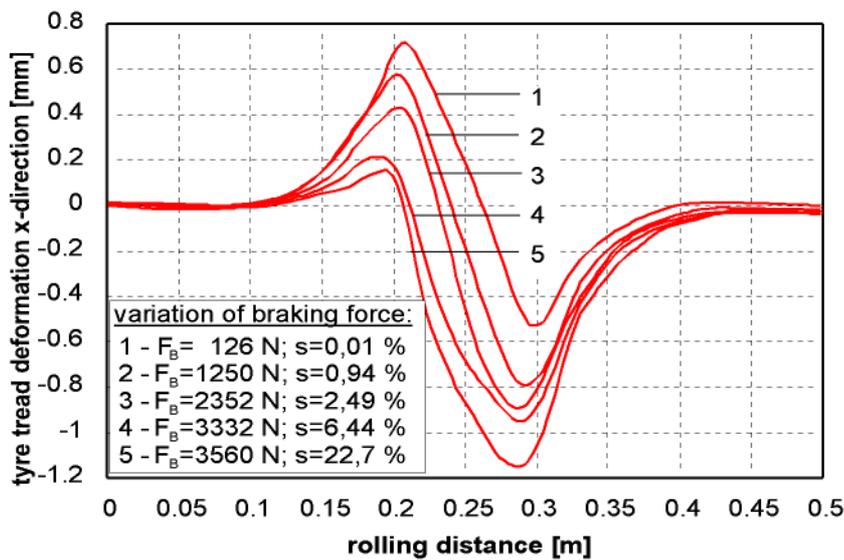


Abbildung 30: x-Signal des Reifensensor 2. Generation bei Variation der Umfangskraft [40]
x-signal of tyre sensor 2nd generation under variation of longitudinal force

Eine neuere Sensorentwicklung basiert auf dem Prinzip der Oberflächenwelle. Diese wird auf einem Piezokristall durch Anlegen einer Wechselspannung an einem Interdigitalwandler erzeugt. Die Welle breitet sich auf dem Kristall aus und wird an mehreren Reflektoren zurückgeworfen. Die Reflexionen wiederum erzeugen am Wandler eine Wechselspannung. Da das Piezoelement in einem Reifenprofilement untergebracht ist, unterliegt es Verformungen. Diese bewirken eine Änderung der Wellenlaufzeit auf dem Kristall. Durch Erfassung dieser können Aussagen über die im Reifenlatsch wirkenden Kräfte getroffen werden [116].

2.2.4 Parametergestütztes System

Um eine Reibwerterkennung bei allen Fahrzuständen zu ermöglichen, d.h. auch in Bereichen geringer Kraftschlussinanspruchnahme und um den Verzug zwischen Eingangsgröße und messbarem Effekt (am Rad oder Gesamtfahrzeug) zu umgehen, wurde von [33] ein parametergestütztes System entwickelt. Dieses Reibwerterkennungssystem basiert auf der optischen Erfassung der Fahrbahntextur und der Bestimmung des Nässezustands der Fahrbahnoberfläche, siehe **Abbildung 31**. Der mittels Lasersensor gewonnene Texturschnitt wird bezüglich seiner Makro- und Megatextur analysiert. Dadurch lassen sich Oberflächenkennwerte bilden, die Rückschlüsse auf die wirkenden Kontaktverhältnisse zwischen Reifen und Fahrbahn ermöglichen. Diese Kennwerte sind im einzelnen: Megatextur (nur zur Erkennung inhomogener Fahrbahnoberflächen), Makrotextur, Profiltraganteil, Mittenrauhentiefe im Kontaktbereich, Entwässerungslänge, Drainagevermögen und Quadratische Flankensumme (bezogene Höhe der im Kontaktbereich liegenden Profilflanken). Die Mikrotextur liefert keinen Beitrag. Mit Hilfe dieser Kennwerte werden innerhalb des Modellblocks die Maximal- und Gleitreibwerte für trockene und nasse Fahrbahn berechnet und damit ein Kennfeld aufgespannt. Durch Kenntnis des aktuellen Nässezustands der Fahrbahn ist es nun möglich, die potentiellen Gleit- und Maximalreibwerte aus dem Kennfeld abzulesen, wobei Reifenparameter und Fahrzeugparameter, wie z.B. Radlast und Profiltiefe als konstant angenommen werden.

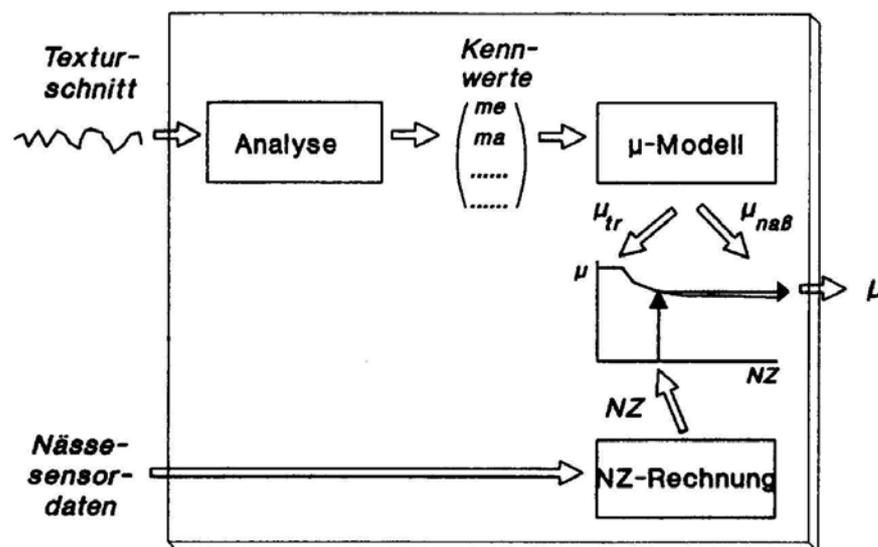


Abbildung 31: Reibwertprognosesystem [33]
Friction calculation model

2.2.5 Fazit

Die Vielzahl der geschilderten Ansätze und Systeme zeigt die Bedeutung der Thematik für die Fahrsicherheit. Erstaunlich ist, dass bei den Überlegungen oftmals unterschiedliche Einflussparameter als Haupteinflussgrößen angesehen werden: Liegt bei [33] ein Fokus auf den Textureigenschaften, werden diese bei [54] nur in Form der Makrotextur berücksichtigt und bei [123] ist dieser Parameter nur implizit in dem Reifenmodell vorhanden. Ebenfalls große Unterschiede betreffen die Philosophie der Systeme selbst. So werden auf Basis gemessener Kennfelder sowohl Einflussparameter [33], als auch Effekte [30, 59, 123], als auch eine Kombination aus beidem [55] genutzt, um den aktuellen Betriebspunkt des Reifens zu bestimmen. Das Problem sämtlicher dieser Modelle liegt allerdings darin, dass zu Gunsten einer höheren Vorhersagegenauigkeit (oder eines geringeren Aufwands) eine Beschränkung des Einsatzbereiches vorgenommen wurde. D.h. die Systeme wurden für spezielle Fahrbahnen und/oder Betriebszustände optimiert. Verlässt das Fahrzeug bzw. der Reifen den Gültigkeitsbereich (z.B. durch Profilverschleiss, Variation von Radlast, Geschwindigkeit oder Wasserfilmtiefe) so kann auch keine gesicherte Reibwertprognose mehr erfolgen.

Im Gegensatz zu diesen Systemen bieten Sensoren im Reifen (Seitenwand oder Profilelement) die Möglichkeit, unabhängig vom Fahrbahnzustand oder –belag eine Bestimmung der wirkenden Kräfte durchzuführen und zumindest in Grenzen eine Prognose des Kraftschlusspotentials zu geben.

Allen Modellen gleich ist bislang noch das Fehlen einer vorausschauenden Prognose des Reibwerts. D. h. es ist ausschließlich möglich, den Reibwert am Ort des Fahrzeugs zu bestimmen und diese Information dem Fahrer oder einem Assistenzsystem zur Verfügung zu stellen. Damit ist es möglich, in kritischen Situationen schneller und besser angepasst als der Fahrer zu reagieren. Das Vermeiden einer solchen kritischen Situation ist jedoch mit diesen Systemen nicht möglich (Ausnahme: Sensierung von beginnendem Aquaplaning mittels Reifensensor).

Basierend auf diesen Erkenntnissen ergibt sich die logische Forderung nach einem Reibwertvorhersagesystem, welches sämtliche signifikanten Einflussgrößen auf den Reibwert berücksichtigt, siehe **Kapitel 2.1.10** und dadurch einen großen Gültigkeitsbereich ermöglicht. Dies kann nur durch eine Modellbildung (empirisch oder physikalisch) und geeignete Sensorik erreicht werden. Desweiteren muss eine vorausschauende Kraftschlussprognose zur Verhinderung von kritischen Situationen angestrebt werden. Eine mögliche Vorgehensweise zum Aufbau eines solchen Systems soll im folgenden beschrieben werden.

3 Werkzeuge, Methodik und Experimente

Um die in **Kapitel 2.1.10** aufgelisteten Haupteinflussgrößen und deren Auswirkungen auf die Reifen-Fahrbahn-Reibung quantifizieren zu können, ist es nötig, sowohl geeignete Messsysteme als auch geeignete Versuchsstrecken zur Verfügung zu haben. Da ein Großteil der Reibwertmessungen innerhalb des europäischen Forschungsprojekts VERT stattfand, ergab sich durch die unterschiedlichen Testgelände eine große Variationsbreite an Fahrbahntexturen. Die *fzd*-Messungen wurden auf dem Testgelände des August-Euler-Flughafens in Griesheim (nahe Darmstadt), siehe **Abbildung 32**, und auf den Pirelli-Teststrecken in Vizzola (nördlich von Mailand) und Michelstadt (Odenwald) durchgeführt.

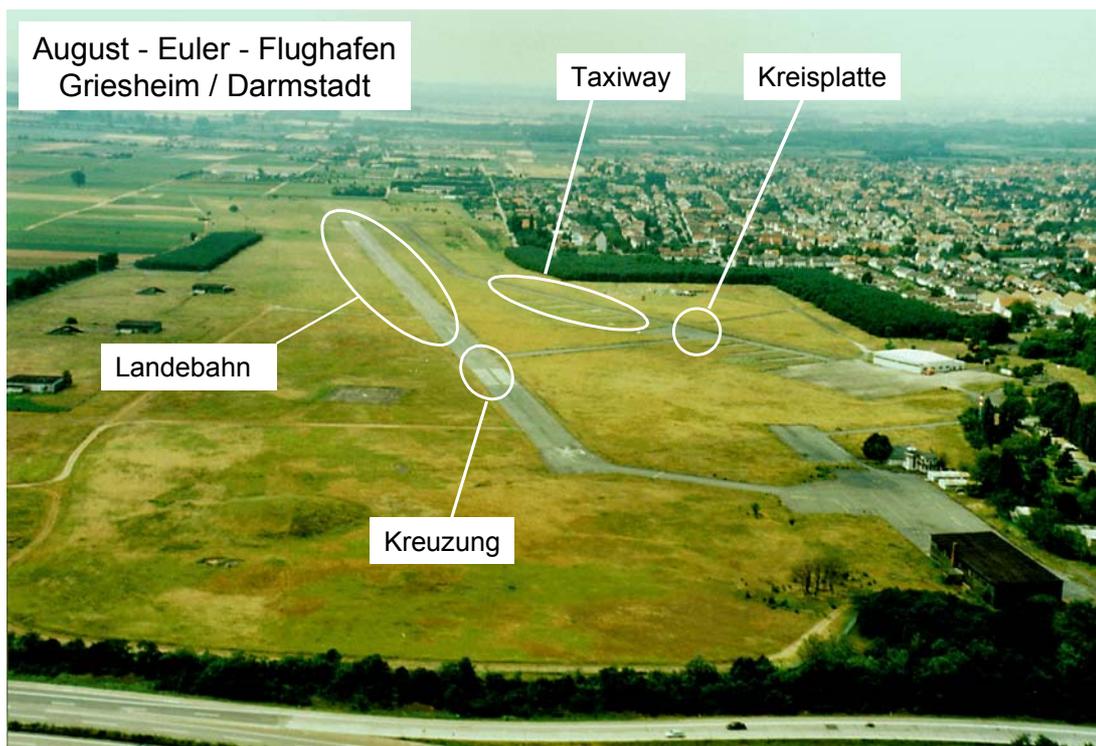


Abbildung 32: TU Darmstadt Testgelände Griesheim
TU Darmstadt testing area Griesheim

Die Streckenabschnitte des Flughafens Griesheim, die für die verschiedenen Untersuchungen genutzt wurden, sind: Landebahn (Länge 1000m. Breite 20m), Taxiway (Länge 465m, Breite 10m) und Kreisplatte (mittlerer Radius 15m). Durch die teilweise stark unterschiedlichen Fahrbahntexturen konnte der Einfluss dieser untersucht werden.

Reifenmessanhänger PETRA

Da die Teststrecke in Griesheim über keine stationäre Bewässerungseinrichtung verfügt, erfolgte dort die Variation des Fahrbahnzustands mit Hilfe eines UNIMOGs mit Bewässerungssystem, siehe **Abbildung 33**. Die Wasserfilmdicke wurde bei jedem Versuch mitgemessen.



Abbildung 33: Eingesetzte Fahrzeuge
Vehicles used for experiments

3.1 Reifenmessanhänger PETRA

Der Reifenmessanhänger PETRA (**P**ersonenwagen-**R**eifen-**T**raktion-Messanhänger) ist seit 1997 bei *fzd* im Einsatz. Das Messsystem basiert auf den Grundlagen der Vorgängerversion [33, 102] und wurde von [7] aufgebaut, siehe **Abbildung 34**. Seitdem dient es zu Reibwertwertmessungen auf realen Fahrbahnen und wurde ständig weiterentwickelt.

Das Messrad dieses einachsigen Anhängers ist in Fahrtrichtung links angebracht. Die Radaufhängung besteht aus einem Doppelquerlenker, um Auswirkungen von Radein- und -ausfederbewegungen auf den Radsturz möglichst gering zu halten. Das Abbremsen des Messrades erfolgt über eine hydraulische Axialkolbenpumpe. Diese wird über ein 6-Gang-Schaltgetriebe, welches wiederum über eine Gelenkwelle mit dem Messrad verbunden ist, angetrieben. Das Hydrauliköl fließt drucklos aus einem mitgeführten Vorratstank in die Pumpe. Von dort wird es gegen eine verstellbare Drossel gefördert und fließt weiter über einen Ölfilter und einen Kühler zurück in den Hydrauliktank. Durch Verstellen des Fördervolumens und/oder des Drosselquerschnitts wird, in Abhängigkeit von der Pumpendrehzahl, die Gegenkraft in der Pumpe und damit das Bremsmoment am Messrad verändert (hydraulische Verspannung) [77].

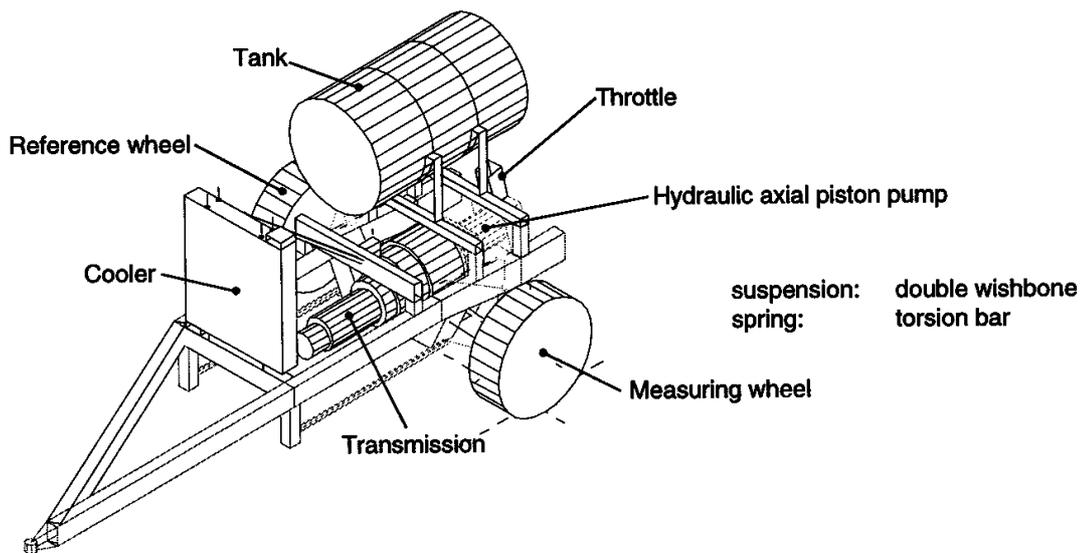


Abbildung 34: Schematischer Aufbau des Messsystems PETRA [7]
Schematic design of measuring system PETRA

Kommt es nun infolge eines zu großen Bremsmoments zu einer drohenden Radblockade, dann bewirkt die Verringerung der Radgeschwindigkeit eine Verringerung der Pumpendrehzahl. Hieraus resultiert eine Druckreduktion und damit eine Verringerung des Bremsmoments am Messrad. Mit diesem Prinzip ist es im Gegensatz zu herkömmlichen Scheibenbremsen möglich, den gesamten Bereich der Reibwert-Schlupf-Kurve abzufahren, ohne dass es im abfallenden Bereich der Kurve zu Instabilitäten oder einer Radblockade kommt.

Zur Aufnahme von Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennfeldern wurde der Messanhänger um eine Schräglaufwinkelverstellung erweitert. Diese ermöglicht eine unabhängige Verstellung von Mess- und Referenzrad. Damit kann der Bereich der Seitenkraft bis zum Erreichen ihres Maximums abgefahren werden. Gleichzeitig erfolgt über das Referenzrad eine Kompensation der Seitenkraft. Dadurch wird verhindert, dass der Messanhänger einen zu starken seitlichen Versatz erfährt.

Die Verstellung der Radlast erfolgt auf robuste Art und Weise, indem Zusatzgewichte auf der Messradseite aufgebracht werden.

Damit ergeben sich folgende Variationsmöglichkeiten:

Geschwindigkeit	max. 90km/h
Schlupf	0 - 100%
Schräglaufwinkel	+/- 10°

Reifenmessanhänger PETRA

Sturzwinkel	+/- 5°
Radlast	3400 – 6000N
Reifendimension	14 – 17 ^c , 175 – 225mm

Tabelle 1: Variationsmöglichkeiten des Reifenmessanhängers PETRA
Possible variations of tyre measuring trailer PETRA

3.1.1 Aufbau des Messsystems

Das Gesamtsystem PETRA besteht aus einem leistungsstarken Zugfahrzeug (AUDI V8, 3,6) und dem Messanhänger. Zur Erfassung der Haupteinflussgrößen und deren Auswirkungen auf die Kräfte im Reifenlatsch ist der Anhänger mit folgenden Sensoren ausgestattet:

Pos. Nr.	Sensor / Messglied	Genauigkeit
1	Kraftmessdose KMD U2 der Fa. HBM	+/- 0,2% (+/- 0,1%/10K)
2	6 Komponenten Kraftmessfelge MKMR der Fa. DaimlerChrysler	siehe Kap.3.1.2
3	Correxit – Sensor V2 der Fa. DATRON	+/- 0,5%
4	Drehzahlsensoren TRD-J-1000 der Fa. Pepperl & Fuchs	k. A.
5	Optische Wassertiefensensoren	siehe Kap.3.3
6	Beschleunigungsaufnehmer der Fa. HBM	+/- 2% (+/- 0,25%/10K)
7	Laserabstandssensoren LB-081 der Fa. Keyence	+/- 0,25%(+/-0,2%/10K)
8	Strahlungspyrometer TM-908	+/- 2%
9	Induktiver Wegaufnehmer W200 der Fa. HBM	+/- 0,4% (+/- 0,2%/10K)
10	Drucksensoren P11 der Fa. HBM	+/- 1% (+/- 0,5%/10K)
11	Temperatursensor THERM 2288-2 der Fa. Ahlborn	+/- 0,03%

Tabelle 2: Sensoren des PETRA Messsystems
Sensors of PETRA Measuring System

Der Messanhänger ist in **Abbildung 35** dargestellt.

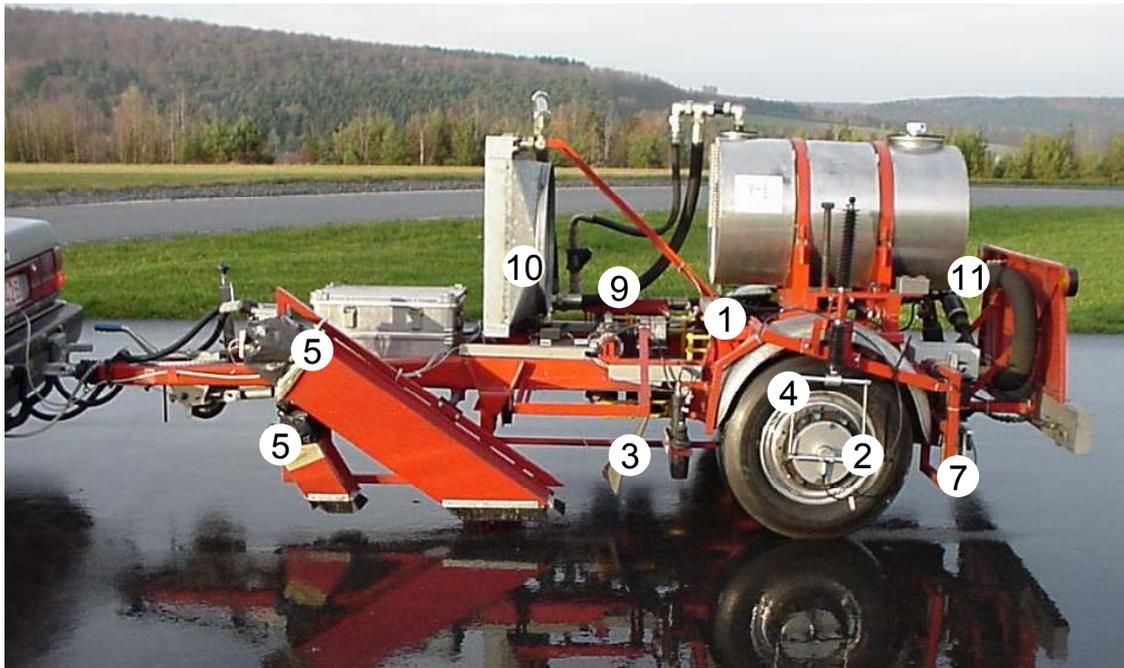


Abbildung 35: PETRA Messsystem
PETRA measuring system

In der Fahrspur vor dem Messrad sind die beiden Wassertiefensensoren (5) mit ihren Abschirmungen gegenüber Spritzwasser und Sonnenlicht zu erkennen.

Direkt vor dem Messrad (in diesem Fall ein ASTM-Reifen) ist der Correvit (3) am Radträger befestigt. Wird der Lenkwinkel verstellt, so bewegt sich der Sensor mit dem Rad und erfasst den Schräglaufwinkel. Die Winkelauflösung des Sensors, der einen Bereich von $\pm 40^\circ$ erfassen kann, wird vom Hersteller mit kleiner $0,5^\circ$ angegeben. Der Messfehler liegt bei maximal $\pm 0,5\%$, so dass ein Winkelfehler von maximal $\pm 0,04^\circ$ zu erwarten ist. Daneben ist noch der Einbau-Winkelfehler zwischen der Messrichtung des Sensors und der Bewegungsrichtung des Rades zu beachten. Dieser wurde mittels Kalibrierungsmessungen ermittelt und bei den Versuchen berücksichtigt.

Durch Vergleich der mittels des Correvit gemessenen Radträgergeschwindigkeit und der mittels des Drehzahlsensors (4) erfassten Radumfanggeschwindigkeit erhält man den Gesamtschlupf (Deformations- und Gleitschlupf) des Messrades.

Am Messrad befestigt, ist die Kraftmessfelge (2) zu erkennen. Die Messsignale des MKMR (**M**ehr**k**omponenten **M**ess**r**ad) werden von der internen Vorauswerteplatine mittels Telemetrie nach außen gesendet. Die Halterung vor dem Messrad dient der Befestigung der nichtrotierenden Felgenteile.

Der Radträger hinter dem Messrad dient zur Aufnahme zweier auf dem Triangulationsprinzip basierenden Lasersensoren (7). Diese erlauben durch Kenntnis des gegenseitigen Abstands und Messung der Distanz zum Boden die Berechnung des Sturzwinkels, siehe **Abbildung 36**:

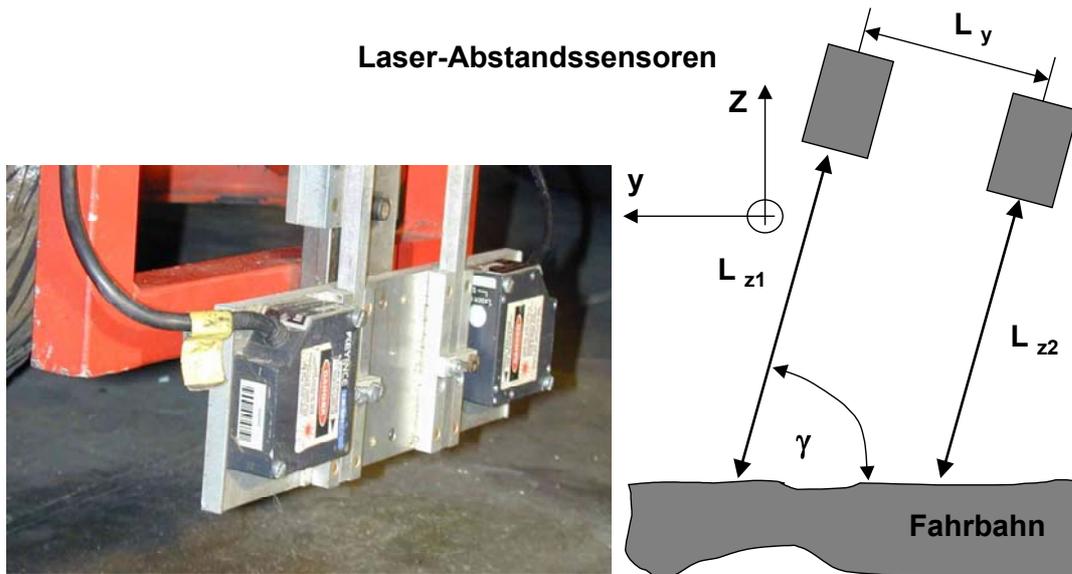


Abbildung 36: Lasersensoren zur Bestimmung des Sturzwinkels
Laser sensor for determination of chamber angle

Damit ergibt sich der Sturzwinkel zu:

$$\gamma = \arctan \frac{L_y}{L_{z2} - L_{z1}} \quad (12)$$

mit: L_y seitlicher Abstand der Lasersensoren
 L_{z1}, L_{z2} gemessener Abstand der Sensoren zur Fahrbahn

Wie bei jeder fahrbahnbezogenen Abstandsmessung muss allerdings berücksichtigt werden, dass Unebenheiten in Querrichtung und Löcher in der Oberfläche zu einer Verfälschung der Messung führen. Daher wurde bei der stationären Einstellung des Sturzwinkels auf inhomogenen Fahrbahnoberflächen ein planer, mattlackierter Metallstreifen eben auf die Fahrbahn gelegt und an mehreren Messstellen ein mittlerer Sturzwinkel ermittelt.

Die Erfassung des Bremsmoments mittels der KMD (1) ist in [7] ausführlich beschrieben und soll an dieser Stelle nur kurz angerissen werden: Die im Reifenlatsch wirkende Bremskraft stützt sich über die Gelenkwelle im Getriebe ab. Dieses ist am hinteren Ende drehbar um die y-Achse in Kugellagern gelagert. Um der Drehbewegung entgegenzuwirken, ist das Getriebe an dessen Vorderseite über eine Kraftmessdose am Rahmen befestigt. Durch Kenntnis des wirksamen Hebelarms kann von dem Kraftmessdosensignal unter Berücksichtigung der Systemreibung auf das Bremsmoment am Messrad geschlossen werden. Die vorhandene Reibung wurde zuvor in Versuchen ermittelt und als Korrekturfunktion bei der Signalauswertung berücksichtigt. Eine weitere Fehlerquelle bei der Verwendung der Kraftmessdose als alleinigem

Messinstrument liegt in dem Kraftnebenschluss, der durch die Hydraulikschläuche der Pumpen-Getriebe-Einheit entsteht. Um die Auswirkungen auf das Messsignal möglichst gering zu halten, wurden diese flexibel gestaltet und beweglich aufgehängt. Der Messfehler, der sich trotzdem ergibt, wurde von [7] untersucht und mit 0,1% angegeben.

Um von dem gemessenen Bremsmoment auf die im Reifenlatsch wirkende Bremskraft schließen zu können, ist die Kenntnis des wirksamen Radhalbmessers nötig. Dieser wurde auf zwei unterschiedliche Arten bestimmt: In einem ersten Ansatz wurde nach [102] der wirksame Radhalbmesser gleich dem dynamischen gesetzt. Dieser wurde im freirollenden Zustand jeweils in Abhängigkeit von Radlast, Reifeninnendruck, Profiltiefe, Fahrbahntextur, Wasserfilmtiefe und Geschwindigkeit ermittelt. Hierzu wurde die Drehzahl des Messrades mit der Längsgeschwindigkeit des Correvit verglichen und der Abrollumfang berechnet. Der Fehler, der sich hieraus ergibt, wurde von [102] mit 3% angegeben, d.h. für einen mittleren Radhalbmesser eines Reifens der Dimension 195/65 R15 von ca. 0,31m ergibt sich eine Abweichung von 9,3mm. Da dies eine erhebliche Fehlerquelle darstellt, wurde in einem zweiten Schritt die Kraftmessfelge (siehe **Kapitel 3.1.2**) als Referenzmesssystem eingesetzt und durch Division des gemessenen Bremsmoments durch die Bremskraft der wirksame Radhalbmesser ermittelt. Der maximale, vom Hersteller angegebene Fehler der Kraftmessfelge liegt bei 2%. Damit unterschieden sich die auf verschiedenen Arten ermittelten Radhalbmesser nie um mehr als 1,7mm (entspricht einem Gesamtfehler von 2,5%). Somit kann auch der wirksame Radhalbmesser, der bei Versuchen ohne Kraftmessfelge ermittelt wurde, als hinreichend genau betrachtet werden.

Die Messsignale der verschiedenen Sensoren werden über einen Kabelbaum an das Zugfahrzeug geleitet. Die Spannungsversorgung der Sensoren, der Verstellmotoren und der Axialkolbenpumpe erfolgt über einen zweiten Kabelbaum. Dieser Leistungskabelstrang ist räumlich getrennt von den Datenkabeln verlegt, um ein Einstreuen von Störsignalen zu verhindern. Des weiteren ist die Fahrzeugbatterie über einen manuellen Schalter von der Messbatterie getrennt. Dieser wird nur zum Laden der Messbatterie durch die Fahrzeuglichtmaschine geschlossen.

Im Kofferraum des Zugfahrzeugs werden die Kabel zu den Verstärkern der einzelnen Messsysteme geleitet und anschließend die Signale der Docking-Station, die als zentrale Messdatenerfassungseinheit dient, zugeführt, siehe **Abbildung 37**.

Die Messsignalerfassung erfolgt über eine Adwin-9 Karte (DSP Prozessormodul mit 40MHz) mit zusätzlicher analoger Erweiterung, so dass insgesamt 16 analoge Ein- und 16 digitale Ein- und Ausgangskanäle zur Verfügung stehen. Von der Docking-Station werden die Daten über eine PCMCIA-Schnittstelle an das Messnotebook im Fahrgastraum geleitet, siehe **Abbildung 38**.

Reifenmessanhänger PETRA

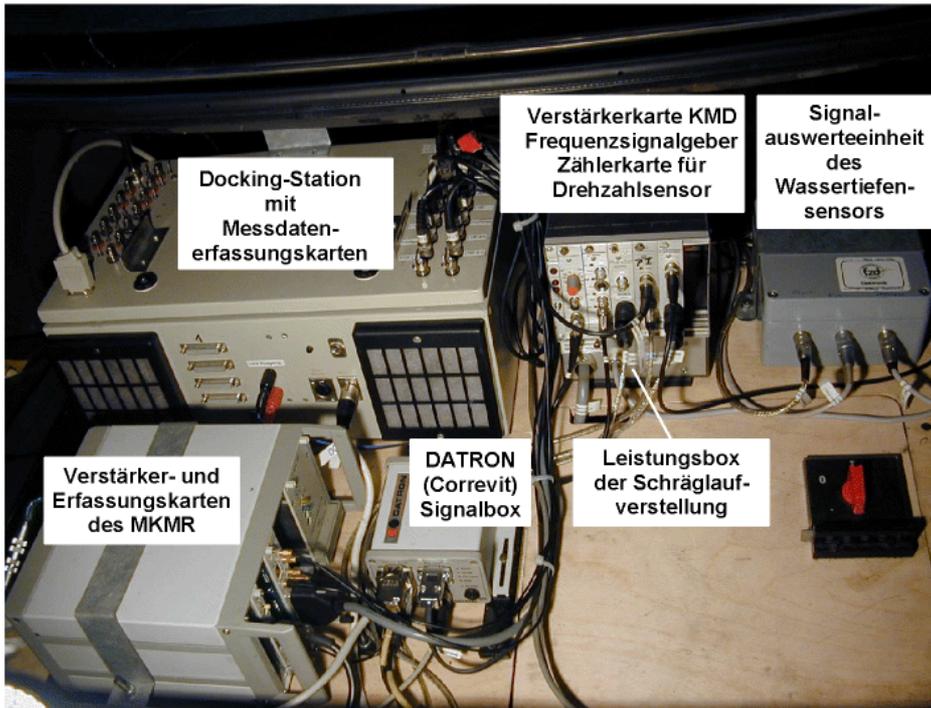


Abbildung 37: Messtechnik Kofferraum AUDI V8
Measuring system



Abbildung 38: Messtechnik Innenraum AUDI V8
Measuring system within AUDI V8

Dort erfolgt auch die Bedienung der Schräglaufwinkelverstellung und der Pumpenspannung zur Variation des Bremsmoments bzw. des Reifenschlupfs. Um auch auf kurzen Fahrbahnabschnitten gezielt Schlupfzustände einstellen zu können, besteht die Möglichkeit insgesamt acht verschiedene Pumpenspannungen vorzuwählen und mittels Drehschalter hintereinander einzuspeisen. Dadurch gelang es im Vergleich zum Vorgängersystem, sowohl die Messdauer, als auch den unerwünschten Verschleiß der Versuchsreifen um mehr als den Faktor 3 zu reduzieren. Die Variation des Spurwinkels und damit des Reifenschräglaufs kann sowohl im Stand, als auch während der Fahrt erfolgen.

Zur Erprobung weiterer Komponenten und Sensorik ist ein zweites Notebook im Innenraum untergebracht. Als Messdatenerfassungssoftware für beide Rechner wird DIAdem© verwendet.

3.1.2 Kraftmessfelge

Um sämtliche auf das Rad wirkende Kräfte erfassen zu können, wird zusätzlich zur oben beschriebenen Kraftmessdose ein Mehrkomponentenmessrad der Firma DaimlerChrysler eingesetzt. Dieses wird über Naben- und Felgenadapter mit dem Messrad verbunden, siehe **Abbildung 39**. Um dies zu realisieren, werden dreiteilige Felgen der Firma BBS verwendet.

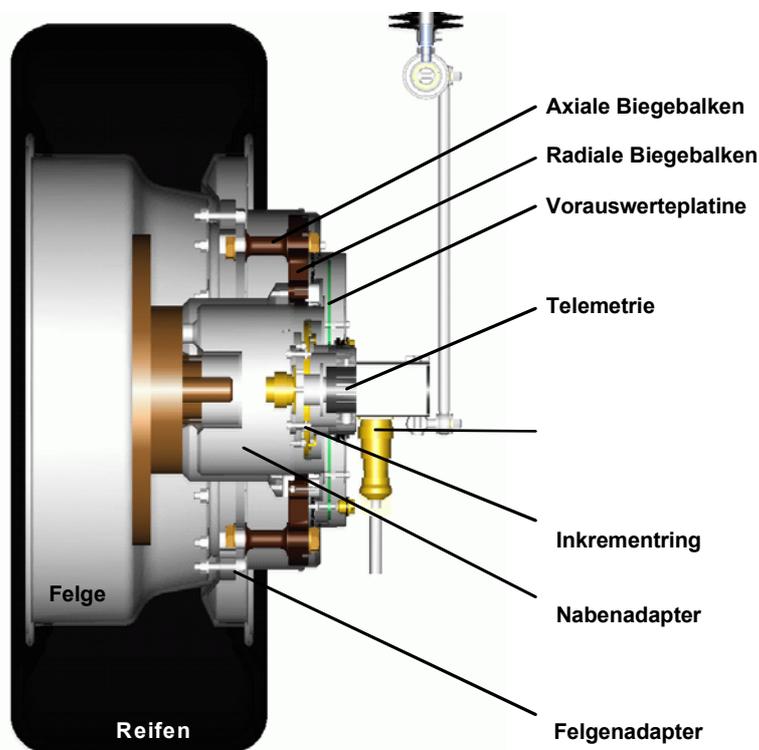


Abbildung 39: Aufbau der Kraftmessfelge [10]
Design of rim force transducer

3.1.2.1 Aufbau und Signalverarbeitung

Das Kernstück der Kraftmessfelge bildet das aus einer Titanlegierung bestehende Messglied. Dieses setzt sich aus einem Innen- und einem Außenring zusammen, zwischen denen die 8 radialen Messbalken (mit DMS beklebte Biegebalken) angeordnet sind. Diese haben die Aufgabe, die Kraft in y-Richtung und die Momente um die x- und z-Achse zu erfassen. Zwischen dem Außenring und dem Felgenadapter angeordnet liegen die 8 axialen Biegebalken. Mit diesen werden die Kräfte in x- und z-Richtung sowie das Moment um die y-Achse bestimmt. Die Messbrückenverschaltung erfolgt ebenfalls auf dem Messglied selbst.

Der Messbereich des Mehrkomponenten Messrades wird vom Hersteller wie folgt angegeben:

Messgröße	Messbereich	Messfehler (bezogen auf Messbereich)
Radwinkel	360°	+/- 0,1%
Längskraft	20kN	+/- 1%
Querkraft	15kN	+/- 1%
Radlast	20kN	+/- 1%
Radaufstellmoment	4kNm	+/- 1%
Bremsmoment	4kNm	+/- 1%
Rückstellmoment	4kNm	+/- 1%

Tabelle 3: Messbereich des MKMR [88]
Measuring range of rim force transducer

Über eine Telemetrieinheit werden das Messglied mit der nötigen Spannung versorgt und die Messsignale an die nicht rotierende Vorauswerteplatine übertragen. Dort erfolgen eine erste Verarbeitung der Daten und die Umwandlung in winkeldiskrete und kodierte Datenpakete. Diese werden über Signalkabel in die Signalverarbeitungseinheit im Kofferraum des Zugfahrzeugs geleitet. In dieser Verarbeitungseinheit erfolgt die Dekodierung und Verstärkung der Signale. Diese werden zum einen in digitaler Form an das im Fahrzeuginnenraum befindliche Roadtop (mit Messdatenerfassungskarte und Notebook) weitergeleitet. Dort erfolgt die Messdatenerfassung und Onlinevisualisierung (der Rohdaten) mittels der Software Applix© und Heike© [88].

Zum anderen werden die Analogsignale von der Signalverarbeitungseinheit in die Docking-Station geleitet. Von dort erfolgt die weitere Verarbeitung wie bereits beschrieben, siehe **Abbildung 40**. Zur Auswertung der Messdaten ist allerdings noch eine Kompensationsberechnung nötig. In dieser werden die Auswirkungen folgender Einflüsse auf das Messsignal berücksichtigt: Einbaubedingte Verspannungen der Messbalken, Eigengewicht des Rad-Messfelge-Systems, Massenträgheiten und Unwuchten. Diese Kompensationsberechnung sowie die anschließenden Rechnungen zur Umwandlung der Daten des rotierenden Systems auf ein fahrzeugfestes System erfolgen offline.

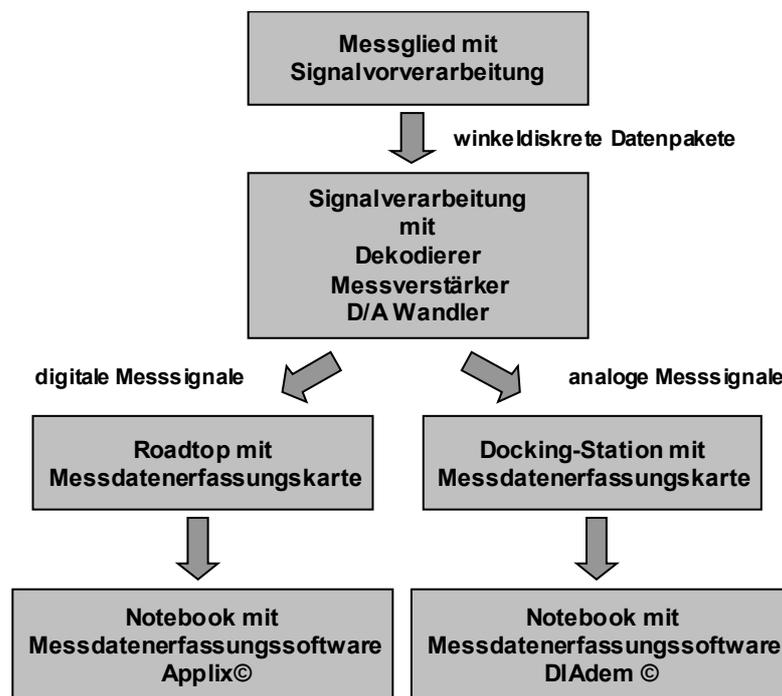


Abbildung 40: Signalverarbeitung
Signal processing

3.1.3 Vorbereitung und Ablauf der Reibwertmessungen

Zu Beginn jeder neuen Messung werden zunächst durch rahmenseitiges Aufbringen von Zusatzgewichten die gewünschte Radlast und der Reifeninnendruck eingestellt. Anschließend wird stationär der Sturzwinkel überprüft und an 6 bis 9 Messpunkten die aktuelle Reifenprofiltiefe aufgenommen (Mitte, Innen- und Außenschulter).

Die Einstellung des Schräglaufwinkels erfolgt im Fahrbetrieb. Zunächst werden die beiden Anhängerräder in ihre statische Nullstellung gefahren. Da durch Reifenverschleiß, Variation der Radlast, u.a. sich jedoch ein Restschräglaufwinkel ergeben kann, muss noch eine Feineinstellung erfolgen. Dies geschieht durch Verwendung der

Kraftmessfelge. Mittels Messung der Seitenkraft und Verstellung des Schräglaufwinkels wird der querkraftfreie Zustand am Messrad erzeugt. Durch dieses Vorgehen werden sowohl Ply-Steer-, als auch Konus-Effekte, die am Rad auftreten, nicht bei der Reibwert-messung berücksichtigt.

Anschließend wird der aktuelle Radhalbmesser in Abhängigkeit von der Messgeschwindigkeit ermittelt, siehe auch **Kapitel 3.1.1**.

Die Messung einer kompletten Reibwert-Schlupf-Kurve erfolgt durch stufenweise Variation des Förderwegs der Axialkolbenpumpe des Messanhängers, welches, bei konstanter Pumpendrehzahl, einer Variation des Fördervolumens entspricht. Nach dem Verstellen baut sich zunächst die Kraft am Messrad auf, worauf die Reifen-Fahrbahn-Kombination mit dem Einstellen des zugehörigen Schlupfzustands reagiert. Um den eingeschwungenen Zustand zu erfassen, wird nach der Verstellung ca. 1s gewartet, bis die Messdatenerfassung erfolgt. Bei sehr kurzen Streckenabschnitten oder hohen Geschwindigkeiten kann die Messdatenerfassung auch permanent erfolgen. Dadurch erhöht sich jedoch der Aufwand der späteren Auswertung.

Aus den gesammelten Messdaten erfolgt anschließend in einem automatisierten Prozess die Darstellung der Längsreibwert-Schlupf-, bzw. Querreibwert-Schräglaufwinkel-Kurve. Dazu werden nach [96, 97] die Pacejka-Koeffizienten bestimmt, welche u.a. den Anstieg des Reibwertes aus dem Ursprung, das Maximum und die Form der Kurve beschreiben.

Die Reproduzierbarkeit einer Reibwertmessung wurde anhand von drei Messdurchgängen auf einer trockenen Fahrbahn des Testgeländes in Griesheim überprüft. Die Abweichungen der ermittelten Kraftschlussmaxima lagen stets unter 0,01 Reibwert-einheiten. Dies entspricht beim gemessenen Maximalreibwert von $\mu_{\max} = 1,12$ einem prozentualen Fehler von 0,9%.

Die Überprüfung der Übereinstimmung von gemessenen und der mittels Pacejka-Koeffizienten berechneten Längsreibwert-Schlupf-, bzw. Querreibwert-Schräglaufwinkel-Kurven soll stellvertretend anhand **Abbildung 41** dargestellt werden: Im oberen Diagramm ist ein Ausschnitt der Längsreibwertmessung aufgezeigt, bei der die Ermittlung des Reibwertmaximums das Ziel war. Dargestellt sind der gemessene Reibwert (multipliziert mit dem Faktor 5) und der dazugehörige Längsschlupf. Die Abtastrate bei dieser Messung betrug 20Hz. Bei späteren Messungen wurde durch die teilweise kürzeren zur Verfügung stehenden Fahrbahnabschnitte die Abtastrate auf 100Hz erhöht. In dem dargestellten Messschrieb (Messdauer entspricht 12,5s) wurden 7 Bereiche ausgewählt, in denen auf einer „Messstrecke“ von mindestens 10 Werten (entspricht einer Zeitspanne von 0,5s) der Schlupf um nicht mehr als 0,5% variierte. In diesem Beispiel lag die maximale Schlupfvariation in den ausgewählten Bereichen bei

0,32%. Anschließend wurden die herausgegriffenen Werte, zusammen mit zwei weiteren, die bei höherem Schlupf ermittelt wurden, in das berechnete μ -s-Diagramm, siehe **Abbildung 41** unten, gelegt. Es zeigte sich, dass die gemessenen Werte durch die berechnete Kurve gut repräsentiert werden:

$$\Delta\mu_{\max} = \frac{\mu_{\max, \text{gemessen}} - \mu_{\max, \text{kurve}}}{\mu_{\max, \text{gemessen}}} \cdot 100\% = 1,2\% \quad (13)$$

Die relative Abweichung des Maximalwerts der berechneten Kurve von dem gemessenen Maximalreibwert beträgt 0,009 Reibwerteinheiten, bzw. 1,2% und liegt somit im Bereich der Messtoleranz.

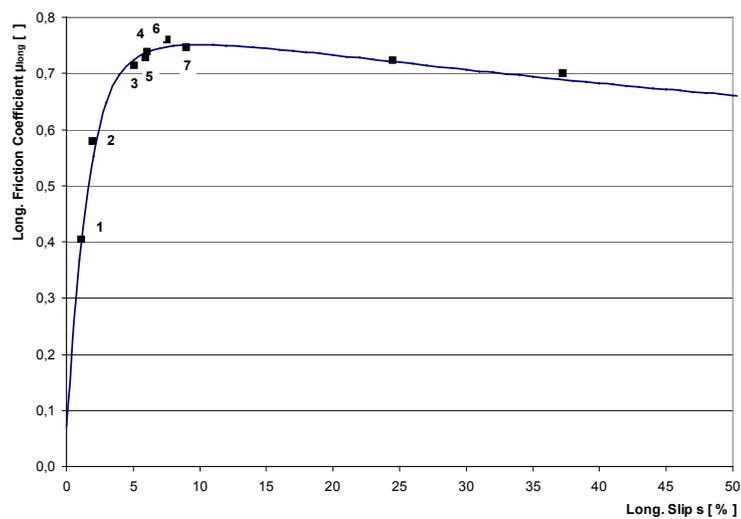
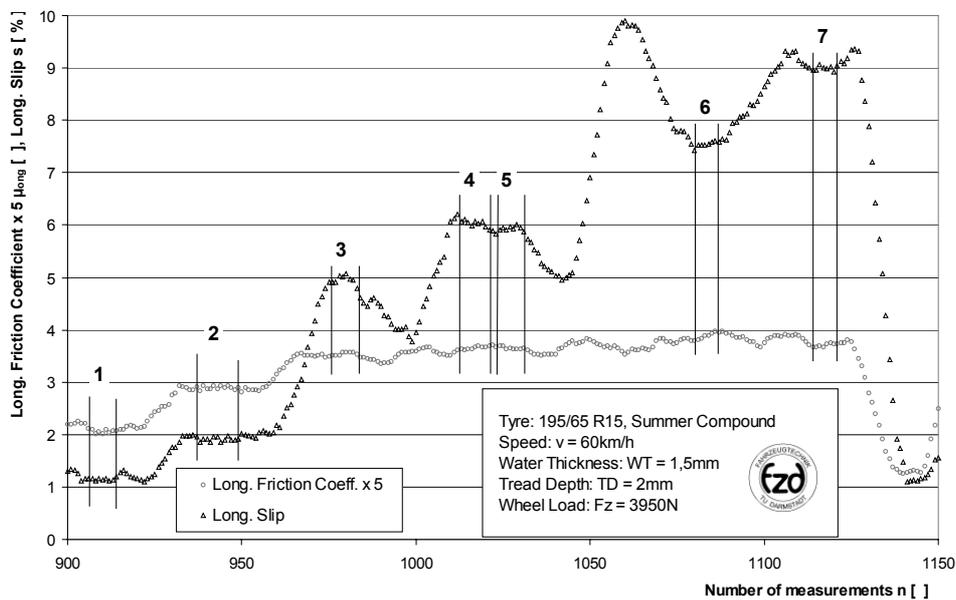


Abbildung 41: Überprüfung der berechneten Reibwert-Schlupf-Kurve
Control of calculated friction-slip-curve

Allerdings ist eine Verschiebung des Maximums hin zu höheren Schlupfbereichen festzustellen: Während bei der berechneten Kurve der Maximalreibungswert erst bei 9% Schlupf auftritt, war dies bei den herausgegriffenen Messwerten bei bereits 7,6% der Fall. Dieses Verhalten variierte allerdings bei den verschiedenen Stichproben. Somit handelt es sich nicht um einen systematischen Fehler, der durch eine gezielte Kompensation vermieden werden kann, sondern muss vielmehr als statistische Messunsicherheit betrachtet werden. Da allerdings bei der weiteren Auswertung innerhalb dieser Arbeit ausschließlich die Höhe des Maximalreibungswerts und nicht der zugehörige Schlupf von Bedeutung ist, fällt dies nicht ins Gewicht.

3.2 Texturcharakterisierung

Wie in **Kapitel 2.1.1** und **2.1.2** ausgeführt, hat die Fahrbahtextur einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe der maximal übertragbaren Kräfte in der Reifenaufstandsfläche. Der Einfluss der Fahrbahn liegt sowohl in der direkten Interaktion mit dem Laufstreifen des Reifens (Anregung der Adhäsions- und Hysteresekomponente) als auch in der Wechselwirkung mit weiteren Einflussgrößen (z.B. Wasserfilmtiefe). Ziel der folgenden Untersuchungen ist es u. a., unterschiedliche Verfahren zur Messung bzw. Charakterisierung der Fahrbahtoberfläche zu erproben, miteinander zu vergleichen und bzgl. ihrer Eignung (auch im fahrenden Fahrzeug) zu bewerten. Dieses Vorgehen ist nötig, um die Vielzahl von Größen zur Texturbeschreibung einordnen zu können. In einem zweiten Schritt, siehe **Kapitel 4.1**, werden die Texturgrößen zu den gemessenen Reibwerten in Bezug gesetzt. Ziel dieser Korrelationen ist die quantitative Bestimmung des Einflusses von Mikro- und Makrotextur auf das Kraftschlusspotential in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern.

3.2.1 Makrotextur

Nachdem in der Literatur der qualitative Nachweis der Bedeutung der Makrotextur für den Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn erbracht wurde, sollen an dieser Stelle verschiedene Verfahren zur Charakterisierung derselben untersucht werden.

3.2.1.1 Topometrisches Messverfahren

Ein berührungsloses Verfahren zur Vermessung von Oberflächen ist die bildhafte Triangulation mit strukturierter Beleuchtung, im folgenden Topometrisches Messverfahren genannt. Hierbei werden verschieden breite Streifenraster auf eine dreidimensionale Oberfläche projiziert (Gray-Code-Verfahren). Das dabei entstehende Oberflächenbild wird mittels mehrerer CCD-Kameras, die unterschiedliche Winkel zum Objekt auf-

weisen, aufgezeichnet und digitalisiert. Die eigentliche Auswertung der Daten und die Berechnung der 3D-Koordinaten erfolgt innerhalb weniger Sekunden. Abschattungen und Löcher werden automatisch erkannt und nicht in die weitere Auswertung mit einbezogen. Abhängig von der Größe des Messfeldes (von ca. 50cm² bis mehrere m²) können Auflösungen zwischen wenigen µm und 1/10mm realisiert werden. Die Messdaten können über genormte Schnittstellen an CAD/CAM-Systeme übergeben werden.

Der prinzipielle Vorgang der topometrischen Texturvermessung ist in **Abbildung 42** dargestellt.

Die Punkterasterdarstellung, die bei dem gewählten Messfeld von 260mm x 200mm zu erzielen ist, erreicht eine laterale Auflösung von 0,2mm. Die verschiedenen Messdaten (in diesem Fall ASCII-Daten) spannen eine Matrix auf, die es nun ermöglicht, sämtliche Schnitte durch die Oberfläche zu legen. Hiermit ist es zum einen möglich, die Textur sehr genau zu analysieren, zum anderen können verschiedene, die Textur beschreibende Kennwerte (z.B. MPD – **M**ean **P**rofile **D**epth, siehe **Kapitel 3.2.1.5**) berechnet werden. Dies ermöglicht eine Einordnung der Fahrbahnoberfläche gegenüber den verschiedenen Straßentypen.

Daten des eingesetzten Systems, **Tabelle 4**:

Sensorik:	opto TOP-System, Fa. Breuckmann
Lichtquelle:	100W Halogen
Anzahl der Projektionslinsen:	128
Messbereich:	180mm
Messabstand zur Fahrbahn:	600mm
Triangulationswinkel:	40°
Laterale Auflösung:	0,2mm
Tiefenauflösung:	0,005mm
Messfeld:	260 x 200mm (L x B)
Digitalisierung:	1300 x 1024 Pixel

Tabelle 4: Technische Daten des topometrischen Verfahrens zur Bestimmung der Makrotextur [20]
 Technical details of topometrical system for characterisation of macrotexture

Texturcharakterisierung

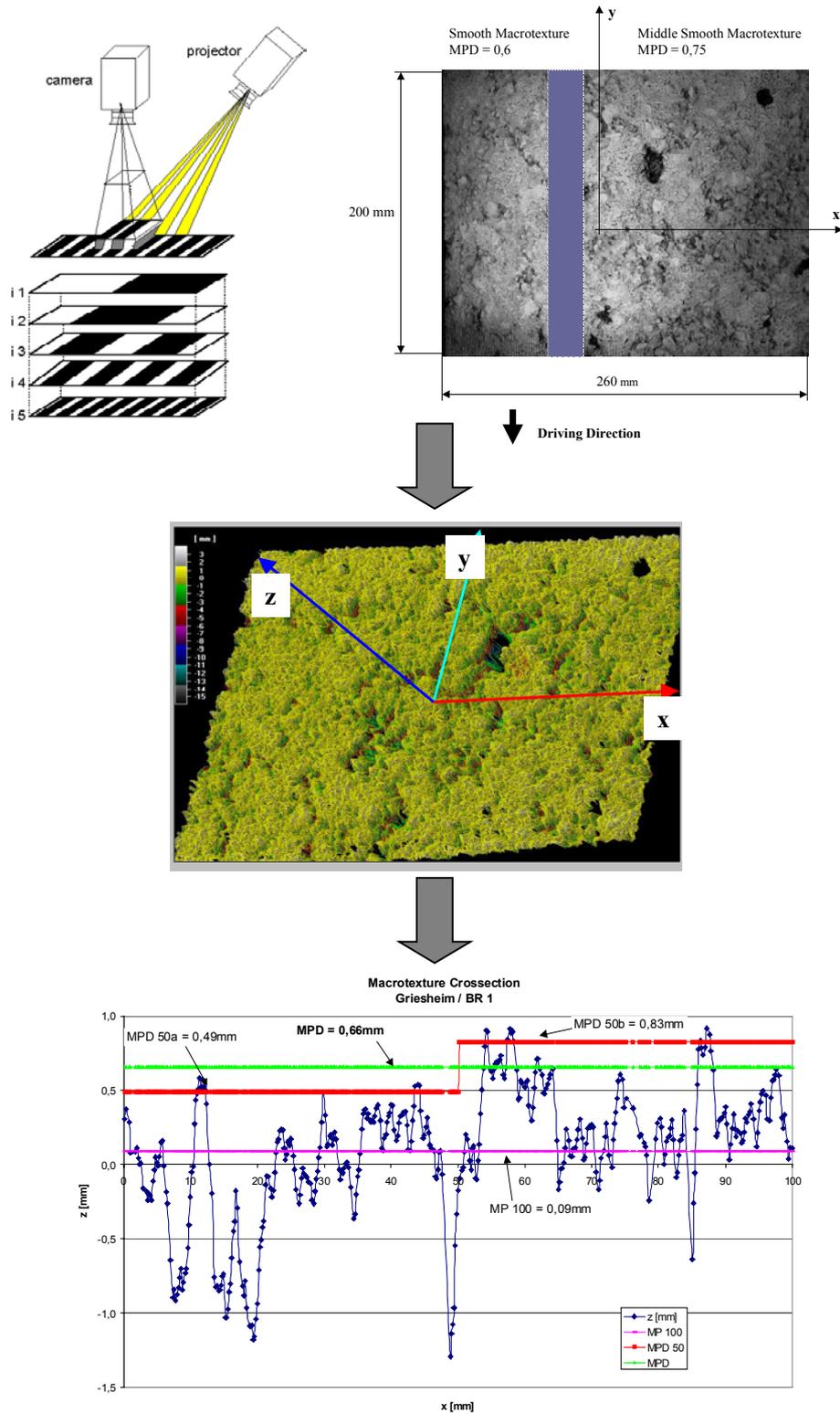


Abbildung 42: Topometrische Charakterisierung der Fahrbahnoberfläche [78]
 Topometrical characterisation of pavement

3.2.1.2 Lasertriangulation

Bei der Lasertriangulation wird ein kohärenter Lichtstrahl auf die raue Messoberfläche geschickt. Durch die Oberflächenstrukturen kommt es zu einer Reflexion in Form eines Streukegels. Ein Teil des diffusen Lichts wird über eine seitlich angeordnete Sammellinse gebündelt und auf eine PSD-Zelle (Position Sensitive Detector = lichtempfindliche Silizium Fläche) geleitet, siehe **Abbildung 43**. Eine Höhenänderung des Auftreffpunktes des Lichtstrahls auf der Fahrbahnoberfläche bewirkt eine Veränderung der Position des Lichtpunktes (dient als „Stromgenerator“) auf der PSD-Zelle. Diese Veränderung kann erfasst und durch Kenntnis der Winkelverhältnisse die Höhenänderung des Fahrprofil bestimmt werden.

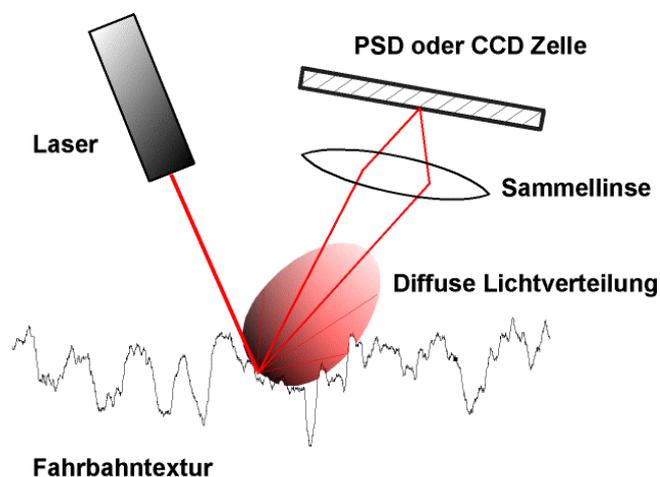


Abbildung 43: Prinzipskizze Lasertriangulation
 Principle of laser triangulation

Um den gesamten Bereich der Makrotextur mittels Profilometer (in diesem Fall mittels eines auf dem Prinzip der Lasertriangulation basierenden Messsystems) untersuchen zu können, wurden in der E DIN ISO 13473-1 [31] folgende Sensorvoraussetzungen festgelegt, **Tabelle 5**:

Vertikale Auflösung	< 0,05mm
Messbereich	> 20mm
Vertikale Nichtlinearität	< 2%
Mittlerer Spotdurchmesser	< 1mm
Messintervall	< 1mm

Tabelle 5: Sensorvoraussetzungen [31]
 Sensor requirements

Texturcharakterisierung

Im Rahmen der Untersuchungen von *fzd* zur Untersuchung von Fahrbahnoberflächen, wurde ein Laser der schwedischen Firma SELCOM eingesetzt: OPTOCATOR 2008. Dieser besitzt in der verwendeten Version folgende Eigenschaften, **Tabelle 6**:

Sensorik:	PSD-Zelle
Lichtquelle:	Infrarot-Laser
Messbereich:	128mm
Abstand zur Fahrbahn:	390mm
Abtastrate:	64kHz
Bandbreite:	20kHz
Kompensationszeit:	32 μ s
Genauigkeit:	0,128mm (< 0,1% des Messbereichs)
Nichtlinearität:	0,032mm (+ / - 0,025% des Messbereichs)
Vertikale Auflösung:	0,032mm (0,025% des Messbereichs)

Tabelle 6: Technische Daten des Lasertriangulations - Verfahrens zur Bestimmung der Makrotextur [109]
Technical details of laser triangulation system for characterisation of macrotexture

Zusammen mit einem Spotdurchmesser von 0,3mm erfüllt der Sensor die Forderungen, der E DIN ISO 13473-1.

Durch den großen Messbereich und den Abstand zur Fahrbahn ist dieser Sensor grundsätzlich auch geeignet, in einem Fahrzeug eingesetzt zu werden. Bei einer (projektintern definierten) Forderung von vier Abtastwerten pro kleinster zu erfassender Wellenlänge ($\lambda_{\min} = 0,5\text{mm}$) ergibt sich bei der zur Verfügung stehenden Abtastrate von 64kHz eine theoretische Maximalgeschwindigkeit von 28,8km/h. Dies ist zumindest für abgesperrte Teststrecken ausreichend. Für den Einsatz auf unter Verkehr liegenden Fahrbahnen wäre jedoch eine höhere Abtastrate wünschenswert.

Um einen möglichst geringen Einfluss störender Randparameter (z.B. der Vertikalbewegung des Fahrzeugs) zu erhalten, wurde der Sensor jedoch stationär eingesetzt, siehe **Abbildung 44**.

Der Lasersensor sitzt zusammen mit der PPU (**Pre-Processing Unit**) auf einem beweglichen Schlitten. Dieser wird von einem Elektromotor über eine Kugelumlaufspindel angetrieben. Die Erfassung der Spindeldrehzahl und damit (durch Kenntnis der Spindelsteigung) des Abtastweges erfolgt über einen hochauflösenden Drehzahlsensor. Die Abtastgeschwindigkeit beträgt $v_A = 0,02\text{m/s}$.

Dadurch, dass der Lasersensor gepulstes Licht aussendet und die empfangene Lichtmenge mit der ausgesendeten vergleicht, ist er weitestgehend unempfindlich gegenüber Fremdlichteinflüssen. Die Wellenlänge des Laserlichts liegt bei 820nm und damit innerhalb des infraroten Bereichs. Die 16 Bit Messsignale werden über eine serielle Schnittstelle (RS 232) von der PPU an das OIM-Board (OPTOCATOR Interface Module) geleitet. Dieses steuert den Laser, sorgt für die Spannungsversorgung und führt eine D/A-Wandlung durch. Von dort werden die Analogsignale zur Docking-Station geführt. Hier erfolgt die Messdatenerfassung und –auswertung. Als Software findet auch hier DIAdem© Verwendung.

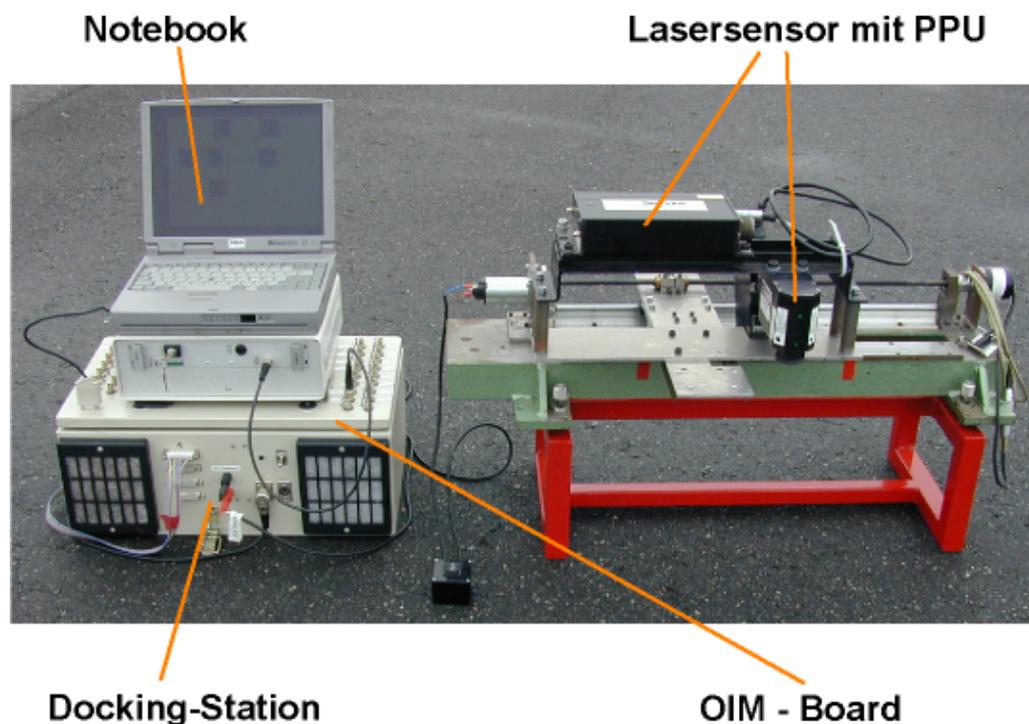


Abbildung 44: Laser-Texturerfassungssystem
Laser texture measuring system

Zunächst wurden verschiedene Kalibrierungsmessungen zur Überprüfung von Sensorfunktion, Genauigkeit und Robustheit des Systems gegenüber Störungen (z.B. Oberflächenfarbe und Umgebungslicht) durchgeführt. Bei der Betrachtung der statistischen Messfehler ergab sich eine maximale Standardabweichung der Messwerte von $\sigma_x = 0,023\text{mm}$, woraus eine Varianz von $\sigma_x^2 = 4,22 \cdot 10^{-4}\text{mm}$ resultiert. Bei dem angestrebten Vertrauensniveau von 96% und unter Berücksichtigung der Fehlerschranke von $c = 0,13\text{mm}$ wird eine Varianz der Mittelwertschätzung von $\sigma_{mx}^2 = 0,065\text{mm}$ erreicht. Damit ergibt sich für die Messung der maximal zu erfassenden Texturwellenlänge von $\lambda = 50\text{mm}$ bei der Abtastgeschwindigkeit von $v_A = 0,02\text{m/s}$ eine minimale Messdauer von 0,62s. Dies entspricht bei der verwendeten Abtastrate von

Texturcharakterisierung

1,1kHz einer Minimalanzahl von 689 Messwerten (statistische Unabhängigkeit der Werte vorausgesetzt).

Bei den Vermessungen der Oberflächen der verschiedenen Teststrecken wurde stets eine Messdauer von 25s angestrebt.

Ein weiteres Augenmerk der Vorversuche galt der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Diese wurde sowohl durch Vermessung spezieller Kalibrierstücke als auch realer Fahrbahnabschnitte, siehe **Abbildung 45** überprüft und ergab sehr gute Werte.

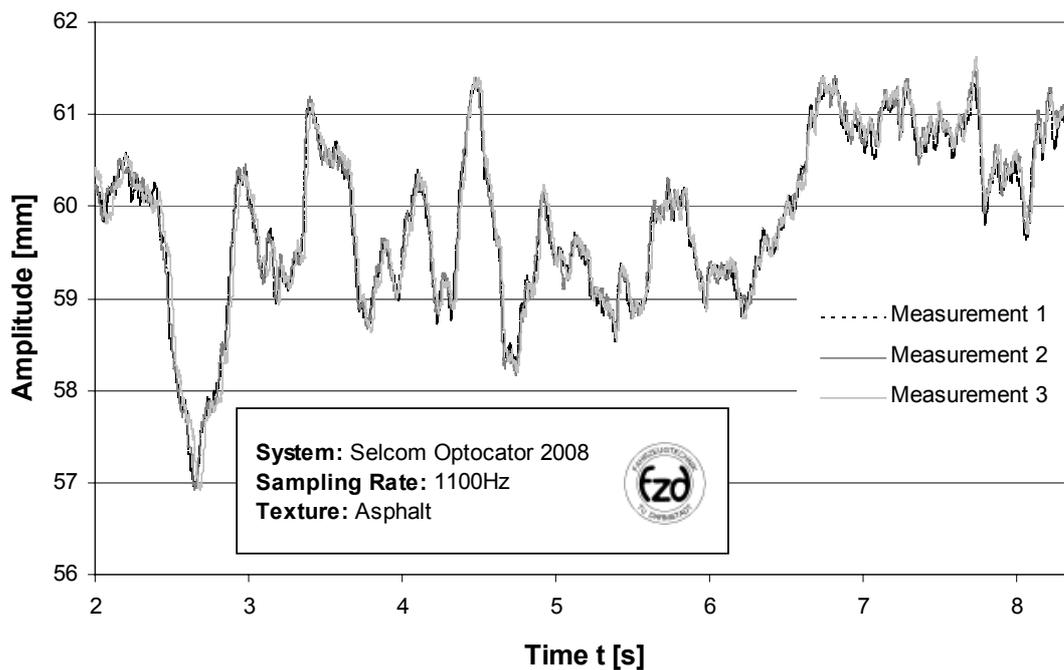


Abbildung 45: Reproduzierbarkeit der Texturmessungen
Reproducibility of texture measurements

Als charakterisierender Kennwert wurde wie bei dem Topometrischen Messverfahren die MPD bestimmt, siehe auch **Kapitel 3.2.1.5**. Die Messwerte wurden gemäß [31] einer Hochpassfilterung (mindestens -3dB bei einer Texturwellenlänge von 100mm und maximal -1dB bei einer Wellenlänge von 50mm bei einer Steigung von mindestens 12dB/Oktave) und einer Tiefpassfilterung (mindestens -3dB bei einer Texturwellenlänge von 2,5mm und maximal -1dB bei der Wellenlänge von 5mm bei einer Steigung von mindestens 6dB/Oktave) unterzogen.

Pro zu vermessender Fahrbahn wurden mindestens 18 Texturschnitte von 0,5m Länge ermittelt, aus denen wiederum mindestens 54 Kennwerte bestimmt wurden. Damit konnte bei den sehr homogenen Versuchsfahrbahnen sichergestellt werden, dass die Textur in der Fahrspur der späteren Reibwertmessungen ausreichend genau beschrieben ist.

Zusätzlich zu diesen Messungen galt es, die Einsatzmöglichkeit eines Lasersensors im fahrenden Fahrzeug bei nassen Fahrbahnverhältnissen zu überprüfen. Dies ist von Interesse, da ein solcher Sensor die Texturinformation für ein Reibwertvorhersagesystem liefern könnte.

Dazu wurde eine Asphaltprobe im Labor eben ausgerichtet und an den Rändern so präpariert, dass ein Wasserfilm aufgebracht werden konnte. Anschließend wurde bei trockener Oberfläche in einem ersten Schritt ein ca. 400mm langer Texturschnitt aufgezeichnet. Danach wurde die Fahrbahn mittels Zerstäuber befeuchtet und die gleiche Texturbahn abgefahren. Hierbei waren sämtliche Texturaggregate mit einem Wasserfilm überzogen, jedoch die Texturtäler nicht mit Wasser gefüllt. In einem dritten Schritt wurde erneut Wasser aufgebracht. Diesmal jedoch waren sämtliche Asphaltkörner gerade mit Wasser bedeckt. Bei der vorliegenden Makrotextur ergab sich eine rechnerische Wasserfilmdicke, siehe **Kapitel 3.3**, von $WD = 1\text{mm}$. Diese Messungen wurden an fünf weiteren Stellen wiederholt.

Es ist deutlich zu sehen, dass die drei aufgezeichneten Messreihen den gleichen qualitativen Verlauf haben und eindeutig einander zugeordnet werden können, siehe **Abbildung 46**.

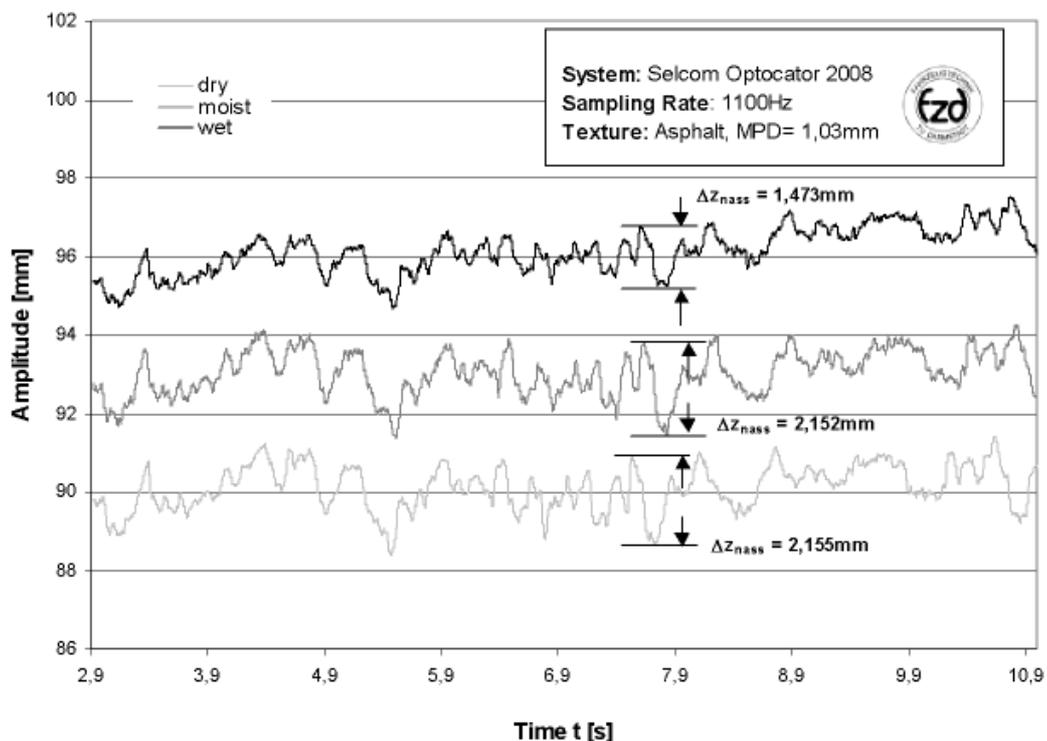


Abbildung 46: Vergleich der Lasersensorsignale in Abhängigkeit vom Oberflächenzustand
 Comparison of laser signal depending on pavement condition

Texturcharakterisierung

Auch sind die Unterschiede zwischen den Messungen auf trockener und feuchter Fahrbahn marginal. Dies ändert sich jedoch beim Vergleich zwischen trockener und nasser Fahrbahn. Zwar sind auch hier die Verläufe sehr ähnlich, jedoch verringert sich der herausgegriffene Spitze–Tal-Wert von 2,15 auf 1,47mm. In diesem konkreten Fall würde dies dazu führen, dass sich für dieselbe Fahrbahn der MPD-Wert von 1,05 auf 0,71mm verringert und damit einen komplett anderen Rauigkeitsbereich vorgibt. Daher muss festgestellt werden, dass sich ein solcher Lasersensor nicht zur Bestimmung der Fahrbahnmakrorauhigkeit bei nasser Witterung eignet.

Die Gründe für dieses Sensorverhalten sind unterschiedlicher Natur: Zum Einen ergibt sich auf nassen Oberflächen eine deutlich gerichtete Reflexion, welche Abbildungsfehler am PSD-Sensorelement hervorrufen kann (z.B. durch Mehrfachreflexionen an Texturspitzen). Zum Anderen kommt es innerhalb des Wasserfilms zu einer teilweisen Absorption des Lichtstrahls. Dadurch reduziert sich die Intensität des am Empfänger ankommenden Strahls vor allem bei der Abtastung der Texturtäler. Ein weiterer Grund liegt in dem Verhalten von elektromagnetischen Wellen an Grenzflächen. Trifft der Lichtstrahl auf die Wasseroberfläche, kommt es sowohl zu einer Reflexion (Einfallswinkel Θ_i = Ausfallswinkel Θ_r) als auch zu einer Beugung des Strahls beim Übergang vom Medium Luft zum Medium Wasser (Snell'sches Gesetz):

$$n_i \cdot \sin\Theta_i = n_t \cdot \sin\Theta_t \quad (14)$$

mit: n_i Brechungsindex von Luft (= 1,000 bei 20°C und $\lambda = 589\text{nm}$)

n_t Brechungsindex von Wasser (= 1,333 bei 20°C und $\lambda = 589\text{nm}$)

Θ_t Brechungswinkel

Hieraus ergeben sich unterschiedliche Lauflängen der Wellen und unterschiedliche Auftreffpunkte des Lichtspots auf dem Sensorelement.

3.2.1.3 Ausflussmessung

Ein Verfahren, welches zwar nicht zur Messung in einem fahrenden Fahrzeug geeignet ist, jedoch bei Straßenbau-Forschungseinrichtungen Verwendung findet, um die Fahrbahnmakrorauhigkeit zu bestimmen, ist die Ausflussmessung [42], [43] und [93]. Um die mittels Topometrie und Lasertriangulation erfassten MPD-Werte hinsichtlich ihrer Höhe und Bedeutung einordnen und mit Datenbankwerten vergleichen zu können, wurden auf den Testfahrbahnen in Michelstadt und Griesheim ebenfalls Ausflussmessungen durchgeführt.

Hierfür wird ein Acrylglaszylinder mit 60mm Durchmesser und zwei Markierungen gemäß den Vorgaben der Bundesanstalt für Materialprüfung Berlin verwendet. Der Fuß des Ausflussmessers besteht aus einem Ringgewicht und einem Präzisions-Gummiring,

der auf der Fahrbahn aufliegt. Die Messgröße ist die Zeit, die eine Wassersäule benötigt, um zwischen Gummiring und Fahrbahn hindurchzufließen. Da diese Ausflusszeit von den Kanalquerschnitten in der Fahrbahnoberfläche abhängig ist, ist das Verfahren grundsätzlich geeignet, die Makrotextur und speziell das Drainagevermögen zu beschreiben. Eine Aussage über die Griffbarkeit liefert die Ausflussmethode gemäß [42] jedoch nur in Verbindung mit dem SRT-Wert (**Skid Resistance Tester**), siehe **Kapitel 3.2.2.3**.

3.2.1.4 Sandpatch Verfahren

Gemäß ISO 10844 gehört die Sandpatch Methode zu den volumetrischen Verfahren. Es basiert darauf, dass ein definiertes Volumen von Quarzsand auf einer Oberfläche kreisförmig ausgebreitet wird. Der Durchmesser dieses Flecks wird an verschiedenen Stellen gemessen und ein mittlerer Durchmesser ermittelt. Dividiert man das Sandvolumen durch die bedeckte Fläche, so ergibt sich ein Wert, der die durchschnittliche Tiefe der Sandschicht (mittlere Texturtiefe) beschreibt. Anstelle von Quarzsand werden in den letzten Jahren auch Glaskugeln definierter Größe verwendet.

Der Kennwert, der sich aus diesem Verfahren ergibt, ist die GTT (**Geschätzte Glättungstiefe**), bzw. ETD (**Estimated Texture Depth**) [104].

3.2.1.5 Bestimmung und Vergleich der Kennwerte

Im folgenden sollen die Bestimmung der Makrotexturkennwerte mittels der oben genannten Verfahren erläutert und Korrelationen der Werte zueinander dargestellt werden. Ziel ist es, Fahrbahnen untereinander vergleichbar zu machen und die Kennwerte bei den späteren Reibwertmessungen zu nutzen, um deren Einfluss auf das Kraftschlusspotential zu quantifizieren.

Der gebräuchlichste Kennwert zur Beschreibung der Makrotextur ist die MPD (**Mean Profile Depth**) [104]. Diese bestimmt sich aus dem Mittelwert der Abstände von dem mittleren Profil eines 100mm Intervalls und der maximalen Erhebung innerhalb eines 50mm Intervalls [31]:

$$MPD = \frac{MPD_1 + MPD_2}{2} \quad (15)$$

mit: $MPD_1 = z_{1, \max} - MP$ (16)

$$MPD_2 = z_{2, \max} - MP \quad (17)$$

Texturcharakterisierung

$$\text{und: } MP = \frac{1}{n}(z_1 + z_2 + \dots + z_n) \quad (18)$$

Dargestellt in Abbildung 47:

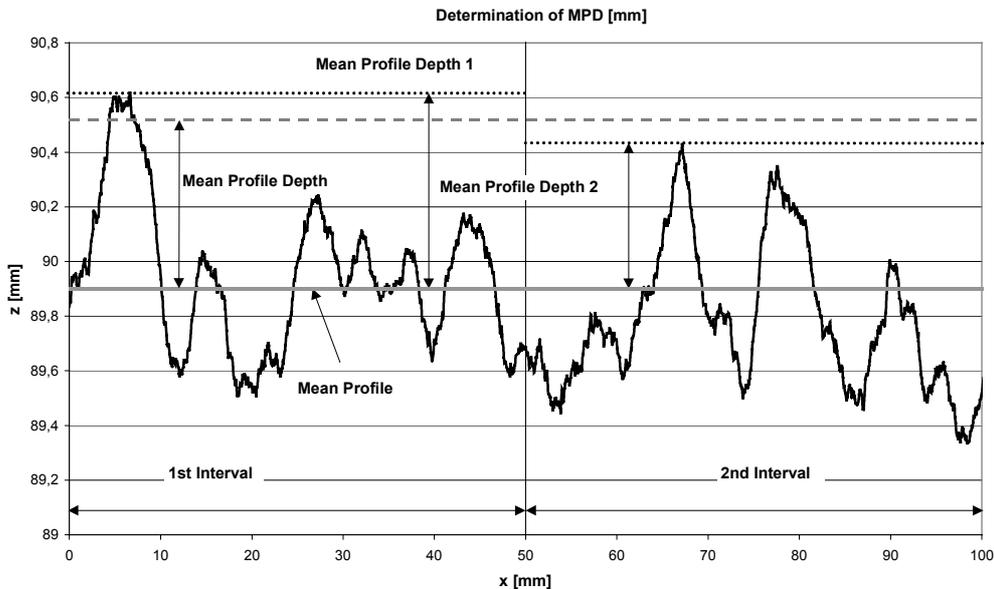


Abbildung 47: Bestimmung der MPD
Determination of MPD

Betrachtet man die physikalische Bedeutung des MPD-Wertes, so wird deutlich, dass er geeignet ist, die Anregung der Hysteresekomponente zu beschreiben. Für die Ausbildung dieser ist neben der Aktivierungsfrequenz (Gleitgeschwindigkeit) vor allem die Höhe des Verformungsvolumens relevant, siehe **Kapitel 2.1.1** und **2.1.2**. Da deutliche Verformungen durch die Texturspitzen hervorgerufen werden, kann ein direkter Wirkungszusammenhang hergeleitet werden. Dies gilt ebenfalls für die nasse Fahrbahn, bei der die Spitzen die Wasseroberfläche durchbrechen und für einen Reifen-Fahrbahn-Kontakt sorgen.

Bezogen auf das Drainagevermögen jedoch, ist der MPD-Wert allein nicht aussagekräftig [83]. Besteht die Fahrbahnoberfläche beispielsweise aus einer besonders ebenen Textur mit vereinzelt großen Texturspitzen, so würde sich rechnerisch eine sehr hohe MPD ergeben, obwohl das Drainagevermögen niedrig wäre. Ob dieses Szenario auch auf reale Fahrbahnen übertragbar ist, kann durch den Vergleich der auf verschiedenen Teststrecken ermittelten MPD-Werte mit denen des AM (mittels Ausflussmesser gemessene Ausflusszeit) überprüft werden. Die Unterschiede der MPD-Werte innerhalb eines 0,5 x 0,5m großen Messfeldes und zwischen den verschiedenen

Messfeldern eines Streckenabschnitts halten sich in engen Grenzen ($\Delta\text{MPD} < 0,03\text{mm}$). Aus den mindestens 54 Werten pro Messfeld wurde daher ein gemittelter Wert bestimmt. Diesem Wert wiederum werden fünf Ausflussmessungen pro Messfeld gegenübergestellt. Hierbei ergibt sich folgende Korrelation, siehe **Abbildung 48**.

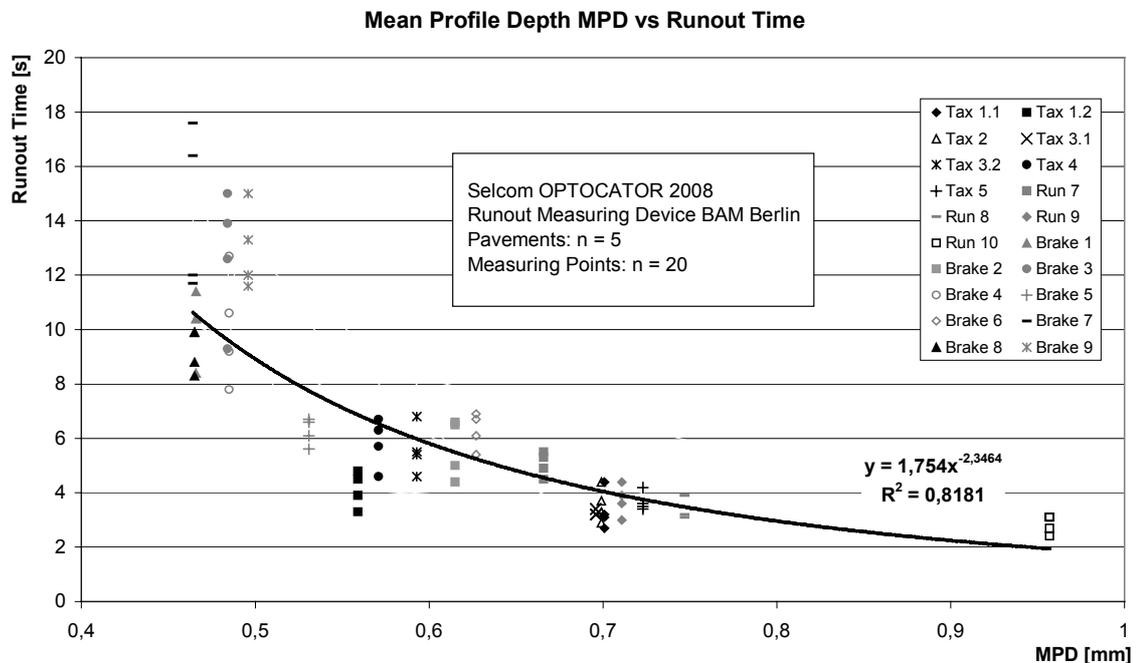


Abbildung 48: Vergleich von Ausflusszeit und MPD
Comparison of runout time and MPD

Es fällt auf, dass in Bereichen grober Fahrbahnoberflächen und hoher MPD-Werte ($\text{MPD} > 0,6\text{mm}$) eine gute Korrelation von Mean Profile Depth und Ausflusszeit besteht. Des Weiteren sind die Streuungen innerhalb der gemessenen Zeiten relativ gering ($\Delta t_{\text{max}} < 3\text{s}$). Dies ändert sich bei Oberflächen mit einer geringen Rauheit. Dort kommt es innerhalb eines Messfeldes zu Unterschieden von bis zu 6s. Dies ist zwar prozentual betrachtet auf einem ähnlichen Niveau, jedoch zeigt die absolute Abweichung den großen Einfluss des Bedieners bei der Auswahl des Standorts. Eine Messung bei einer Fahrbahn mit einer $\text{MPD} > 2\text{mm}$ brachte kein auswertbares Ergebnis, da durch die zu schnell abfließende Wassersäule der Messfehler bei der Zeitnahme zu groß wurde.

Daher ist grundsätzlich ein Vergleich von Fahrbahnen, die mittels Lasertriangulation / Topometrie, bzw. Ausflussmesser beurteilt wurden möglich, soweit die MPD innerhalb des Bereichs von 0,6 bis 0,95mm liegt. Des Weiteren zeigt sich, dass die MPD auch das Drainagevermögen der Fahrbahn beschreibt.

Texturcharakterisierung

In einem zweiten Schritt wurde stichprobenartig die Vergleichbarkeit der Ergebnisse des Sandpatch Verfahrens mit den MPD-Werten überprüft und die in der Literatur angegebene Umrechnungsformel bestätigt:

$$\text{Estimated Texture Depth: } \quad \text{ETD} = 0,2 + 0,8 \cdot \text{MPD} \quad (19)$$

Physikalisch bedeutet dies, dass der MPD-Wert grundsätzlich in der Lage ist, auch das Wasseraufnahmevermögen einer Fahrbahnoberfläche zu beschreiben.

Damit ergibt sich grundsätzlich die Möglichkeit, verschiedene Oberflächenkennwerte, z.B. aus den Datenbanken der Straßenforschungsinstitute, zur Berechnung des MPD-Wertes heranzuziehen und für eine Modellbildung zu nutzen. Ebenso können neu aufgezeichnete MPD-Messungen mit früheren Daten, die hauptsächlich mittels AM und Sandpatch Verfahren ermittelt wurden, verglichen werden.

3.2.2 Mikrotextur

Im Gegensatz zur Makrotextur existiert bei der Mikrotextur z.Zt. kein Kennwert, der auf einer direkten Messung beruht. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass bislang das Erfassen der Fahrbahnoberfläche in den relevanten Wellenlängenbereichen kleiner 0,5mm nur im Labor und nur mittels sehr aufwendiger Verfahren möglich war. Deshalb wird die Mikrotextur anhand ihres Einflusses auf den Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn beschrieben. Es wird angenommen, dass bei geringen Gleitgeschwindigkeiten und sehr dünnen Wasserfilmen (die Oberflächenkörner sind mit Wasser benetzt, die Texturtäler sind jedoch nicht mit Wasser gefüllt) die Mikrotextur die reibwertrelevante Größe darstellt, siehe **Kapitel 2.1.1** und **2.1.2**. Im folgenden sollen nun verschiedene Methoden zur Charakterisierung der Mikrotextur beschrieben und miteinander verglichen werden.

3.2.2.1 Topometrisches Messverfahren

Basierend auf dem in Kapitel **3.2.1.1** vorgestellten Messprinzip ist auch die direkte Erfassung der Mikrotextur möglich. Da allerdings kein Kennwert zur Beschreibung der Mikrotextur besteht, soll hiermit nur die Möglichkeit dargestellt werden, in naher Zukunft einen solchen Wert zu definieren.

Analog zur Erfassung der Makrotextur kann auch hier eine dreidimensionale Oberfläche dargestellt werden, siehe **Abbildung 49**. In diesem Fall ergibt sich eine Punkterasterdarstellung mit einer Auflösung von 0,01mm. Das Messfeld verringert sich aufgrund der großen lateralen Auflösung auf 8 x 6mm.

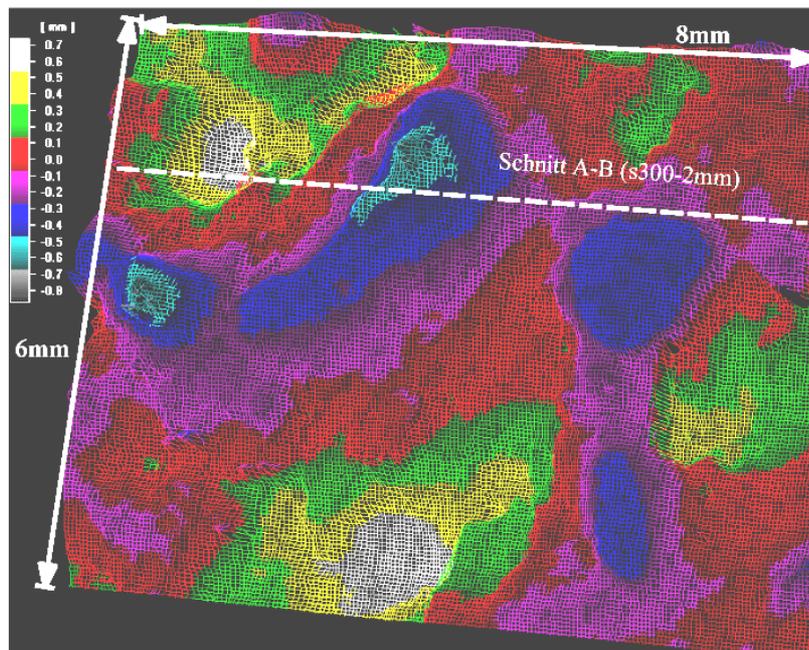


Abbildung 49: Topometrisches Rasterbild der Mikrotextur
Topometrical picture of microtexture

Das verwendete System besitzt folgende Eigenschaften **Tabelle 7**:

Sensorik:	µkro TOP-System, Fa. Breuckmann
Lichtquelle:	100W Halogen
Anz. der Projektionslinsen:	64
Messtiefe:	4mm
Messabstand zur Fahrbahn:	120mm
Triangulationswinkel:	40°
Laterale Auflösung:	0,006mm
Tiefenauflösung:	0,003mm
Messfeld:	8 x 6mm (L x B)
Digitalisierung:	1300 x 1024 Pixel

Tabelle 7: Technische Daten des topometrischen Verfahrens zur Bestimmung der Mikrotextur [20]
Technical details of topometrical system for characterisation of microtexture

Ebenso wie bei der Vermessung der Makrotextur entsteht eine Messdatenmatrix, die es ermöglicht, beliebige Schnitte durch die Oberfläche zu legen, siehe **Abbildung 50**. Dadurch ist es möglich, das Aussehen einzelner Fahrbahnkörner zu vermessen und zu

Texturcharakterisierung

bewerten: So hat z. B. die eingekreiste Texturspitze eine Höhe von 0,2mm und eine laterale Ausdehnung von 0,4mm.

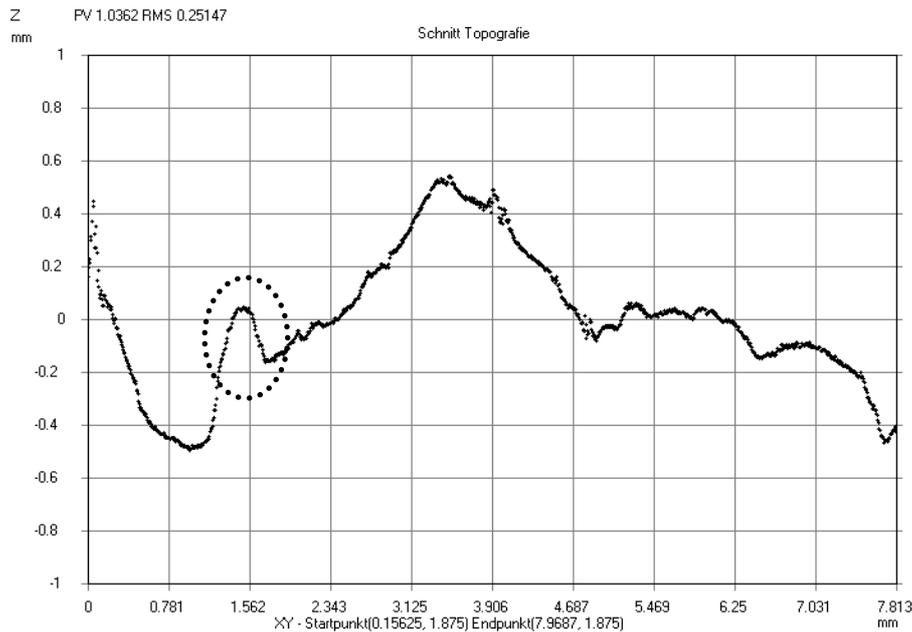


Abbildung 50: Texturschnitt A-B
Cross section A-B

3.2.2.2 Brake Friction Coefficient BFC und Sideway-Force Coefficient Routine Investigation Machine SCRIM

Im Gegensatz zum Topometrischen Messverfahren wird anhand der Ermittlung des BFC- und des SCRIM-Wertes keine direkte Erfassung der Mikrotextur durchgeführt, sondern es wird die Griffbarkeit der Fahrbahnoberfläche bewertet.

Hierzu wird bei der Bestimmung des Brake Friction Coefficient, der identisch mit dem SRM-Wert (Stuttgarter Reibungsmesser) ist, die Bremskraft eines blockierten Schlepprades bei verschiedenen Messgeschwindigkeiten (40, 60 oder 80km/h) und einer rechnerischen Wasserfilmdicke (siehe **Kapitel 3.3**) von 1mm ermittelt und ins Verhältnis zur Normalkraft gesetzt [80], [99]. Die Radlast ist mit 3430N ebenso vorgegeben wie der temperaturabhängige Reifeninnendruck. Der zu verwendende Messreifen ist entweder ein P.I.A.R.C. Europa-Reifen oder ein vergleichbarer ASTM Standardreifen der Dimension 165 R 15 [3]. Mit diesem werden Einzelbremsungen auf 20, bzw. 40m langen Streckenabschnitten durchgeführt und der Gleitreibwert im eingeschwungenen Zustand ermittelt.

Der SCRIM-Wert entspricht der Seitenkraft (welche senkrecht zur Radebene wirkt) eines unter 20° Schräglaufwinkel frei rollenden Messrades im Verhältnis zur Normalkraft. Der schmale und profillose Reifen der Dimension 3 x 20 Zoll (entspricht

76 x 508mm) wird unter einer Radlast von 1960N betrieben. Die Messgeschwindigkeiten liegen ebenfalls bei 40, 60 und 80km/h, wobei eine rechnerische Wasserfilmdicke von 0,5mm aufgebracht wird [16], [99]. Die Messabschnitte haben je nach Geschwindigkeit eine Länge von 5, 10 oder 20m.

Bei den Messungen innerhalb des VERT-Projekts wurde, abweichend von der Messprozedur zur Bewertung von öffentlichen Fahrbahnen, der Gleitreibwert mittels ASTM-Reifen größtenteils bei 20km/h durchgeführt. Der Grund liegt darin, dass anders als bei den Straßenbewertungsmessungen eine vergleichsweise kurze Strecke analysiert werden muss. Daher ist der Zeitfaktor weniger relevant als bei der Untersuchung von Fahrbahnen mit einer Gesamtmesslänge von 140km [80]. Des Weiteren ist der Einfluss der Mikrotextur gemäß der Reibungstheorie speziell bei geringen Gleitgeschwindigkeiten dominant.

3.2.2.3 Skid Resistance Tester SRT (Englisches Pendel)

Bei dem Skid Resistance Tester handelt es sich um ein tragbares Pendel, an dessen Schwenkarm ein federnd angebrachter Gleitkörper sitzt [42], [43], siehe **Abbildung 51**.

Dieser Gleitkörper besteht aus einem Gummimaterial, welches dem eines Laufstreifens ähnlich ist. Nach Auslösen des Pendelarms schleift das Gleitstück über einen bewässerten Teil der Fahrbahnoberfläche und nimmt einen Schleppezeiger mit. Je höher der Gleitreibwert der Gummi-Fahrbahn-Kombination, um so früher stoppt das Pendel und um so höher ist der Skalenwert [93].



Abbildung 51: Skid Resistance Tester (British Pendulum)

Der Vorteil des Pendels ist die einfache Handhabung und die gute Eignung für den mobilen Einsatz. Nachteilig ist, ähnlich wie bei der Ausflussmessung, der große

Texturcharakterisierung

Einfluss des Bedieners auf das Messergebnis. So ergeben sich je nach Qualität der Ausrichtung des Messgeräts bezüglich der Fahrbahn und je nach Höhe des aufgetragenen Wasserfilms unterschiedliche Messergebnisse. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen, wurden sämtliche Messungen innerhalb dieser Untersuchungen von einer Person durchgeführt. Fehler können so zwar nicht verhindert werden, jedoch sind diese systematischer Natur.

Die Gleitgeschwindigkeit der Probe beträgt ca. 2,8m/s (10km/h) und liegt damit in einem Bereich, in dem sich auch Pkw-Reifen beim Bremsen aus höheren Geschwindigkeiten befinden.

Aus diesem Grund wird das Pendel neben der Beurteilung der Schärfe von Fahrbahnoberflächen auch zur Beurteilung des Nassreibwertes von unterschiedlichen Gummiprüfungen eingesetzt [63].

Die Beurteilung der Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen mittels SRT und AM (Ausflussmesser) erfolgt gemäß **Tabelle 8**. Hierbei werden Griffigkeitswerte in Zustandswerte überführt (Schulnotenprinzip: 1 entspricht einem sehr guten, 5 einem ungenügenden Fahrbahnzustand). Bei Erreichen eines Wertes von 3,5 ist ein Warnwert erreicht, der Anlass zur intensiven Beobachtung der Fahrbahn und zur Analyse der Ursachen gibt. Der Schwellenwert beschreibt einen Zustand, bei dem dringender Handlungsbedarf besteht.

	SRT Wert []	Ausflusszeit [s]
Warnwert (entspricht einem Zustandswert von 3,5)	55	60
Schwellenwert (entspricht einem Zustandswert von 4,5)	50	120

Tabelle 8: Griffigkeitsbeurteilung mit SRT und AM nach [45]
Grip estimation with SRT and AM

3.2.2.4 Vergleich der ermittelten Kennwerte

Analog zu der Bestimmung und dem Vergleich der Kennwerte der Makrotextur soll dies im Folgenden auch für die Mikrotextur erfolgen. Wie bereits dargelegt, ist z. Zt. kein direkter Kennwert definiert. Es handelt sich vielmehr stets um Werte, die den Einfluss der Mikrotextur auf den Nassreibwert beschreiben.

Hierbei sind vor allem der SRM/BFC- und der SCRIM-Wert von großer Bedeutung, da diese Werte zur Beurteilung der Griffigkeit von öffentlichen Straßen (z. B. durch die BAST) verwendet werden, siehe **Tabelle 9**.

Mess- Geschwindigkeit	40 km/h		60 km/h		80 km/h	
	SCRIM	SRM	SCRIM	SRM	SCRIM	SRM
Zielwert Note 1,5	0,69	0,63	0,61	0,53	0,55	0,45
Warnwert Note 3,5	0,55	0,51	0,47	0,41	0,41	0,33
Schwellenwert Note 4,5	0,48	0,45	0,4	0,35	0,34	0,27

Tabelle 9: Zustandswerte für Straßen unterschiedlicher Funktionsklassen [16]
State values of roads with different function classes

Eine Messgeschwindigkeit von 40km/h wird zur Bewertung von Fahrbahnen der Funktionsklassen 3 und 4 angewendet. Diese Fahrbahnen des untergeordneten Straßennetzes sind für Geschwindigkeitsbereiche bis 70 bzw. 50 km/h ausgelegt und finden damit hauptsächlich innerorts Anwendung.

Eine Messgeschwindigkeit von 60km/h wird bei Straßen mit einem Geschwindigkeitsbereich zwischen 70 und 100km/h eingesetzt. Diese werden der Funktionsklasse 2 zugeordnet.

Die Funktionsklasse 1 beinhaltet Fahrbahnen mit einer zulässigen Geschwindigkeit oberhalb 100km/h. Die Messungen zur Charakterisierung der Griffigkeit dieser Fahrbahnen finden bei 80km/h statt [16].

Es wird deutlich, dass mit steigender Messgeschwindigkeit geringere SCRIM- bzw. SRM-Werte nötig sind, um den Zielwert zu erreichen. Besonders auffällig ist die größere Differenz zwischen 40 und 60km/h im Vergleich zu der Differenz zwischen 60 und 80km/h. Dass sich der Geschwindigkeitseinfluss bei nasser Fahrbahn bereits bei diesen geringen Geschwindigkeiten stark ausprägt, ist zu einem großen Teil auf die Profillosigkeit des SCRIM-Reifens bzw. auf die Längsprofilierung des BFC/SRM-Reifens zurückzuführen. Hierdurch wird im Vergleich zu profilierten Pkw-Reifen bereits bei geringen Tempi der Wasserfilmtransport aus der Reifenaufstandsfläche erschwert. Dies bewirkt eine starke Gewichtung des Drainagevermögens der Fahrbahn als Einflussgröße auf die Reifen-Fahrbahn-Reibung. Zur Bewertung der untersuchten Fahrbahnen anhand der gemessenen SCRIM- und SRM-Werte wurden Normierungsfunktionen entwickelt und in Zuordnungsdiagrammen dargestellt.

Texturcharakterisierung

Vergleicht man nun die SCRIM-Werte, aufgenommen bei 80km/h, mit den SRT-Werten, so ergibt sich gemäß [45] folgender Zusammenhang der Zustandsgrößen, siehe **Abbildung 52**.

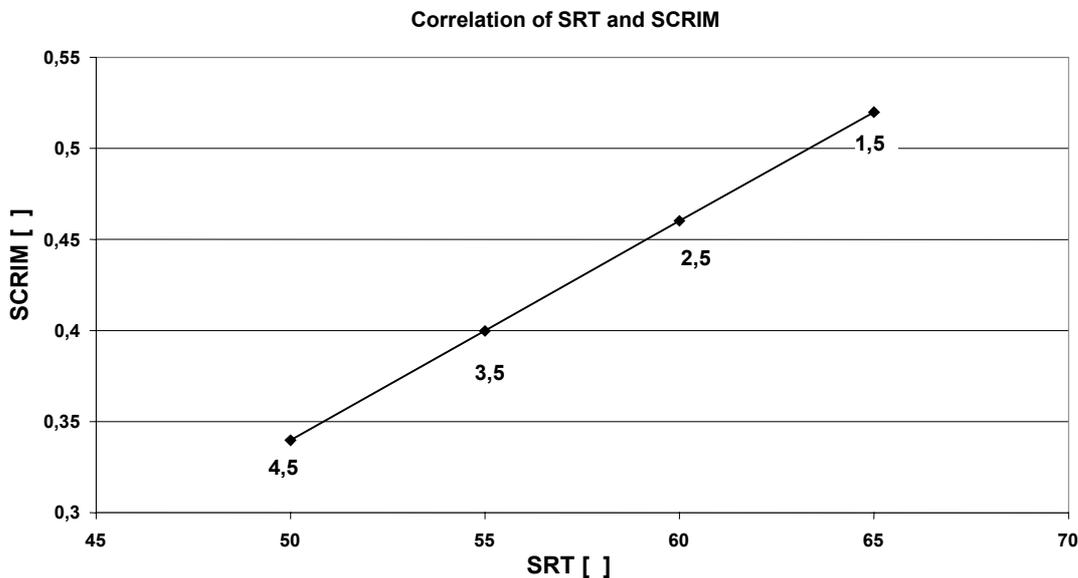


Abbildung 52: Zustandsgrößen von Fahrbahnen mit SRT und SCRIM nach [45]
State values of roads estimated with SRT and SCRIM

Durch diese Klassifizierung ist es zum einen möglich, den Fahrbahnzustand zu bewerten und die eingesetzten Versuchsstrecken gegenüber den unter Verkehr liegenden Straßen einzuordnen, zum anderen ergibt sich die Möglichkeit, SRT-Werte in SCRIM und BFC/SRM-Werte umzurechnen. Die Auswertung der Teststrecken Michelstadt und Griesheim bzgl. ihres Griffigkeitsniveaus ergeben SRT-Werte, die wie erwartet auf sehr hohem Niveau liegen und Zustandswerten von 1,5 und besser entsprechen. Vor dem wissenschaftlichen Hintergrund muss jedoch die Frage gestellt werden, ob eine Umrechnung von Kennwerten, die bei verschiedenen Geschwindigkeiten aufgenommen wurden und damit unterschiedliche Reibungsmechanismen anregen, sinnvoll ist. Aus diesem Grund soll nun untersucht werden, ob es tatsächlich eine Korrelation zwischen den gemessenen Gleitreibwerten bei 20km/h (BFC_{20}) und den SRT-Werten gibt. Hierzu wurden die Messungen mit dem Skid Resistance Tester über den BFC-Werten von fünf verschiedenen Streckenabschnitten aufgetragen. Pro Fahrbahn wurden mindestens 40 SRT-Werte und 4 BFC-Werte aufgenommen. Das Ergebnis, siehe **Abbildung 53**, ist eine nur sehr schwache Korrelation der beiden Kennwerte (der Versuch den Zusammenhang mittels linearer Korrelation zu beschreiben, ergab ein noch schlechteres Ergebnis).

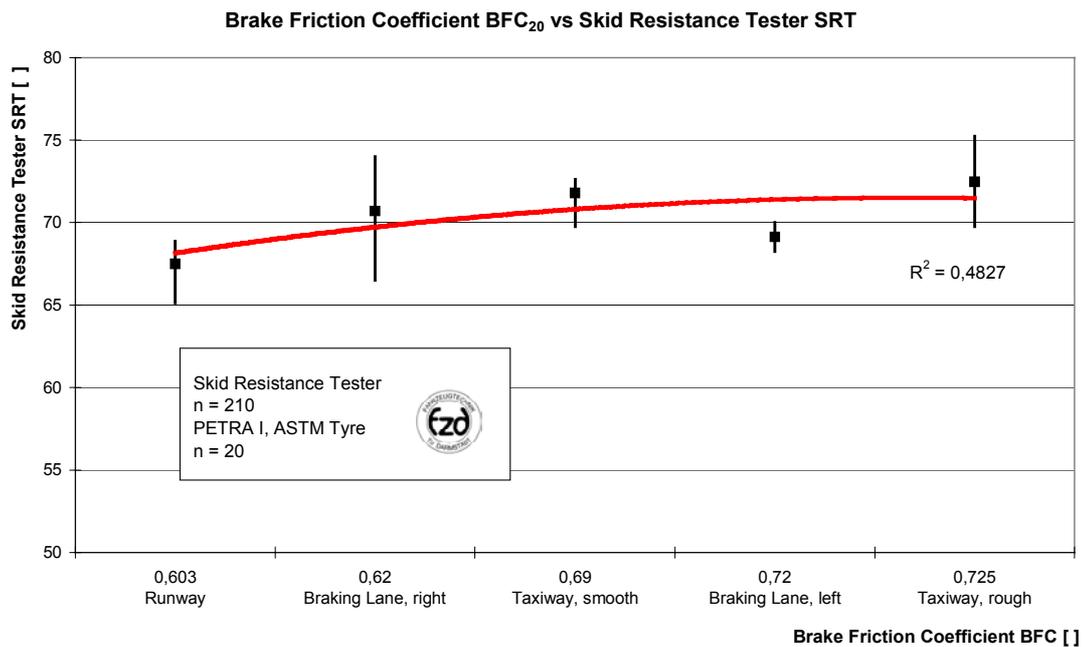


Abbildung 53: Vergleich von min / max / mittel SRT- und BFC-Werten
Comparison of min / max / mean SRT and BFC-values

Zum einen sind die Streuungen zwischen den Minimal- und Maximalwerten innerhalb der SRT-Messungen teilweise sehr hoch. Zum anderen ergeben sich auf Fahrbahnen mit deutlich höheren BFC-Werten nicht zwangsläufig auch höhere SRT-Werte. Ob dies an der oben angesprochenen unterschiedlichen Anregung der Reibungsmechanismen liegt oder ob die Auswahl der Messoberflächen bzw. das Materialverhalten der Gleitkörper ein Grund hierfür darstellen, kann an dieser Stelle nicht eindeutig gesagt werden. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass eine generelle Übertragbarkeit der Ergebnisse unterschiedlicher Messprinzipien nur eingeschränkt möglich ist.

3.2.3 Fazit

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass durch Anwendung eines Topometrischen Messverfahrens oder mittels Lasertriangulation die Makrotextur der Fahrbahn gut erfasst werden kann. Des Weiteren steht mit der Mean Profile Depth ein Kennwert zur Verfügung, der sowohl die Anregung der Hysteresekomponente der Gummireibung als auch das Wasseraufnahmevermögen bzw. das Drainagevermögen der Fahrbahn sinnvoll beschreibt. Letzterer Sachverhalt war stets umstritten, da beispielsweise kommunizierende Kanäle der Fahrbahnoberfläche, die drainageförderlich sind, prinzipbedingt nicht durch diese Messverfahren beschrieben werden können. Damit stellt der MPD-Wert gerade in der Wechselwirkung mit der Wasserfilmtiefe für die spätere Modellbildung einen wichtigen zu untersuchenden Parameter dar.

Bestimmung der Wasserfilmdicke

Des Weiteren zeigte sich, dass der verwendete Laser nicht zur Erfassung der Fahrbahnmakrotextur auf nasser Fahrbahn geeignet ist (diese Einschränkung gilt auch für das Topometrische Messverfahren). In Hinblick auf eine mögliche autarke Texturerfassung innerhalb eines Pkw-gestützten Reibwertvorhersagesystems muss daher von dem Einsatz eines Lasersensors Abstand genommen werden.

Zur Beschreibung der Mikrotextur steht kein direkter Kennwert zur Verfügung. Daher finden Kennwerte Verwendung, die die Auswirkung der Mikrotextur auf den Gleitreibwert bei Nässe beschreiben. Um eine Vergleichbarkeit der Testfahrbahnen mit unter Verkehr liegenden Straßen zu erhalten, bietet sich die Messung von SRM/BFC- bzw. SCRIM-Werten an. Zur genauen Betrachtung der Wechselwirkung zwischen Mikrotextur und Adhäsionsreibung muss allerdings die Messgeschwindigkeit gering gewählt werden. Deshalb bietet es sich an, für die folgenden Reibwertmessungen die Fahrbahn ebenfalls durch den Gleitreibwert bei 20km/h und feuchter Oberfläche zu beschreiben.

Für zukünftige Forschungsarbeiten sei an dieser Stelle die Entwicklung eines direkten Kennwertes zur Beschreibung der Mikrotextur, z.B. unter Verwendung des topometrischen Messverfahrens, angeregt.

Eine Korrelation des BFC_{20} -Wertes mit dem SRT-Wert konnte nicht festgestellt werden.

3.3 Bestimmung der Wasserfilmdicke

Neben der Fahrbahnoberfläche ist der Einfluss der Fahrbahnnässe bzw. der Wasserfilmdicke Ziel intensiver Forschungen. Hierbei entsteht jedoch oft das Problem der Definition und Messung derselben. So wird oft von Wasserfilmdicke, Wasserfilmtiefe und rechnerischer Wasserfilmhöhe gesprochen. Des weiteren erfolgt die Bestimmung der Wasserfilmdicke tastend oder berührungslos, stationär oder mobil, direkt oder durch Berechnung. Um im folgenden einen exakten Gebrauch der Begriffe und eine Vergleichbarkeit der Messungen innerhalb des VERT-Projektes zu ermöglichen, soll an dieser Stelle zunächst die verwendete Nomenklatur definiert werden, siehe **Abbildung 54**.

Die Wasserfilmtiefe, im folgenden WD (**W**ater **D**epth) genannt, gibt die Höhe eines Wasserfilms oberhalb des mittleren Profils an. Dieser Wert stimmt mit der rechnerischen Wasserfilmtiefe überein, die ermittelt wird, indem das aufgebrachte Wasservolumen durch die projizierte Fahrbahnoberfläche dividiert wird.

Die WT (**Water Thickness**) bezeichnet die Wasserfilmdicke. Diese stellt die Wasserfilmhöhe oberhalb der Texturkörner (Aggregate) dar, so dass bei $WT = 0\text{mm}$ ausschließlich vereinzelte Texturspitzen aus der Wasseroberfläche ragen.

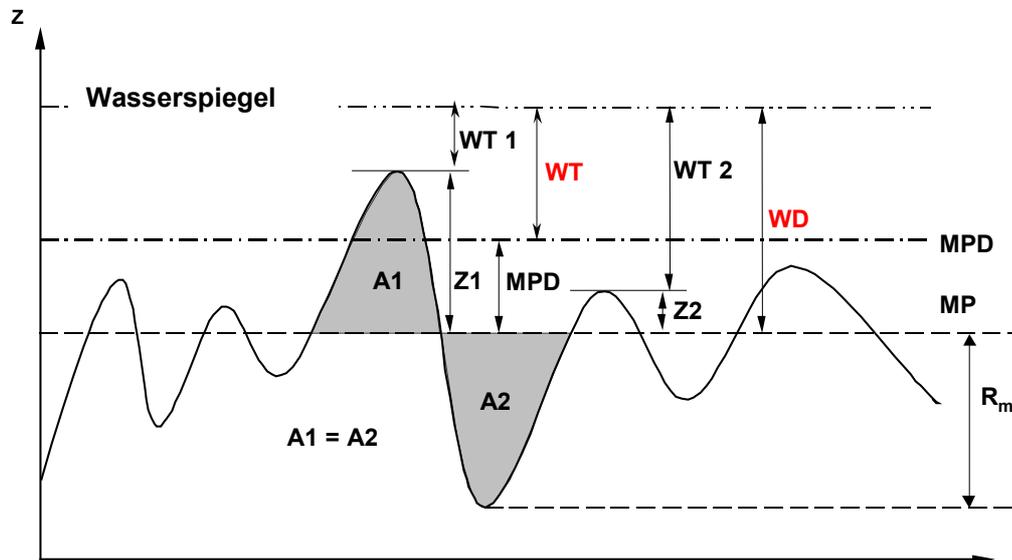


Abbildung 54: Definition von Wasserfilmdicke WT und -tiefe WD
Definition of water thickness WT and water depth WD

Rechnerisch ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$WT = WD - MPD \quad (20)$$

Um nun die Wasserfilmtiefe bzw. Wasserfilmdicke erfassen zu können sind grundsätzlich verschiedene Sensorprinzipien denkbar:

Stationär / mit Kontakt

- Mechanische Tastspitze
- Elektrische Tastspitze (Widerstandsänderung zwischen zwei Elektroden)
- Kapazitive Messung

Stationär / kontaktlos

- Optische Messung der Tropfengröße und/oder der Ausbreitungswellen
- Optische Messung nach dem Reflexionsprinzip (durch den Vergleich von Streu- und Reflexionslicht)
- Optische Messung nach dem Absorptionsprinzip

Bestimmung der Wasserfilmdicke

Mobil / kontaktlos

- Drucksensoren zur Erfassung von Wassertropfen auf Windschutzscheibe oder Radhaus
- Beschleunigungssensoren im Radhaus (Körperschallmessung durch auftreffende Wassertropfen)
- Optische Messung nach dem Reflexionsprinzip - durch den Vergleich von Streu- und Reflexionslicht auf der Fahrbahn oder dem abrollenden Reifen
- Optische Messung nach dem Reflexionsprinzip - mittels Lasertriangulation auf der Fahrbahnoberfläche
- Optische Messung nach dem Absorptionsprinzip

Um den Sensor auch in einem Fahrzeugsystem einsetzen zu können, wurde ein mobiles System benötigt. Aufgrund der positiven Erfahrungen mit auf dem Absorptionsprinzip basierender Sensorik innerhalb des PROMETHEUS-Projekts [5] werden im folgenden zwei auf diesem Prinzip basierende Sensoren näher untersucht.

3.3.1 Absorptionssensor AS

Der Absorptionssensor AS wurde im Rahmen des PROMETHEUS-Projekts am Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der TU Stuttgart IKFF entwickelt [68]. Durch unterschiedliche Auswerteprozesse erlaubt er eine Eisdetektion und die Bestimmung der Wasserfilmtiefe in den Messbereichen 0-1mm und 0-10mm. Bei den Messungen innerhalb dieser Untersuchung wurde jedoch nur der Messbereich von 0-10mm genutzt. Die technischen Daten des Sensors sind wie folgt, **Tabelle 10**:

Lichtquelle: Halogenlampe (\varnothing Sensorspot = 200 mm)

Leistung: 50W

Detektoren: 4 Germanium Photodioden

Wellenlängen: 1080 nm

1190 nm

1410 nm

1510 nm

Einbauhöhe: mind. 400 mm

Messentfernung: 1000 – 1500 mm

Sensorneigung: 35 Grad

Messbereich: 0 bis 10 mm Wasser

Eis (qualitativ)

Abtastfrequenz: 100 Hz

Sensorabmaße: 120 * 200 * 155 mm (B *H *T)

Tabelle 10: Technische Daten des Absorptionssensors [68]
 Technical details of absorption sensor

Die genutzten Wellenlängen des Sensors liegen im Bereich des nahen Infrarotlichts. In diesem Wellenlängenfenster besitzt Wasser einen stark variierenden Transmissionsgrad, siehe **Abbildung 55**.

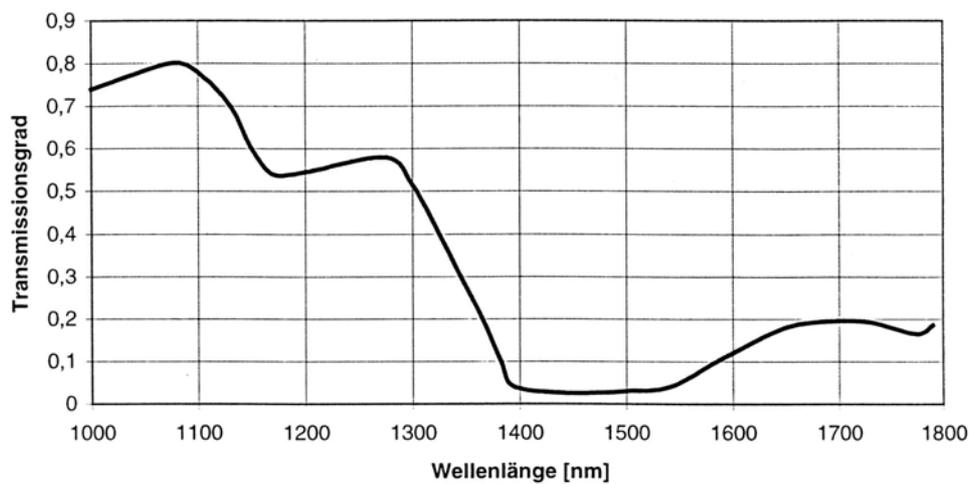


Abbildung 55: Transmissionsgrad von Wasser in Abhängigkeit von der Lichtwellenlänge [5]
 Transmission of water depending on length of light wave

Damit ist es möglich, durch Vergleich der Strahlungsstärken zweier unterschiedlicher Wellenlängen die gesuchte Wasserfilmtiefe zu bestimmen. Die Bestimmung erfolgt nach folgender Berechnung [68]:

$$WD = \frac{1}{\alpha_{\lambda 2} - \alpha_{\lambda 1}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\cos \gamma_{1\lambda}} + \frac{1}{\cos \gamma_{2\lambda}}} \cdot \left[\ln \frac{\rho_{d12\lambda 2}}{\rho_{d12\lambda 1}} + \ln \frac{\phi_{eA2\Delta\lambda 1}}{\phi_{eA2\Delta\lambda 2}} \right] \quad (21)$$

- mit: α_{λ} materialspezifische Eigenschaften von Wasser (Absorptionskoeffizient)
- γ Geometrien des Fahrbahn-Sensor-Systems
- Φ Strahlstärken /-leistungen
- ρ fahrbahnspezifische Größen

Bestimmung der Wasserfilmdicke

Durch Berücksichtigung der o.g. Bedingungen und unter der Annahme, dass in diesen Bereichen die Fahrbahn als grauer Strahler wirkt, vereinfacht sich die Berechnungsformel zu:

$$WD = \frac{\ln \frac{\phi_{eA2\Delta\lambda 1}}{\phi_{eA2\Delta\lambda 2}}}{2(\alpha_{\lambda 2} - \alpha_{\lambda 1})} \quad (22)$$

Dies bedeutet, dass die gesuchte Wasserfilmtiefe direkt durch die gemessenen Strahlungsstärken und durch Berücksichtigung der Absorptionsgrade von Wasser bei verschiedenen Wellenlängen bestimmt werden kann.

Die von der Lichtquelle ausgesandte Strahlungsstärke Φ_0 teilt sich beim Auftreffen auf die Wasseroberfläche und durch diffuses Reflektieren an der Fahrbahnoberfläche in folgende Anteile auf:

$$\Phi_0 = \Phi_\rho + \Phi_\alpha + \Phi_\tau \quad (23)$$

mit: Φ_ρ an der Wasseroberfläche reflektierter Anteil

Φ_α von der Wasserschicht absorbiertes Anteil

Φ_τ transmittierter Anteil

Die Aufteilung des Lichtstrahls in verschiedene Komponenten ist in **Abbildung 56** dargestellt (siehe auch **Kapitel 3.2.1.2**).

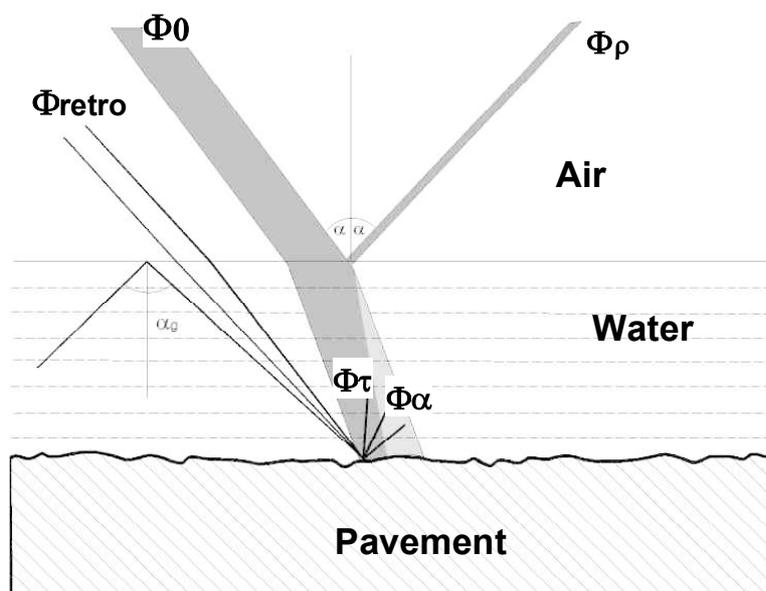


Abbildung 56: Aufteilung des Lichtstrahls [5]
Division of light beam

Der retroreflektierte Teil von $\Phi\tau$, der in Richtung Sensor zurückgeworfen wird, wird mittels wellenabhängiger Detektoren erfasst und durch eine nachgeschaltete Signalverarbeitungseinheit ausgewertet. Hierfür nutzt man je nach Messbereich unterschiedliche Wellenlängen: zur Ermittlung sehr dünner Wasserschichten (Bereich 0-1mm) wird die Summe der Signale, bei denen Wasser einen hohen Absorptionsgrad besitzt (1420 und 1510nm) als Messsignal verwendet. Das Referenzsignal liegt im Bereich von 1300nm. Der Vergleich der Signale bei 1420 und 1510nm ermöglicht die Eiserkennung. Der für diese Arbeit genutzte Messbereich von 0-10mm verwendet als Messsignal die Wellenlänge 1190nm. Als Referenzwellenlänge dient das Absorptionsminimum bei 1080nm.

Im Folgenden wurde der Absorptionssensor, siehe **Abbildung 57**, bezüglich der Einsatzmöglichkeiten auf realen Fahrbahnen untersucht. Schwerpunkt hierbei waren die Abhängigkeit des Sensorsignals von der Farbe des Untergrunds und der Textur der Fahrbahn.

Das Messdatenerfassungssystem zur Durchführung der Versuche setzt sich zusammen aus dem Sensor samt externer Signalverarbeitungseinheit, einer Dockingstation mit Messdatenerfassungskarten und einem Notebook mit Messdatenerfassungssoftware.

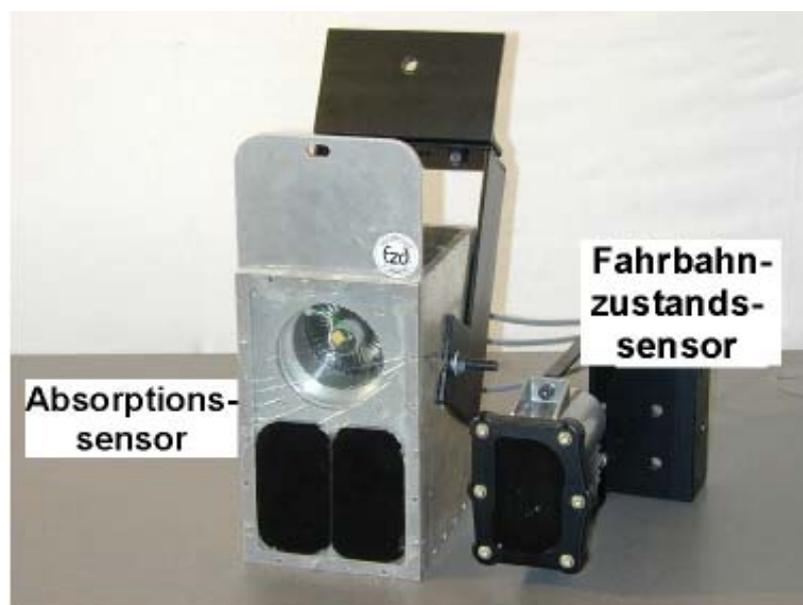


Abbildung 57: Absorptions- und Fahrbahnzustandserkennungssensor
Absorption and road condition sensor

In einem ersten Schritt wurden zunächst Keramikkacheln mit einer sehr glatten, ebenen Oberfläche verwendet und diese schwarz, weiß und grau eingefärbt. Anschließend wurden auf einem Prüfstand des Fachgebiets Wasserfilmdicken von 0 bis 10mm eingestellt und das Sensorsignal aufgezeichnet. Hierbei ergaben sich sowohl große

Bestimmung der Wasserfilmdicke

Abweichungen der einzelnen Verläufe gegenüber dem Idealverlauf als auch deutliche Abweichungen der Signalverläufe untereinander. Dies zeigt zum einen den Einfluss der Oberflächenfarbe, bzw. -helligkeit auf das Sensorsignal. Zum anderen bewirkt die sehr glatte, stark reflektierende Kacheloberfläche, dass keine ideal diffuse Reflektion entsteht und nur ein sehr geringer retroreflektierter Anteil am Sensor erfasst werden kann.

Um dieses Ergebnis bezüglich der Übertragbarkeit auf reale Straßen zu überprüfen, wurden Fahrbahnproben beschafft und diese bezüglich ihrer Makrotextur mittels Laserprofilometer (Lasertriangulation) vermessen, siehe **Kapitel 3.2.1.2**: Asphalt 1 – MPD = 1,03mm, Asphalt 2 – MPD = 0,91mm und Beton – MPD = 0,50mm. Der Beton unterscheidet sich sowohl durch seine sehr geringe Makrotextur als auch durch seine helle Oberflächenfarbe deutlich von den beiden Asphaltproben.

Sämtliche Fahrbahnstücke wurden im Prüfstand horizontal ausgerichtet und die Wasserfilmtiefe in 0,5mm Schritten erhöht. Dabei zeigte sich folgender Verlauf, siehe **Abbildung 58**.

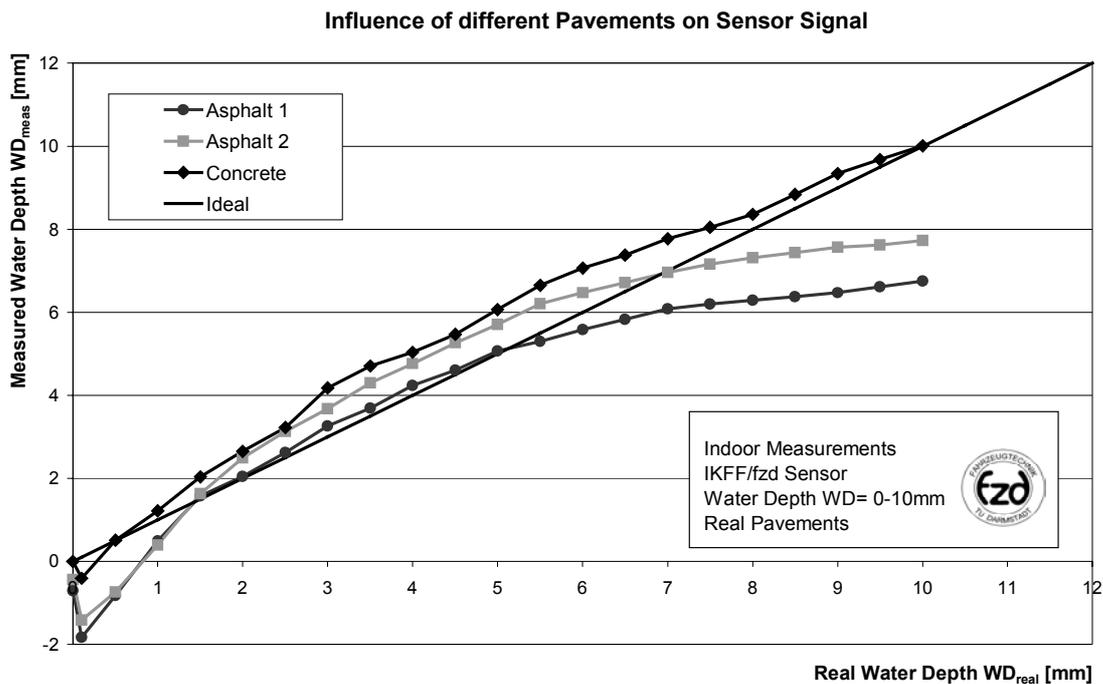


Abbildung 58: Einfluss verschiedener Oberflächen auf das Sensorsignal
Influence of different pavements on sensor signal

Im Bereich von Wasserfilmen kleiner 1mm fällt das Sensorsignal zunächst ab und gibt eine negative Wasserfilmtiefe an. Dieses Phänomen stimmt mit den Beobachtungen von [68] überein. Worauf dieser Abfall zurückzuführen ist, konnte im Verlauf dieser Arbeit nicht endgültig geklärt werden. Eine mögliche Erklärung wäre, dass sich die Fahrbahnfarbe gegenüber dem trockenen Zustand stark verdunkelt, der Sensor jedoch

auf das Signal der hellen Oberfläche kalibriert wurde. Dafür würde auch die Tatsache sprechen, dass das Wassertiefensignal bei der helleren Betonoberfläche deutlich geringer in den negativen Bereich abweicht.

Die Reproduzierbarkeit der Messungen ist unabhängig von der Art der Oberfläche sehr hoch, siehe **Abbildung 59**. Um sämtliche Messungen (pro Fahrbahnprobe jeweils drei) in einem Diagramm darstellen zu können, wurden die gemessenen Wasserfilmtiefen auf der Asphaltprobe 2 und der Betonoberfläche um 0,5mm, bzw. 1mm nach oben verschoben. Die größte Standardabweichung ergibt sich bei der Asphaltprobe 2 im Bereich von 2mm realer Wasserfilmtiefe und liegt bei $\sigma_x = 0,155\text{mm}$.

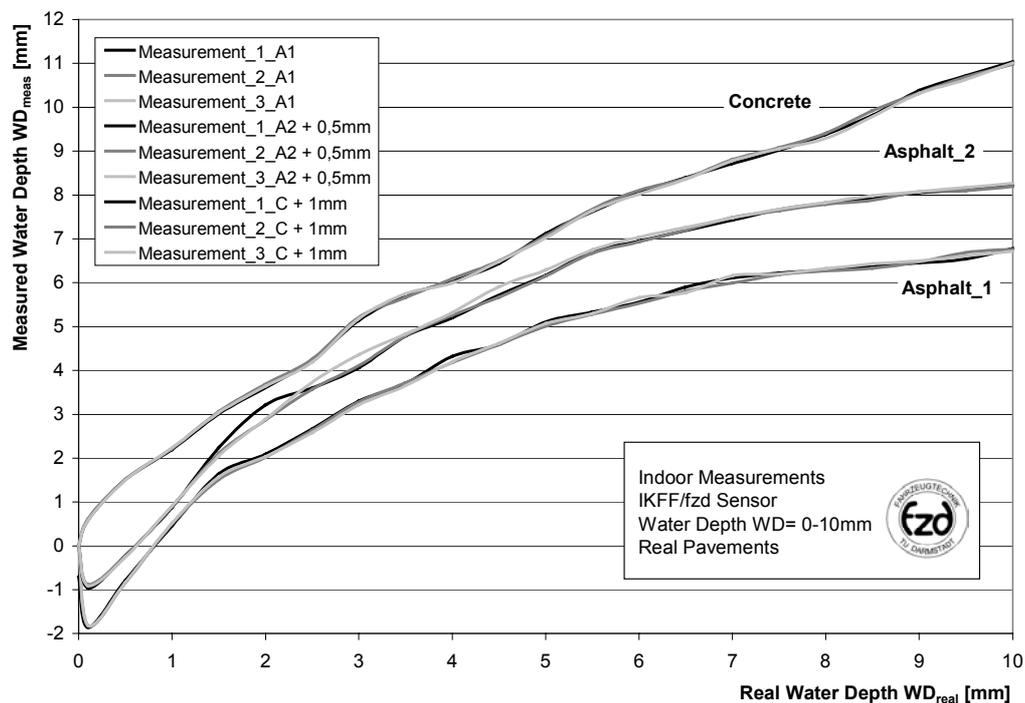


Abbildung 59: Reproduzierbarkeit der Wassertiefenmessungen
Reproducibility of water thickness measurements

Um eine bessere Übereinstimmung von gemessener und realer Wasserfilmtiefe zu erhalten, wurden für die Asphalt- und die Betonfahrbahn Korrekturfunktionen aufgestellt. Diese ergaben sich aus der Approximation der Messreihen durch Polynome zweiter Ordnung und der anschließenden Bildung der Umkehrfunktionen. Dies wurde sowohl für die dunklen Asphalte als auch für die helle Betonprobe durchgeführt:

Trendpolynom für Asphalt (Bestimmtheitsmaß 99,32%):

$$WD_{mess} = -0,101 \cdot WD_{real}^2 + 1,879 \cdot WD_{real} - 1,127 \quad (24)$$

Bestimmung der Wasserfilmdicke

Daraus folgt die Korrekturformel für Asphalt zu:

$$WD_{real} = 3,216 \cdot (-1) \cdot \left(\sqrt{6,851 - WD_{mess}} - 2,787 \right) + 0,3 \quad (25)$$

Trendpolynom für Beton (Bestimmtheitsmaß 99,76%):

$$WD_{mess} = -0,051 \cdot WD_{real}^2 + 1,505 \cdot WD_{real} + 0,186 \quad (26)$$

Daraus folgt die Korrekturformel für Beton zu:

$$WD_{real} = 4,446 \cdot (-1) \cdot \left(\sqrt{11,001 - WD_{mess}} - 3,346 \right) \quad (27)$$

Der Schwerpunkt der Signalkorrektur lag hierbei auf dem Bereich von Wasserfilmtiefen kleiner 8mm, da dieser für die späteren Messungen bzw. für einen eventuellen Einsatz im Fahrzeug von größerer Bedeutung ist. Das heißt zu Gunsten einer hohen Genauigkeit im unteren Wassertiefenbereich wurde eine Verschlechterung der Genauigkeit bei hohen Wasserfilmen gebilligt, siehe **Abbildung 60**.

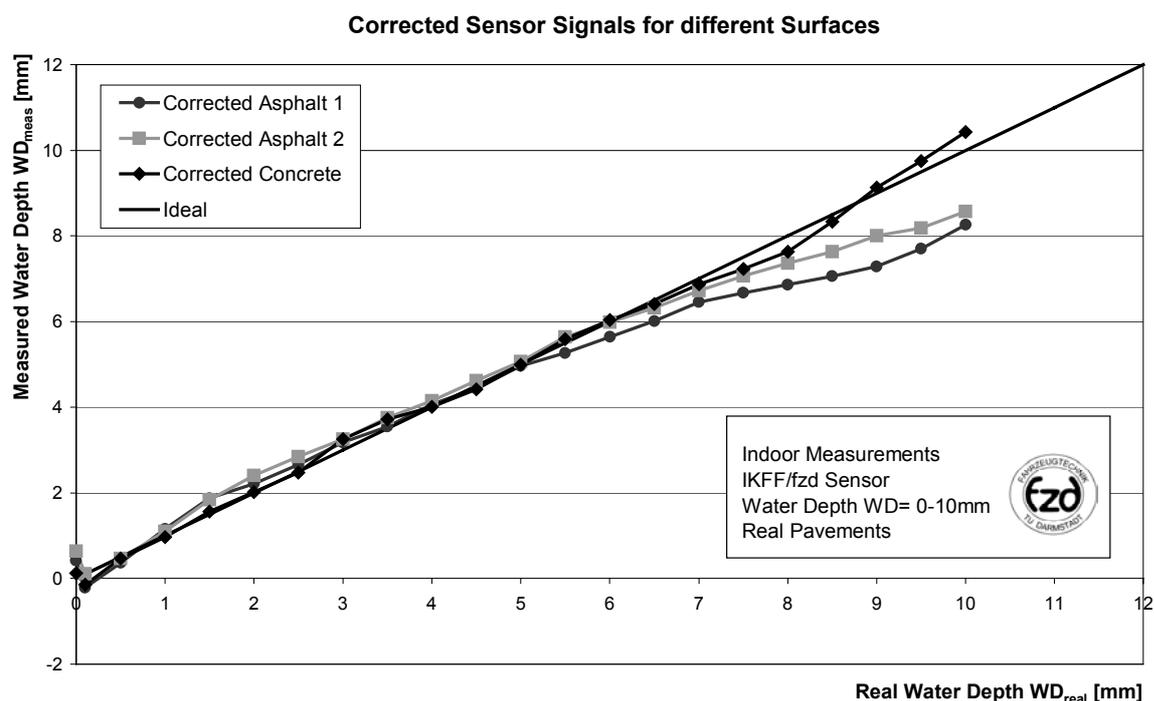


Abbildung 60: Korrigierte Signale bei verschiedenen Oberflächen
Corrected sensor signals for different surfaces

Das Ergebnis der Korrektur zeigt eine deutliche Verbesserung der Anpassungsgüte des Sensorsignals an den idealen Verlauf. Im Bereich zwischen 0,5 und 7mm

Wasserfilmtiefe liegt der maximale prozentuale Fehler auf einer Asphaltfahrbahn bei 5,4%. Dieser erhöht sich allerdings auf bis zu 33% bei einer Wasserfilmtiefe von 9mm. Unterhalb einer Wasserfilmhöhe von 0,5mm ist keine quantitative Aussage über die Wasserfilmtiefe möglich. Jedoch erhält man eine qualitative Aussage darüber, ob die Fahrbahn trocken oder feucht ist.

Auf der Betonfahrbahn fällt das Ergebnis der Korrektur noch positiver aus. So ergibt sich in dem gesamten Bereich von 0,5 bis 10mm ein maximaler Fehler von weniger 3%. In dem Bereich kleiner 0,5mm Wasserfilmtiefe ist ebenfalls nur eine qualitative Aussage über das Vorhandensein von Fahrbahnfeuchte möglich.

Für einen Einsatz dieses Sensors auf unter Verkehr liegenden Fahrbahnen bedeuten diese Ergebnisse, dass dem Sensor bzw. dem Auswertesystem eine Information über die Fahrbahnelligkeit zur Verfügung gestellt werden muss. Nur dann kann die gezielte Korrektur der Daten erfolgen. Eine Möglichkeit, dies zu realisieren, besteht in der Erfassung eines Reflektionssignals, z.B. über eine Photodiode, oder in der Nutzung einer der Fahrbahnelligkeit angepassten Belichtungszeit als Information, siehe **Kapitel 3.3.2**.

Eine Auswirkung der Fahrbahnrauigkeit (Makrotextur) auf die Güte der Wasserfilmtiefenmessung konnte bei diesen Untersuchungen nicht festgestellt werden.

3.3.2 Fahrbahnzustandserkennungssensor FbZS

Basierend auf demselben Prinzip wie der Absorptionssensor wurde beim Prototyp des Fahrbahnzustands-Erkennungssensors FbZS der Firma HELLA KG die Signalverarbeitungselektronik, die beim AS noch eine große Box beansprucht hat, in das Sensorgehäuse integriert. Er wurde speziell im Hinblick auf die Bedürfnisse der Automobilindustrie entwickelt und hat neben seinen kompakten Einbaumaßen gegenüber dem AS zahlreiche Vorteile. So ist er beispielsweise selbstkalibrierend und hat eine deutlich geringere Leistungsaufnahme. Die technischen Daten des Sensors sind wie folgt, **Tabelle 11**:

Lichtquelle:	12V Glühlampe (\varnothing Sensorspot = 50 mm)
Leistung:	10 W
Detektoren:	Photodioden
	Wellenlängenspektrum von 820 bis 1100nm
Einbauhöhe:	200 mm
Sensorneigung:	30 Grad
Messbereich:	Wasser 0 – 25 mm
	Eis (qualitativ)

Bestimmung der Wasserfilmdicke

Auflösung:	0,1mm
Abtastfrequenz:	5 Hz
Sensorabmaße:	80 * 100 * 125 mm (B * H * T)

Tabelle 11: Technische Daten des FbZS
Technical details of FbZS

Bei dem für diese Forschungsaktivitäten zur Verfügung stehenden Sensor handelt es sich um einen Prototypen, bei dem eine Sonnenlichtkompensation noch nicht implementiert ist, weshalb im Messbetrieb auf eine ausreichend abgeschirmte Messfläche geachtet werden muss. Auch ist eine Erkennung von Eis nur qualitativ möglich. Letztere Einschränkung hat jedoch für die hier durchgeführten Untersuchungen keine Auswirkungen. Neben verschiedenen weiteren Signalen des Sensors - so analysiert er beispielsweise das empfangene Lichtspektrum im Bereich von 820 bis 1100nm - stellt dieser auch die Belichtungszeit in Millisekunden zur Verfügung. Um den Energieverbrauch des Sensors möglichst gering zu halten, erfolgt eine Belichtung, die der Fahrbahnhelligkeit angepasst ist. Diese Information kann u. a. zur Erkennung der Fahrbahnart, des Wechsels des Fahrbahnbelags oder zur Erfassung von Fahrbahnmarkierungen genutzt werden.

Im Folgenden werden nun analog zur Vorgehensweise mit dem AS die Möglichkeiten des FbZS untersucht, die Wasserfilmtiefe in Abhängigkeit von unterschiedlichen Fahrbahnfarben und Fahrbahntexturen zu bestimmen.

Zunächst wurden erneut Messungen unter Verwendung der Messkacheln durchgeführt. Auch hier zeigten sich deutliche Abweichungen zwischen den gemessenen und realen Verläufen der Wasserfilmtiefe. Im Gegensatz zum Absorptionssensor lagen diesmal jedoch die Kurven der Messsignale dichter zusammen. Dies bedeutet, dass zwar die Kacheloberfläche Probleme bereitet, die Farb- bzw. Helligkeitskorrektur jedoch funktioniert. Als nächster Schritt fanden erneut die Fahrbahnproben Verwendung. Auch diesmal wurde die Wasserfilmtiefe in 0,5mm Schritten erhöht, siehe **Abbildung 61**.

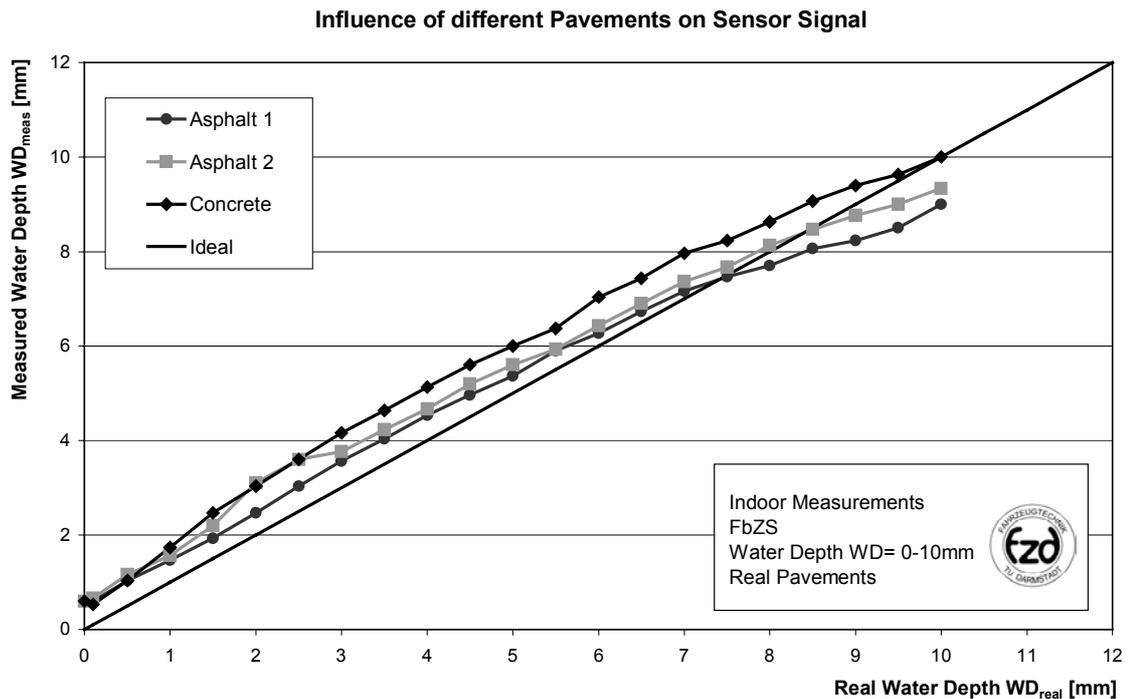


Abbildung 61: Einfluss verschiedener Oberflächen auf das Signal des FbZS
Influence of different surfaces on sensor signal

Wie bereits bei der Messung unter Verwendung der Kacheln kann auch hier festgestellt werden, dass die Verläufe der Messsignale deutlich näher beieinander liegen, als es bei dem AS der Fall war: Dies liegt daran, dass die interne Helligkeitskorrektur das unterschiedliche Reflektionsverhalten berücksichtigt und dementsprechend die Belichtungszeit anpasst.

Bezüglich der Signalqualität bleibt jedoch festzuhalten, dass der Sensor bis zu Wasserfilmtiefen von 8mm stets höhere Werte ausgibt, als real vorhanden sind. Dies bewirkt im Bereich geringer Wasserhöhen ($WD < 2\text{mm}$) Fehler von über 50%.

Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit des FbZS sind in **Abbildung 62** analog zu den Messungen mit dem AS jeweils drei Messungen auf drei unterschiedlichen Fahrbahnoberflächen dargestellt. Auch beim FbZS zeigt sich eine gute Reproduzierbarkeit der Messungen. Jedoch fallen die stärkeren Schwankungen der Messsignale vor allem bei der Betonprobe auf. Dies äußert sich auch in der höheren Standardabweichung von $\sigma_x = 0,216\text{mm}$.

Bestimmung der Wasserfilmdicke

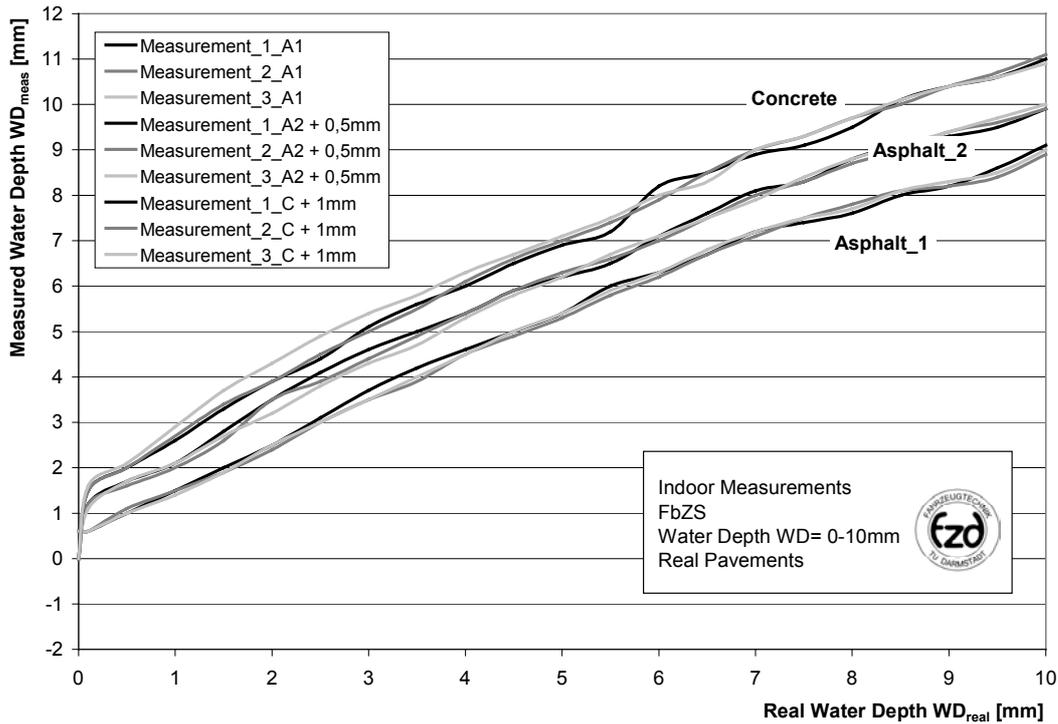


Abbildung 62: Reproduzierbarkeit der Wassertiefenmessungen mit FbZS
Reproducibility of water thickness measurements (FbZS)

Um die Messsignalgüte zu erhöhen werden, wie zuvor für den AS, Korrekturfunktionen für die Asphalt- und Betonfahrbahnprobe bestimmt. Auch hier ergaben Polynome zweiter Ordnung die beste Approximation der Messdaten. Die anschließende Bildung der Umkehrfunktion ergibt folgende Korrekturformeln:

Trendpolynom für Asphalt (Bestimmtheitsmaß 99,83%):

$$WD_{mess} = -0,027 \cdot WD_{real}^2 + 1,145 \cdot WD_{real} + 0,607 \quad (28)$$

Daraus folgt die Korrekturformel für Asphalt zu:

$$WD_{real} = 6,086 \cdot (-1) \cdot \left(\sqrt{12,756 - WD_{mess}} - 3,486 \right) \quad (29)$$

Trendpolynom für Beton (Bestimmtheitsmaß 99,93%):

$$WD_{mess} = -0,034 \cdot WD_{real}^2 + 1,287 \cdot WD_{real} + 0,516 \quad (30)$$

Daraus folgt die Korrekturformel für Beton zu:

$$WD_{real} = 5,423 \cdot (-1) \cdot \left(\sqrt{12,706 - WD_{mess}} - 3,492 \right) \quad (31)$$

Die erreichte Übereinstimmung von gemessener und realer Wasserfilmtiefe ist für den gesamten Messbereich des Sensors sehr hoch. Lediglich im Bereich um 2mm Wasserfilmhöhe ergibt sich bei einer Asphaltfahrbahn ein relativer Fehler von 18%. Unter- und oberhalb ist dieser deutlich geringer (kleiner 5%). Bei der Betonfahrbahn ergibt sich ab einer Wasserfilmtiefe von 0,5mm ein maximaler relativer Fehler von 5%. Damit zeigt der Sensor allgemein bei Wasserhöhen größer 0,5mm eine sehr gute Eignung zur Bestimmung der Wasserfilmtiefe, siehe **Abbildung 63**.

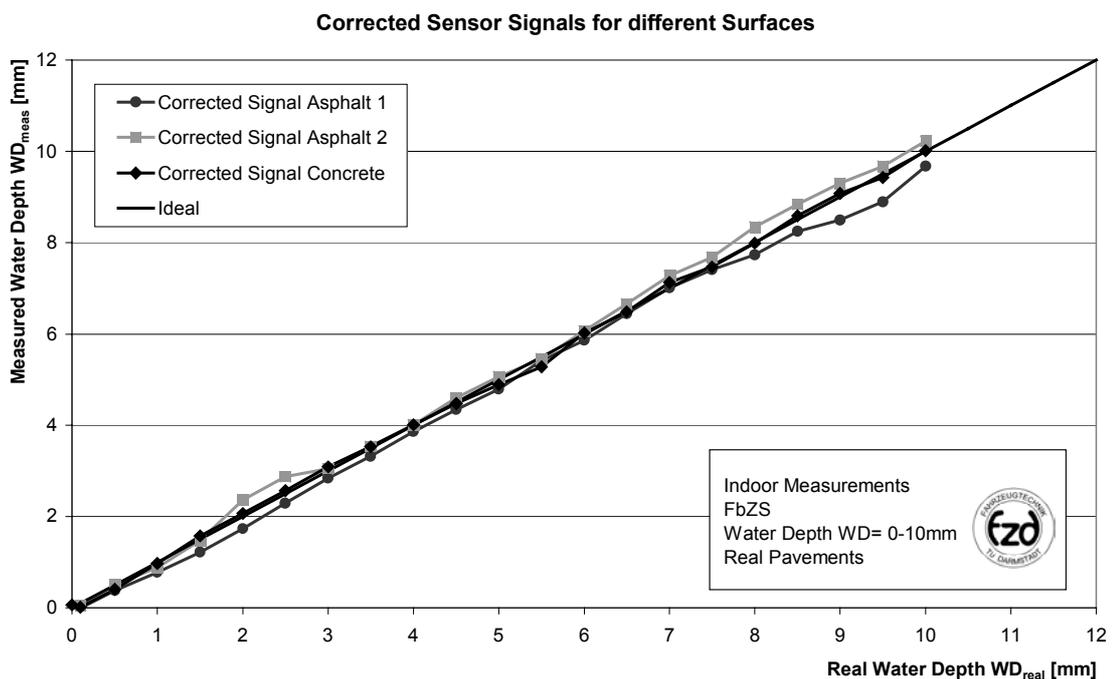


Abbildung 63: Korrigierte Signal bei verschiedenen Oberflächen
Corrected sensor signals for different surfaces

Weniger zufriedenstellend ist das Verhalten des Prototyps jedoch im Bereich unterhalb 0,5mm. Dort gibt der Sensor, bedingt durch einen inneren Offset kein Signal, d. h. im Gegensatz zum AS ist hier weder eine quantitative noch eine qualitative Erkennung von Fahrbahnfläche möglich. Dies ist zur Zeit das Ziel weiterer Entwicklungstätigkeit des Sensorherstellers.

Um die im Labor gewonnenen Ergebnisse auf Messungen auf Versuchsstrecken übertragen zu können, wurden beide Sensoren zunächst in den Messanhänger PETRA implementiert. Hierbei galt es vor allem sicherzustellen, dass eine ausreichende Abschirmung des Sensor-Strahlengangs gegenüber Sonnenlicht gewährleistet war, ohne die Wasserschicht zu verdrängen. Es wurde daher ein Gehäuse gewählt, das den Strahlengang großzügig abschirmt, in der Nähe der Wasseroberfläche mit dichten

Bestimmung der Wasserfilmdicke

Bürsten bestückt ist und einen ca. 20mm hohen Spalt zwischen Fahrbahn und Bürstenunterseite gewährleistet.

Mit diesem System und unter Verwendung des FbZS wurde nun zunächst auf einer Versuchsfahrbahn, die eine stationäre Bewässerungseinrichtung besitzt, das Wassertiefenprofil der Strecke bei Schrittgeschwindigkeit aufgezeichnet, siehe **Abbildung 64**.

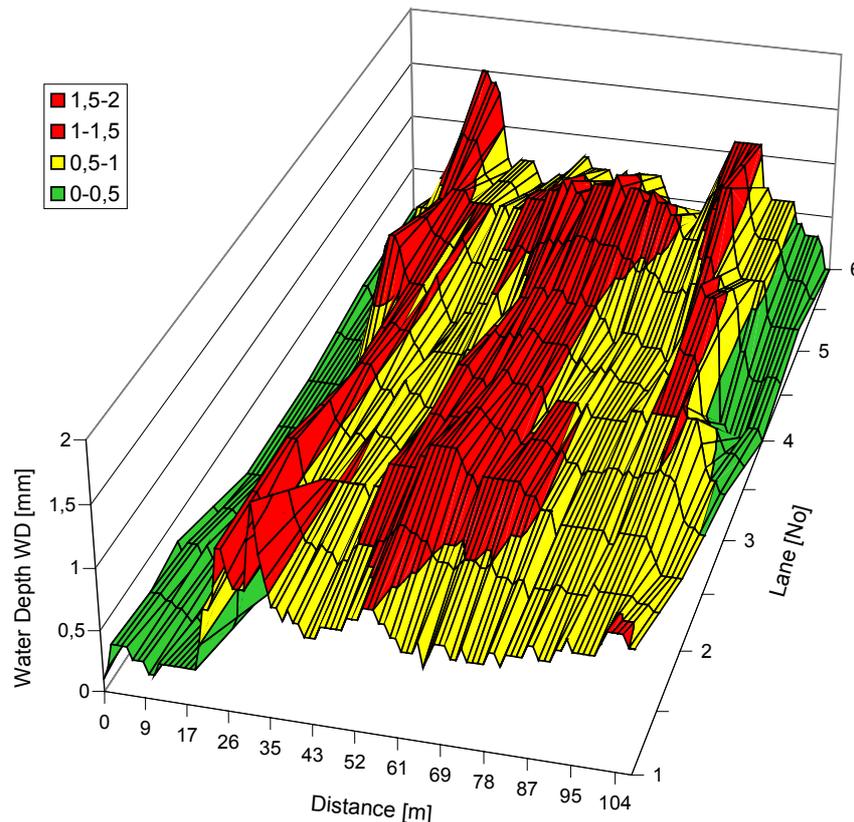


Abbildung 64: Vermessung der Wasserfilmdicke einer Teststrecke
Measurement of water thickness on test track

Damit ergibt sich zum einen die Möglichkeit, die neuen Ergebnisse mit bisherigen Untersuchungen auf dieser Strecke zu vergleichen. Zum anderen können die durchzuführenden Reibwert- und Bremsverzögerungsmessungen der aktuellen Wasserfilmtiefe zugeordnet werden. Wie man sieht, liegt die Höhe des Wasserfilms der Versuchsstrecke zum überwiegenden Teil im Bereich von 0,5 bis 1,5mm. Durch die Berücksichtigung der Texturmessungen und der dabei ermittelten MPD-Werte ergaben sich Wasserfilmdicken von 0,3 bis 0,5mm, d.h. die Fahrbahn war verhältnismäßig gering mit Wasser bedeckt, jedoch ragten keine Texturspitzen aus dem Wasserfilm heraus. Diese Aussage deckt sich mit bisherigen stationären Messungen des Versuchsfahrbahnbetreibers. Es kann somit festgestellt werden, dass der Sensor auch

auf realen Fahrbahnen (in diesem Fall eine Asphaltfahrbahn) die Wasserfilmtiefe sicher erfasst.

Zur Beurteilung der Einsatzmöglichkeit des FbZS in einem schnell fahrenden Fahrzeug wurde die Reaktionszeit des Sensors auf wechselnde Fahrbahnzustände erfasst. Hierzu wurden mehrere 8m lange Teilstücke auf der Versuchsstrecke in Griesheim bewässert. Die trockenen Abschnitte dazwischen hatten jeweils eine Länge von 20m. Diese wechselnden Streckenabschnitte wurden nun bei verschiedenen Geschwindigkeiten abgefahren. Hierbei musste darauf geachtet werden, dass zwischen den einzelnen Messfahrten die Bereiche zwischen den bewässerten Teilstücken stets abtrockneten.

Als Ergebnis dieser Untersuchung stellte sich ein deutlicher Verzug zwischen dem Auftreten einer Fahrbahnzustandsänderung und der Erkennung dieser durch den Sensor heraus. Die Reaktionsdauer betrug jeweils 3 Messwerte, was einer Zeitdifferenz von 0,6s entspricht. Dies ist in Hinblick auf den Einsatz eines solchen Sensors in einem System zur Reibwerterkennung ausgesprochen lang, so dass sich die Forderung nach einer Verringerung der Reaktionszeit und einer Steigerung der internen Abtastrate von zur Zeit 5Hz ergibt.

3.4 Fazit

Mit den auf dem Absorptionsprinzip basierenden Sensoren stehen zwei Messmittel zur Verfügung, die eine zuverlässige Bestimmung der Wasserfilmtiefe erlauben. Der AS ist in der Lage qualitativ zu erkennen, ob die Fahrbahn trocken oder nass ist. In dem Wassertiefenbereich von 0,5 bis 7mm besitzt er einen auf den Messbereich bezogenen Fehler von maximal 5%. Der FbZS erlaubt keine Erkennung von Wasserfilmen kleiner 0,5mm, besitzt jedoch im Messbereich von 0,5 bis 10mm eine hohe Genauigkeit (maximaler Fehler ebenfalls kleiner 5%).

Für beide Sensoren sind Korrekturberechnungen nötig, um den Einfluss unterschiedlich heller Fahrbahnoberflächen auf das Messsignal zu kompensieren. Zur Erkennung verschiedener Fahrbahnen liefert der FbZS eine Belichtungszeit (ca. 49ms bei Betonoberfläche, 66 bis 126ms bei Asphaltoberfläche), welche in einem zukünftigen System zur Autokorrektur genutzt werden kann.

Die beiden Sensoren liefern als Messsignal eine Wasserfilmtiefe, die einen über die Fläche integrierten Wert darstellt und mit der rechnerischen Wasserfilmtiefe (= Wasservolumen / projizierte Fahrbahnoberfläche) übereinstimmt. Um die Wasserfilmdicke, d.h. die Höhe des Wasserfilms oberhalb der Texturaggregate, zu erhalten, ist zusätzlich die Kenntnis der Fahrbahnmakrotextur (MPD) nötig.

Fazit

Der FbZS besitzt in seiner jetzigen Ausführung noch eine Reaktionszeit von 0,6s. Erst nach dieser Zeit hat er die Fahrbahnzustandsänderung registriert und gibt den Messwert für die Wasserfilmtiefe an. Zur Nutzung des Sensors in einem System zur Reibwertvorhersage oder in anderen Fahrerassistenzsystemen ergibt sich die Forderung nach einer Verringerung der Reaktionszeit und einer Erhöhung der Abtastrate.

Im Gegensatz zu z.B. tastenden Messverfahren führt eine Verschmutzung des Wasserfilms bedingt durch das Absorptionsprinzip zu einer Verfälschung des Messergebnisses. So ergab eine starke Trübung des Wasserfilms eine Reduktion der ausgegebenen Wasserfilmdicke um 40%.

Beide Sensoren reagieren empfindlich gegenüber Fremdlicht. Daher wurde bei sämtlichen Versuchen eine Abschirmung der Sensoren und der Strahlengänge verwendet. Für den Einbau im Fahrzeug bedeutet dies die Notwendigkeit einen geeigneten Ort und/oder eine entsprechende Abschirmung vorzusehen.

Von hoher Bedeutung beim Einsatz der Sensoren im Pkw ist der Energiebedarf. Im Gegensatz zu den 50W Leistungsbedarf des AS, stellen die 10W des FbZS eine vertretbare Belastung der fahrzeuginternen Stromversorgung dar.

4 Reibwert- und Beschleunigungsmessungen

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse der Messungen zur Quantifizierung des Einflusses der in **Kapitel 2.1.10** definierten Haupteinflussparameter auf die Reifen-Fahrbahn-Reibung dargestellt und diskutiert. Diese Untersuchungen dienen zum einen der Überprüfung der in der Literatur getroffenen Aussagen bezüglich Art und Größe des Einflusses. Zum anderen sind die Messergebnisse die Datengrundlage zur Entwicklung und Validierung verschiedener Modelle, die eine Bestimmung des Kraftschlusspotentials ermöglichen sollen.

Die Ergebnisse basieren auf Messungen der im VERT-Projekt beteiligten Partner. Die Versuche wurden jeweils mit den Messsystemen der einzelnen Partner auf folgenden Versuchsfahrbahnen durchgeführt:

Partner	Messsystem	Fahrbahn (Bezeichnung; Texturkenngößen)
CETE	C 35	BB 0/10; MPD = 0,58mm; BFC ₂₀ = 0,58
CETE	C 35	ES; MPD = 0,56mm; BFC ₂₀ = 0,86
fzd	PETRA	Taxiway/s; MPD = 0,59mm; BFC ₂₀ = 0,69
fzd	PETRA	Taxiway/r; MPD = 0,68mm; BFC ₂₀ = 0,72
fzd	PETRA	Runway; MPD = 0,77mm; BFC ₂₀ = 0,60
fzd	PETRA	P/Bl; MPD = 0,51mm; BFC ₂₀ = 0,72
fzd	PETRA	P/Br; MPD = 0,48mm; BFC ₂₀ = 0,64
Pirelli	Tire Test Trailer	F1; MPD = 0,85mm
TRL	ASTM-Trailer	HRA; MPD = 1,96mm; BFC ₂₀ = 0,55
VTI	BV 12	DAC 16; MPD = 0,95mm; BFC ₂₀ = 0,66

Tabelle 12: Messsysteme und Fahrbahnen der VERT – Partner
Measuring devices and test tracks of VERT partner

Um eine Vergleichbarkeit der in VERT gemessenen Reibwertdaten zu erhalten, wurden in einem ersten Schritt die Ergebnisse, die innerhalb des P.I.A.R.C.-Experiments [2]

Reibwert- und Beschleunigungsmessungen

gesammelt wurden, genutzt. D.h. es wurden Übertragungsfunktionen zwischen den am Experiment beteiligten und den Nachfolgemesssystemen gebildet. Dies fand jeweils bei den einzelnen Partnern statt. Desweiteren wurde es dadurch möglich, indirekt auch die aktuellen Messsysteme miteinander zu vergleichen, siehe **Abbildung 65**.

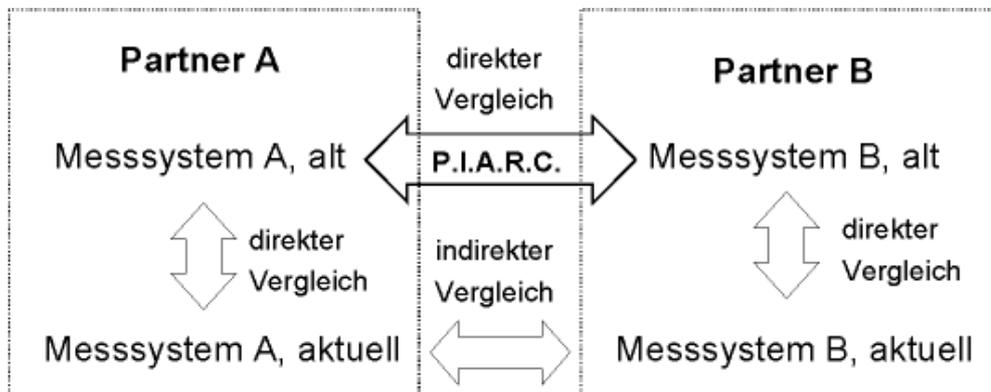


Abbildung 65: Vergleich der Messsysteme
Comparison of measuring devices

Zusätzlich wurden in Vizzola Vergleichsmessungen des Pirelli Tire Test Trailer mit dem PETRA – Messanhänger durchgeführt.

Durch diese Maßnahmen ist grundsätzlich eine Vergleichbarkeit der Messsysteme gegeben und systematische Fehler (z.B. Offset, Linearitäts- und Steigungsfehler) können verringert werden. Jedoch existieren nach wie vor zufällige Fehler und Messungenauigkeiten, die auch von den Randbedingungen (z.B. gewählte Radlast, Wasserfilmtiefe und Geschwindigkeit) abhängig sind. Diese lassen sich nicht ausschließen und werden bei der nachfolgenden Diskussion der Messergebnisse berücksichtigt.

Eine weitere Einschränkung ergab sich aus den unterschiedlichen Variationsbereichen von beispielsweise Radlast und Geschwindigkeit der einzelnen Systeme. Daher musste zum einen darauf geachtet werden, dass eine ausreichende Schnittmenge von Messungen mit identischen Randbedingungen zur Verfügung steht. Zum anderen sollten natürlich auch Extrembereiche, wie z.B. eine sehr große Wasserfilmtiefe, abgedeckt werden. Aus diesem Grund gibt es nicht für jede Parameterkombination eine Messreihe von jedem Partner.

Die folgende Auswertung der Messergebnisse und die Quantifizierung der Einflüsse der verschiedenen Parameter geschah am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt.

4.1 Einfluss der Fahrbahn

Um den Einfluss der Fahrbahn zu bestimmen, wurden auf den verschiedenen Teststrecken, die sich teilweise sehr deutlich bezüglich ihrer Mikro- und Makrotextur, d.h. in ihren BFC₂₀- und MPD-Werten unterscheiden (siehe **Tabelle 12**), Reibwertmessungen durchgeführt. Dabei galt es zunächst, den Einfluss der Fahrbahntexturen in Abhängigkeit von den variierten Randbedingungen zu quantifizieren.

Die beiden Fahrbahnen, auf denen die Reibwertmessungen von *fzd* durchgeführt wurden, haben die folgenden Texturkennwerte: MPD_{Taxiway, smooth} = 0,59mm (Streubreite: 0,50mm bis 0,64mm) und MPD_{Taxiway, rough} = 0,68mm (Streubreite: 0,62mm bis 0,77mm), ermittelt aus jeweils 46 Einzelmessungen. Des Weiteren wurden aus jeweils sechs Einzelmessungen mit PETRA der BFC₂₀-Wert ermittelt: BFC_{20,Taxiway, smooth} = 0,69 (Streubreite: 0,66 bis 0,71) und BFC_{20,Taxiway, rough} = 0,72 (Streubreite: 0,70 bis 0,74).

In **Abbildung 66** sind die Maximalreibwerte in Längsrichtung bei trockener und nasser Fahrbahn über der Makrotextur aufgetragen. Da nach den Theorien der Reibungsmechanik die Hysteresekomponente, die maßgeblich durch eine grobe Makrotextur angeregt wird, hohe Gleitgeschwindigkeiten zur Aktivierung benötigt, wurde eine Geschwindigkeit von 80km/h gewählt. Der Wasserfilm der nassen Fahrbahn beträgt 3mm. Dieser unterdrückt nahezu vollständig die Adhäsionskomponente (siehe Kapitel 2.1.3).

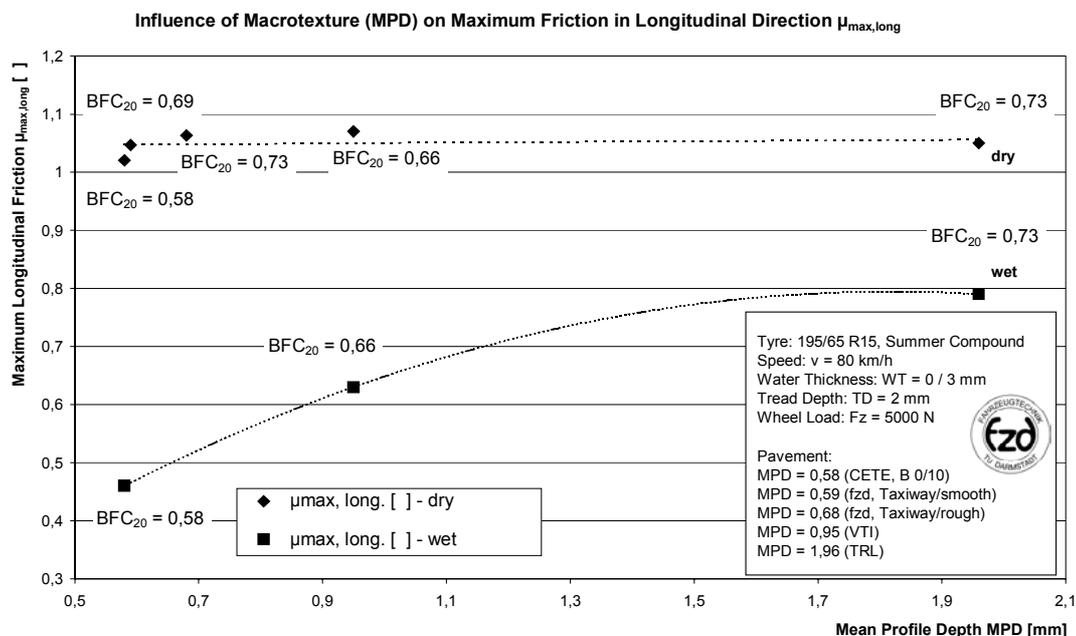


Abbildung 66: Einfluss der Makrotextur auf den Maximalreibwert in Längsrichtung
Influence of macrotecture on maximum friction in longitudinal direction

Einfluss der Fahrbahn

Betrachtet man die Messwerte für die trockene Fahrbahn, so ist deutlich zu erkennen, dass die Makrotextur nahezu keinen Einfluss auf die Höhe des Maximalreibungswerts hat. Die Messwerte liegen innerhalb eines sehr schmalen Wertebereichs auf gleichem Niveau. Selbst extrem grobe Fahrbahnen wie der „Hot Rolled Asphalt“ mit einer MPD von 1,96mm bewirken keine Erhöhung des Maximalreibungswerts. Diese Erkenntnis steht im Widerspruch zu Literaturstellen, die, durch Verzahnungseffekte von Reifen und Fahrbahn, auch auf trockenen Oberflächen eine hohe Bedeutung der Makrotextur beimessen.

Auf der nassen Fahrbahn ergibt sich jedoch ein komplett anderes Bild. Obwohl bei diesen Randbedingungen weniger Messungen zur Verfügung standen, zeigt sich eindeutig der Anstieg der Maximalreibungswerte mit Zunahme des MPD-Wertes. Dieser fahrbahnzustandsabhängige Einfluss der Fahrbahngröblichkeit war bei sämtlichen durchgeführten Messungen zu beobachten. Besonders signifikant wird er auf nasser Fahrbahn bei Reifen mit geringer Profiltiefe, da dann zusätzlich zur Reibungshysterese das Drainagevermögen der Fahrbahn verstärkt an Bedeutung gewinnt.

Um den Einfluss der Mikrotextur zu beschreiben, wurden Messungen bei einer Geschwindigkeit von 20km/h auf trockener und nasser Fahrbahn durchgeführt. Um die Verzahnungseffekte (zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche) gegenüber der zuvor dargestellten Messung zu verringern, wurde die Radlast von 5000 auf 3000N reduziert, siehe **Abbildung 67**.

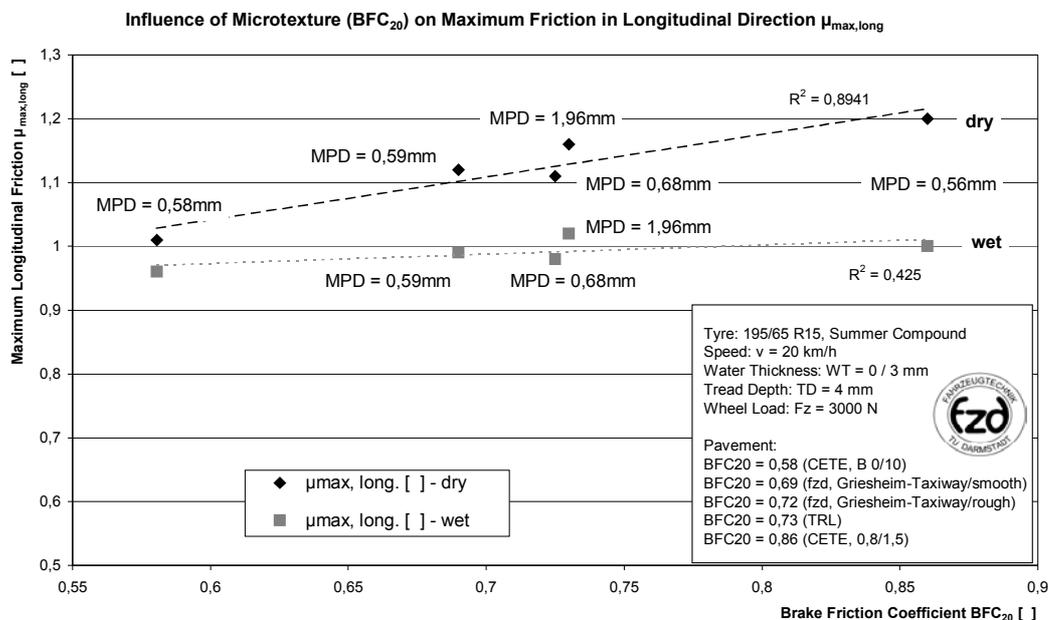


Abbildung 67: Einfluss der Mikrotextur (BFC₂₀) auf den Maximalreibungswert in Längsrichtung
 Influence of microtexture (BFC₂₀) on maximum friction in longitudinal direction

Betrachtet man die Maximalreibwerte, aufgetragen über dem BFC_{20} -Wert, so ergibt sich auf trockener Fahrbahn ein deutlicher Anstieg der Reibwerte bei Zunahme der Fahrbahnschärfe. Dieser Anstieg ist unabhängig von den MPD-Werten. Der Unterschied zwischen dem Maximalreibwert bei einem BFC_{20} -Wert von 0,58 und dem bei 0,86 Reibwerteinheiten liegt bei über 15%. Dies ist in Anbetracht der ansonsten konstanten Randbedingungen ein erstaunlich hoher Wert.

Auf nasser Fahrbahn bei einer Wasserfilmdicke von 3mm wird die Aktivierung der Adhäsionskomponente fast vollständig unterbunden. Dies zeigt sich deutlich in den Messwerten, die sich unabhängig von dem BFC_{20} -Wert auf einem nahezu identischen Niveau befinden. Bedingt durch die sehr geringe Gleitgeschwindigkeit, wird auch die Hysteresekomponente nur im geringen Maße aktiviert. Deshalb zeigen auch die MPD-Werte kaum einen Einfluss auf die Maximalreibwerte.

Um die Wechselwirkung der Geschwindigkeit mit dem Fahrbahneinfluss näher untersuchen zu können, werden im folgenden die Maximalreibwerte in Längsrichtung über der Geschwindigkeit aufgetragen. Um eine Trennung der Einflüsse von Mikro- und Makrotextur zu erreichen, wird des weiteren versucht, einen dieser Parameter konstant zu halten und ausschließlich den anderen zu variieren.

In **Abbildung 68** sind zwei Messreihen (ermittelt von CETE und TRL) bei einer extrem hohen Wasserfilmdicke und einer sehr geringen Profiltiefe dargestellt. Wie in **Kapitel 2.1** beschrieben, ist bei dieser Konstellation vor allem das Drainagevermögen der Fahrbahn von entscheidender Bedeutung, da gerade bei höheren Geschwindigkeiten die Kanalquerschnitte im Reifen allein nicht ausreichen, um das Wasser aus der Reifenaufstandsfläche zu verdrängen. Um dieses Verhalten zu veranschaulichen, wurden zwei Fahrbahnen verglichen, deren Makrotexturwerte die Extrema der untersuchten Versuchsstrecken darstellen.

Deutlich ist der extreme Abfall des Maximalreibwerts ab einer Geschwindigkeit von 40km/h auf der Fahrbahn mit geringer Makrotextur zu sehen. Bereits bei Geschwindigkeiten kleiner 80km/h tritt Aquaplaning auf ($\mu_{\max, 80} = 0,07$).

Im Vergleich dazu ist der Reibwertabfall auf der Fahrbahn mit der groben Makrotextur deutlich geringer. Der Maximalreibwert bei 80km/h liegt um den Faktor 7 über dem der glatten Oberfläche. Damit bestätigen sich die getroffenen Aussagen bezüglich dem Einfluss der Makrotextur in Verbindung mit hohen Geschwindigkeiten, geringer Profiltiefe und hoher Wasserfilmdicke.

Einfluss der Fahrbahn

Die Reibwertniveaus der beiden Fahrbahnen liegen im Bereich geringer Geschwindigkeiten relativ nah beisammen. Dass die Reibwertdifferenz bei 20km/h nicht noch geringer ausfällt, ist auf die Unterschiede im BFC_{20} -Wert zurückzuführen. Leider befanden sich keine Fahrbahnen auf den Versuchsstrecken, die eine ähnlich große Spreizung der Makrotextur bei gleichem Niveau der Mikrotextur besaßen.

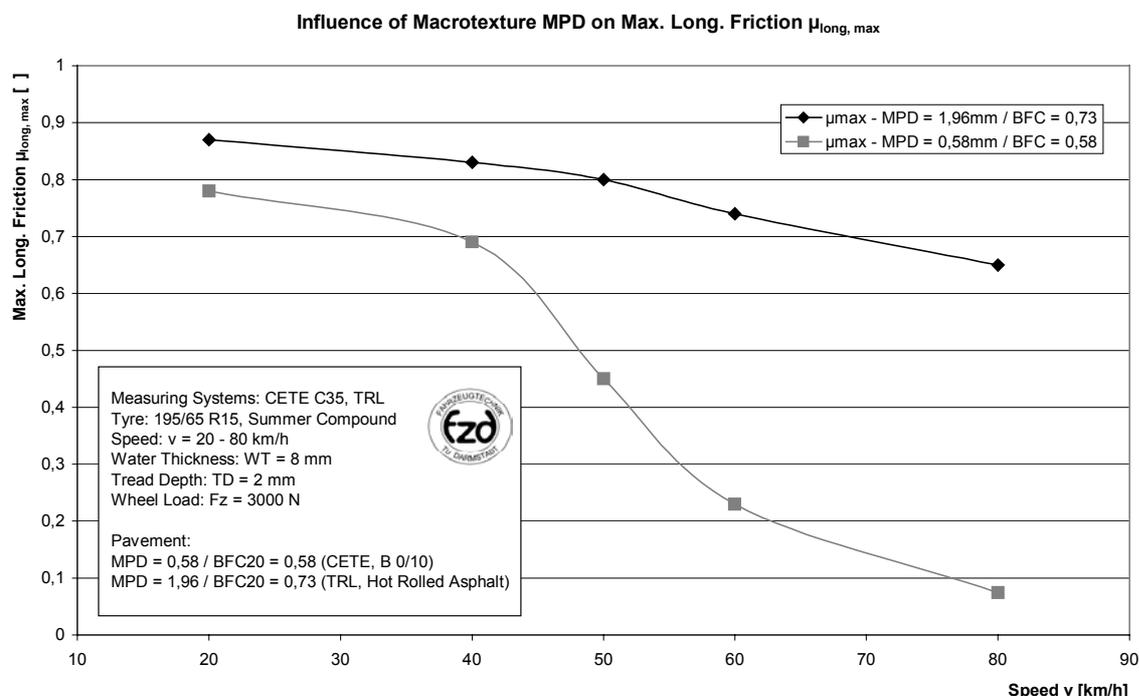


Abbildung 68: Einfluss der Makrotextur auf den Maximalreibwert in Längsrichtung
Influence of macrotexture on maximum longitudinal friction

Um den Einfluss der Mikrotextur näher untersuchen zu können, wurden zwei Fahrbahnen gewählt, deren Makrotextur nahezu identisch ist. Da beide Messreihen außerdem von dem gleichen Messsystem (CETE, C 35) aufgezeichnet und die Randbedingungen konstant gehalten wurden, ist eine exakte Beschreibung des Einflusses der Fahrbahnschärfe möglich. Um zu untersuchen, ob die Mikrotextur auch auf nasser Fahrbahn einen Einfluss auf das Kraftschlusspotential hat, wurde eine Messung mit einer Wasserfilmdicke von 3mm gewählt, siehe **Abbildung 69**.

Im Geschwindigkeitsbereich von 20 bis 40km/h ist eine große Differenz der Maximalreibwerte zu erkennen. Dies ist eindeutig auf die Unterschiede in der Mikrotextur der Fahrbahn zurückzuführen. Daran ändert auch nichts, dass die absolute Höhe der Reibwerte als ungewöhnlich hoch angesehen werden muss.

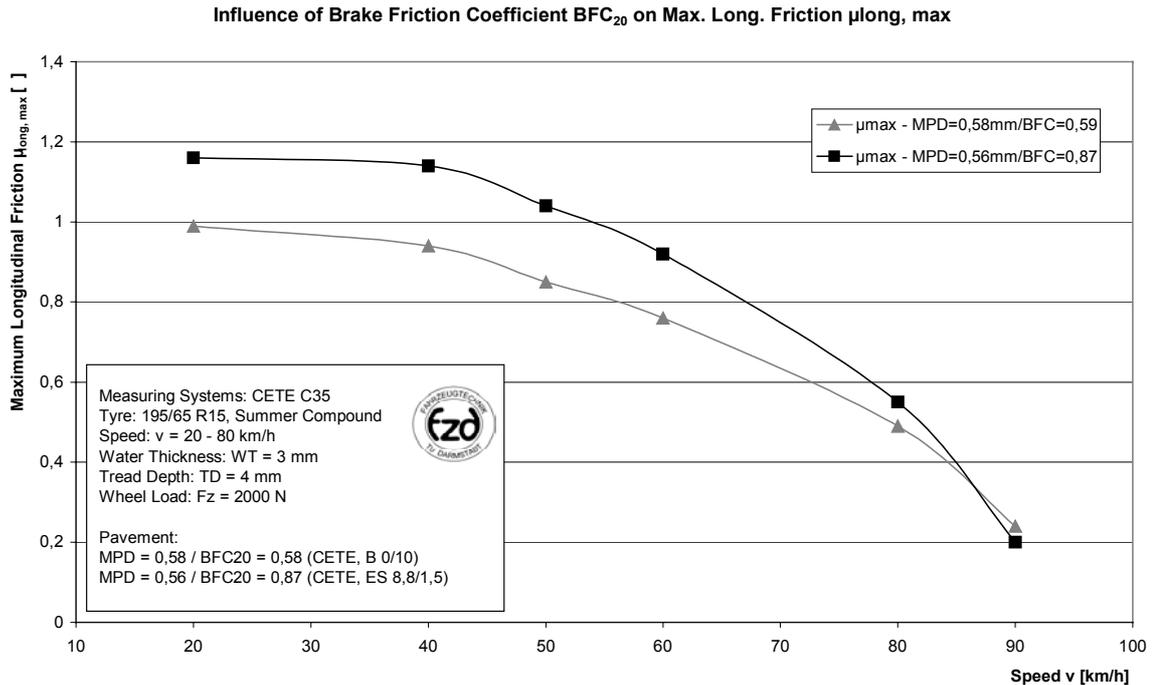


Abbildung 69: Einfluss der Mikrotextur auf den Maximalreibwert in Längsrichtung bei 3mm Wasserfilmdicke
 Influence of macrotexture on maximum longitudinal friction at 3mm water thickness

Mit zunehmender Geschwindigkeit relativiert sich der Einfluss der Mikrotextur. Das Laufstreifengummi kann den kleinen Unebenheiten nicht mehr vollständig folgen und der Wasserfilm zwischen Reifen und Fahrbahn unterbindet die Adhäsionsreibung. Daraus resultiert ein sich Annähern der beiden Messkurven. Bei einer Geschwindigkeit von 90km/h drehen sich die Reibwertverläufe um und die Fahrbahn mit der weniger scharfen Mikro- jedoch geringfügig größeren Makrotextur erzielt höhere Maximalreibwerte. Dies entspricht den Grundsätzen der Reibungsmechanik, wenngleich die Unterschiede im Bereich der Messgenauigkeit liegen und deshalb keine eindeutige Aussage getroffen werden kann.

Um den überraschend großen Einfluss der Mikrotextur auf den Reibwert auch hinsichtlich der Übertragbarkeit auf Bremssituationen realer Fahrzeuge untersuchen zu können, wurden Messungen der Bremsverzögerung mit dem Versuchsträger AUDI V8 durchgeführt und die gemittelten Vollverzögerungen von Bremsungen aus verschiedenen Anfangsgeschwindigkeiten ermittelt. Ausgewertet wurde jeweils der Bereich der Bremsung, in dem der Geschwindigkeitsabfall einen linearen Verlauf hat. Dadurch wurden zufällige Fehler, die aus einem möglichen verzögerten Bremsdruckaufbau (Bedienerfehler) und Verzögerungsüberschwinger am Ende der Bremsung resultieren, vermieden. Zwischen jeder Messung wurden die Bremsen des Versuchsfahrzeugs konditioniert und nach jeder Messreihe die Profiltiefe der Reifen überprüft.

Einfluss der Fahrbahn

Um eine leichter zu vergleichende Darstellung der gemessenen Bremsverzögerungen zu erhalten, wurde eine normierte Darstellung gewählt. D.h., für jede Messgeschwindigkeit wird die Bremsverzögerung, welche auf der Fahrbahn mit der schärferen Mikrotextur erreicht wird ($a_{x,1}$), zu 100% gesetzt. Die Verzögerung auf der zweiten Fahrbahn ($a_{x,2}$) wird auf die erste bezogen:

$$a_{x,2}[\%] = \frac{a_{x,2}}{a_{x,1}} \cdot 100\% \quad (32)$$

Im folgenden werden diese prozentualen Bremsverzögerungen als Bremsperformance bezeichnet. Die Reproduzierbarkeit der Messungen (jeweils 3-5 pro Bremsausgangsgeschwindigkeit und Fahrbahn) war hoch, wobei die maximal aufgetretende Standardabweichung bei $\sigma_x = 3,6\%$ liegt.

Als Testfahrbahnen wurde die in **Kapitel 3.3.2** vermessene Versuchsstrecke verwendet. Diese besteht aus zwei parallelen Bahnen mit folgenden Eigenschaften:

- Bremsstrecke rechts: Wasserfilmtiefe $WD = 0,79\text{mm}$
Brake Friction Coefficient $BFC_{20} = 0,64$
Mean Profile Depth $MPD = 0,48\text{mm}$
Wasserfilmdicke $WT = 0,31\text{mm}$
- Bremsstrecke links: Wasserfilmtiefe $WD = 0,73\text{mm}$
Brake Friction Coefficient $BFC_{20} = 0,72$
Mean Profile Depth $MPD = 0,51\text{mm}$
Wasserfilmdicke $WT = 0,22\text{mm}$

Während die Unterschiede der MPD-Werte ($\Delta MPD = 0,03\text{mm}$) und der gemessenen Wasserfilmdicken ($\Delta WT = 0,06\text{mm}$) bei den durchgeführten Reibwertmessungen, siehe z.B. Abbildung 66, nur einen geringen Einfluss erkennen ließen, ist die Differenz der BFC-Werte ($\Delta BFC_{20} = 0,08$) nicht vernachlässigbar. Das Ergebnis der Beschleunigungs-messungen ist in **Abbildung 70** dargestellt.

Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die maximale Vollverzögerung auf beiden Fahrbahnen erheblich unterscheidet. So sind, unabhängig von der Geschwindigkeit, Differenzen von bis zu 10% möglich. Dass auch bei hohen Bremsausgangsgeschwindigkeiten die Mikrotextur einen signifikanten Einfluss auf den zur Verfügung stehenden Reibwert hat, ist zum einen darauf zurückzuführen, dass in der Reifenaufstandsfläche Bereiche unterschiedlicher Gleitgeschwindigkeiten vorherrschen [41], zum anderen werden während des Bremsvorgangs verschiedene Schlupfbereiche

durchquert, so dass natürlich auch die Gleitgeschwindigkeitsbereiche durchlaufen werden, bei denen es zu einer Anregung der Adhäsionskomponente kommt. Des weiteren bewirken die hohen Vorderradlasten von über 7000N und die geringe Wasserfilmdicke eine gute Verdrängung des Wasserfilms aus der Reifenaufstandsfläche.

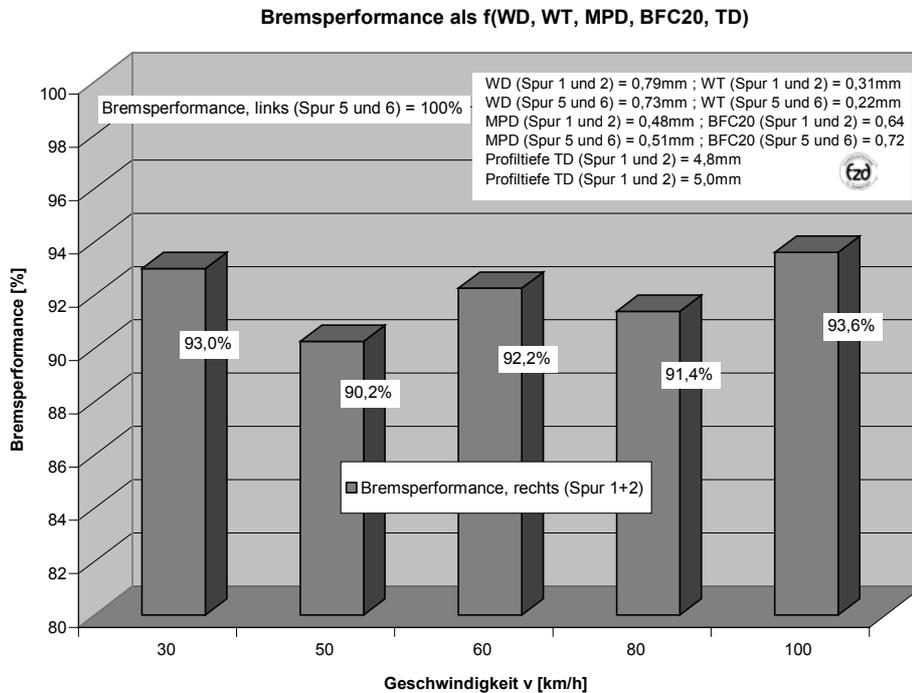


Abbildung 70: Normierte Darstellung der mittleren Vollverzögerung bei verschiedenen Bremsausgangsgeschwindigkeiten
 Standardised depiction of mean fully developed deceleration at different starting speeds for brake situations

Interessant ist dieses Ergebnis auch bezüglich des Aufbaus eines Reibwertvorhersagesystems. Wie sich bei diesen Messungen zeigte, ist die Kenntnis der Fahrbahnmakrotextur und der Wasserfilmtiefe allein nicht ausreichend, um das Kraftschlusspotential zu bestimmen. Es muss außerdem auch die Fahrbahnschärfe, in Form eines BFC oder vergleichbaren Wertes bekannt sein.

4.1.1 Fazit der Messungen zur Beschreibung des Fahrbahneinflusses

Die Auswertung der Reibwertmessungen auf verschiedenen Fahrbahnen unter Variation der Randbedingungen ergab einen signifikanten Einfluss der MPD im Zusammenspiel mit der Wasserfilmtiefe und der Radlast. Die Höhe dieses Einflusses nimmt mit der Geschwindigkeit nahezu quadratisch zu. Dies zeigt, dass die Bedeutung der Makrotextur

Einfluss der Wasserfilmdicke

für die Höhe des Kraftschlusspotentials vor allem in der Aktivierung der Hysteresekomponente und dem Ermöglichen eines ausreichenden Drainagevermögens. Diesen Sachverhalt gilt es in Hinblick auf die Entwicklung eines auf empirischen Daten basierenden Reibwertvorhersagemodells zu berücksichtigen.

Auf trockener Fahrbahn ist der Einfluss der Makrotextur sehr gering. Dies bedeutet, dass die in der Literatur oft beschriebenen Stoß- und Verzahnungseffekte von Reifen und Fahrbahn im Wellenlängenbereich der Makrotextur [6] von untergeordneter Bedeutung sind.

Der Einfluss der Mikrotextur, welche bei sämtlichen Messungen innerhalb des VERT-Projekts durch den BFC_{20} -Wert charakterisiert wurde, ist am deutlichsten bei trockener Fahrbahn (oder geringer Wasserfilmdicke) und im Bereich geringerer Geschwindigkeiten zu beobachten. Die Höhe des Einflusses auf das Kraftschlusspotential (größer 15%) übertrifft die Aussagen in der untersuchten Literatur. Damit kann selbst auf einer trockenen Oberfläche nicht von einem fahrbahnunabhängigen Reibwert gesprochen werden.

Desweiteren zeigten die Versuche, dass sich durch eine scharfe Mikrotextur die Höhe des Reibwertmaximums selbst bei hohen Wasserfilmtiefen deutlich steigern lässt.

Basierend auf diesen Erkenntnissen ergibt sich, im Gegensatz zu den in **Kapitel 2.2** beschriebenen paramter- bzw. kennfeldgestützten Reibwertprognosemodellen, die Forderung Makro- als auch Mikrotextur explizit bei der Kraftschlussberechnung zu berücksichtigen. Desweiteren muss vor allem die Wechselwirkung der Makrotextur mit den Parametern Geschwindigkeit und Wasserfilmtiefe in die Reibwertprognose mit einbezogen werden.

4.2 Einfluss der Wasserfilmdicke

Dass die Fahrbahnässe einen negativen Einfluss auf das Kraftschlusspotential hat, steht außer Frage. Inwieweit jedoch die einzelnen Wasserfilmdicken sich auswirken und welche Wechselwirkungen mit den anderen Reibpartnern entstehen, soll an dieser Stelle näher erläutert werden.

Zunächst wird der Einfluss einer geringen Wasserfilmdicke von 1mm auf den Maximalreibwert in Längsrichtung untersucht, siehe **Abbildung 71**. Dazu werden zwei Fahrbahnen betrachtet, die beide über eine scharfe Mikrotextur verfügen und sich bezüglich der Makrotextur auf mittlerem Niveau befinden.

Hierbei ist ein deutlicher Reibwertabfall von der trockenen zur nassen Fahrbahn zu beobachten. Die Maximalreibwerte auf trockener und nasser Fahrbahn nehmen auf der Fahrbahn mit der größeren Makrotextur größere Werte an. Erstaunlicherweise ist jedoch die Differenz der Reibwerte zwischen trocken und nass auf dieser Fahrbahn ebenfalls höher, d. h. der Gewinn an Kraftschlusspotential, der durch eine Fahrbahn mit größeren BFC₂₀- und MPD-Werten auf trockener Fahrbahn erreicht wird, steht nicht im gleichem Maße auch auf der nassen Fahrbahn zur Verfügung.

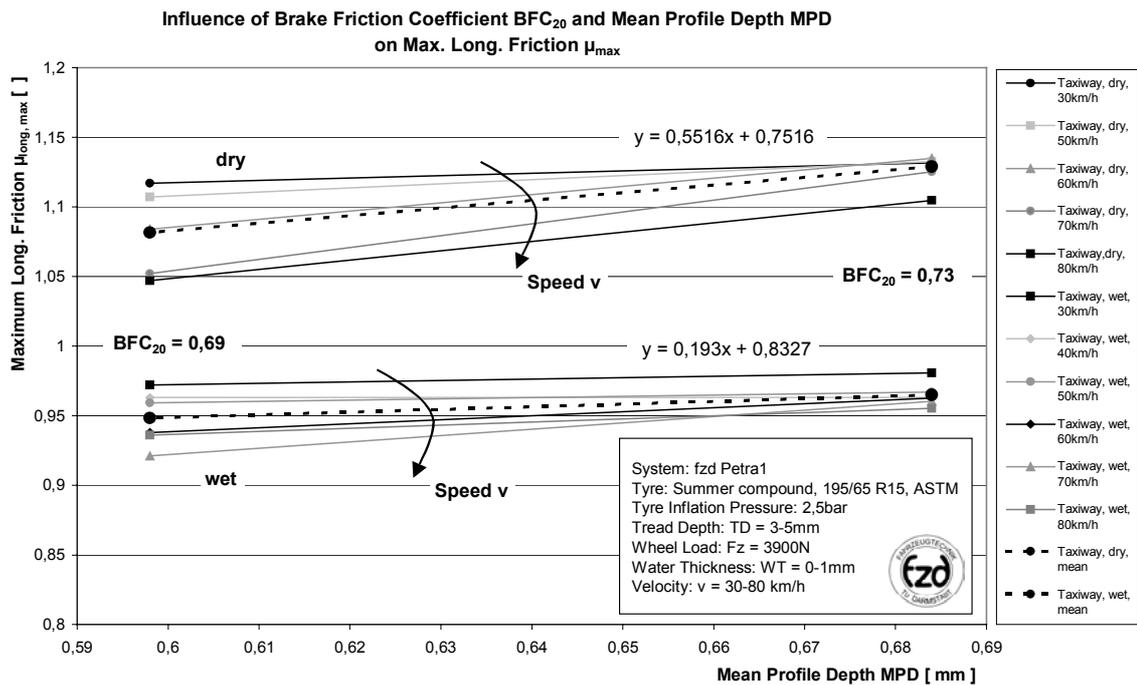


Abbildung 71: Einfluss von Nässe und Fahrbahntextur auf den Maximalreibwert
Influence of wetness and pavement texture on maximum friction

Die Maximalreibwerte nehmen mit zunehmender Geschwindigkeit, sowohl auf der trockenen als auch auf der nassen Fahrbahn, ab. Der Einfluss der Geschwindigkeit jedoch verringert sich mit zunehmender Fahrbahnrauigkeit. Damit rücken die Reibwertlinien unterschiedlicher Geschwindigkeiten näher zusammen. D.h., eine griffigere Fahrbahn ist in der Lage den negativen Einfluss der Geschwindigkeit auf das Kraftschlusspotential teilweise zu kompensieren.

Im nächsten Schritt soll der Einfluss verschiedener Wasserfilmdicken unter Variation der Geschwindigkeit untersucht werden, siehe **Abbildung 72**. Erneut ist bereits bei einer geringen Wasserfilmdicke ein deutlicher Abfall des Maximalreibwerts über der Geschwindigkeit festzustellen.

Einfluss der Wasserfilmdicke

Der im Vergleich zur in **Abbildung 71** dargestellten Messung deutlichere Abfall der Reibwerte bei einer Wasserfilmdicke von 1mm, ist vor allem auf die geringere Profiltiefe des Reifens und die deutlich geringere Schärfe der Fahrbahn zurückzuführen. So reduziert sich der Reibwert auf dieser recht glatten Fahrbahn (geringe Mikro- und Makrotextur) bei der Erhöhung der Geschwindigkeit von 20 auf 80km/h um 0,4 Reibwerteinheiten.

Mit zunehmender Wasserfilmdicke erhöht sich auch der Einfluss der Geschwindigkeit. Dies wird hier besonders deutlich, da durch die geringe Profiltiefe von 2mm und die geringe Makrotextur nur kleine Drainagekanäle zum Wassertransport zur Verfügung stehen. Diese reichen trotz der hohen Radlast von 5000N nicht aus, um das Wasser schnell genug aus der Reifenaufstandsfläche zu verdrängen. Der geringe Anstieg des Maximalreiwerts bei 20km/h und einer Wasserfilmhöhe von 3mm ist nicht zu erklären und muss auf Messungenauigkeiten zurückgeführt werden.

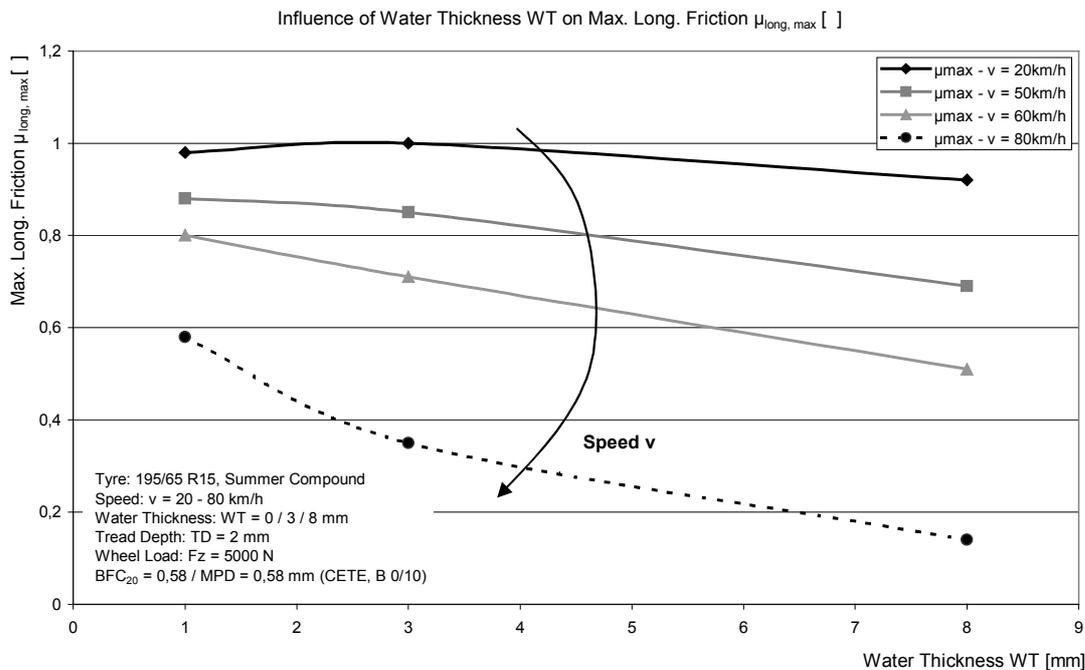


Abbildung 72: Einfluss von Wasserfilmdicke und Geschwindigkeit auf den Maximalreiwert in Längsrichtung
Influence of water thickness and speed on maximum longitudinal friction

4.2.1 Fazit der Messungen zur Beschreibung des Wasserfilmdickeneinflusses

Der Einfluss der Wasserfilmtiefe, wie er sich in den durchgeführten Messungen deutlich zeigte, ist in bedeutendem Maße abhängig von den weiteren Randbedingungen. Da während der Testreihe die Reifenmischung und das Profildesign nicht verändert wurden, kann die Wechselwirkung mit diesen beiden Einflussgrößen nicht näher quantifiziert werden. Dieser Umstand ermöglicht jedoch ein detaillierteres Analysieren der weiteren Parameter.

So zeigte sich u. a., dass der Einfluss der Wasserfilmdicke stark geschwindigkeitsabhängig ist. Dies ist, wie bereits erläutert, auf die Verringerung der Zeit, die dem Reifen zur Verdrängung des Wassers aus der Reifenaufstandsfläche zur Verfügung steht, zurückzuführen. Vor diesem Hintergrund wird auch die Wechselwirkung des Wassertiefeneinflusses mit den Parametern Makrotextur (MPD) und Profiltiefe (TD) deutlich. Beide Größen unterstützen die Verdrängung des Zwischenmediums aus dem Reifenlatsch.

Die in **Abbildung 71** dargestellten Messungen zeigen weiterhin, dass es trotz eines stets höheren Reibwertniveaus auf der Fahrbahn mit der rauheren Oberfläche, beim Übergang von trockener zu nasser Fahrbahn zu hohen Kraftschlusseinbußen (größer 13%) kommt. Daher ist die Sensierung bereits geringer Wasserfilmdicken und deren Berücksichtigung in der Modellbildung von hoher Bedeutung.

Die Interaktion der Wasserfilmdicke mit der Radlast wird in **Kapitel 4.5** beschrieben.

4.3 Einfluss der Geschwindigkeit

Der bedeutende Einfluss der Geschwindigkeit bei nasser Fahrbahn wurde bereits in den bisherigen Messungen aufgezeigt, ebenso wie die Wechselwirkungen mit der Profiltiefe und der Fahrbahnmakrotextur. Beide Größen sind gerade bei hohen Wasserfilmtiefen und hoher Geschwindigkeit von großer Bedeutung. Darauf aufbauend soll nun der Einfluss der Geschwindigkeit auf den Reibwert bei trockener Fahrbahn und unter Variation der Texturschärfe untersucht werden, siehe **Abbildung 73**.

Bei der Fahrbahn 3 (Tax / rough) mit mittlerer Rauigkeit (MPD) und hoher Schärfe (BFC_{20}) ist nur ein geringer Abfall des Maximalreiwerts über der Geschwindigkeit zu beobachten. Im Gegensatz hierzu zeigen die beiden anderen Fahrbahnen einen deutlichen Reibwertabfall. Fahrbahn 2 besitzt annähernd dieselbe Mikrotextur wie Fahrbahn 3, jedoch nur eine geringe Grobrauhigkeit. Fahrbahn 1 hat die umgekehrten

Einfluss der Geschwindigkeit

Eigenschaften: mittlere Makrorauhigkeit und geringe Mikroschärfe. Beide Fahrbahnen (1 und 2) zeigen einen ähnlichen Reibwertabfall. Dies lässt den Schluss zu, dass bei höheren Geschwindigkeiten und trockener Fahrbahnoberfläche die Kombination aus hohen Mikro- und Makrorauhigkeiten ein hohes Kraftschlusspotential gewährleistet. Mit einer solchen Kombination kann der negative Einfluss der Geschwindigkeit teilweise kompensiert werden.

Allerdings muss auch beachtet werden, dass der hier gemessene Reibwertabfall mit ca. 5,7% (Fahrbahn 2 gegenüber Fahrbahn 3 bei 80km/h) im Vergleich zur nassen Fahrbahn relativ gering ausfällt und die Schwankungen des gemessenen Reibwerts, vor allem bei der Fahrbahn 2, recht hoch ausfallen. Durch den hohen Reifenverschleiss bei diesen Messungen war es jedoch nicht möglich eine breite statistische Basis zu erzeugen.

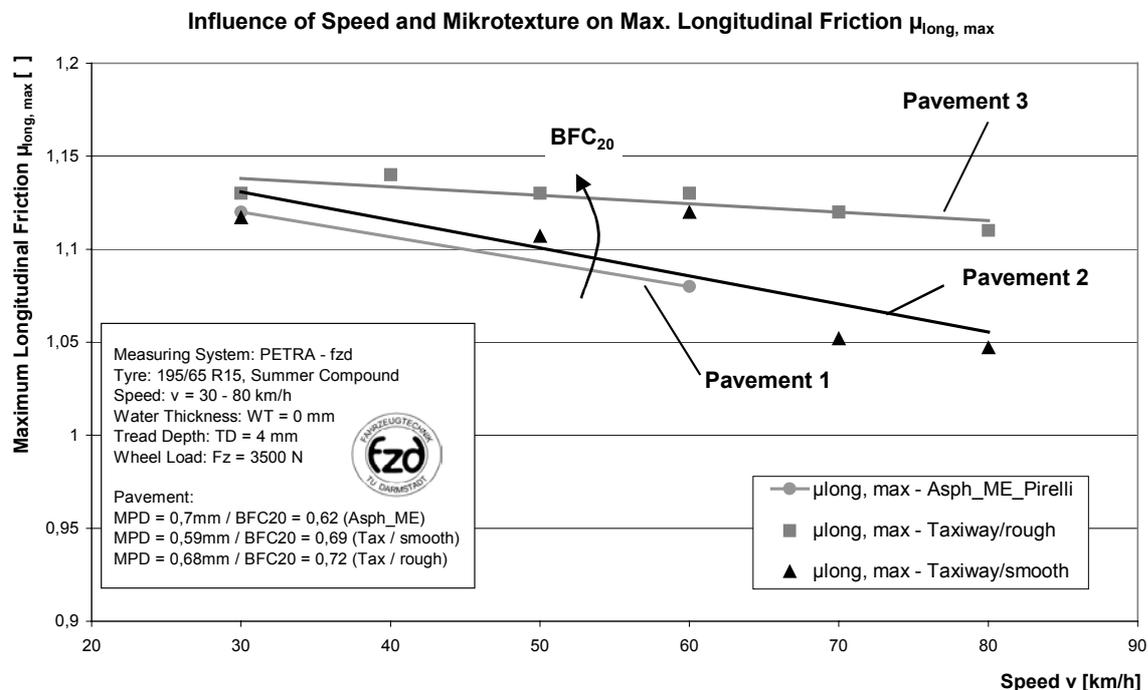


Abbildung 73: Einfluss der Geschwindigkeit und der Mikrotecture auf den Maximalreibwert in Längsrichtung auf trockener Fahrbahn
 Influence of speed and microtexture on maximum longitudinal friction on dry road

Bei den bisherigen Messungen wurde der Einfluss verschiedener Parameter stets anhand des Maximalreibwerts in Längsrichtung aufgezeigt. Dies liegt daran, dass durch die relativ homogene Flächenpressungsverteilung im Reifenlatsch Einflussparameter, wie z.B. die Wasserfilmdicke und die Profiltiefe, eine stärkere Auswirkung auf den Reibwert in Längsrichtung haben, als dies in der Querrichtung der Fall ist. Durch die stark inhomogene Druckverteilung, die sich unter Schräglauf im Reifenlatsch bildet, siehe **Abbildung 74**, kann der Wasserfilm leichter aus der Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche verdrängt werden.

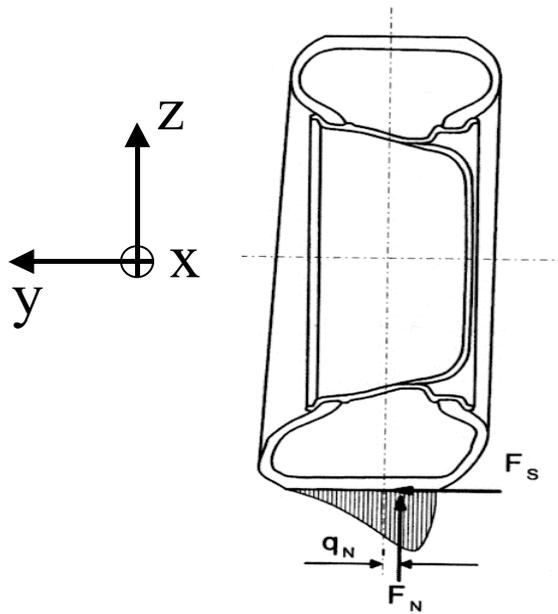


Abbildung 74: Normalkräfte im Reifenlatsch aufgrund Schräglauf [87]
Normal forces under side slip

In **Abbildung 75** ist der Einfluss von Geschwindigkeit und Wasserfilmdicke bei einem Reifen mit 2mm Profiltiefe und einer Radlast von 3500N dargestellt.

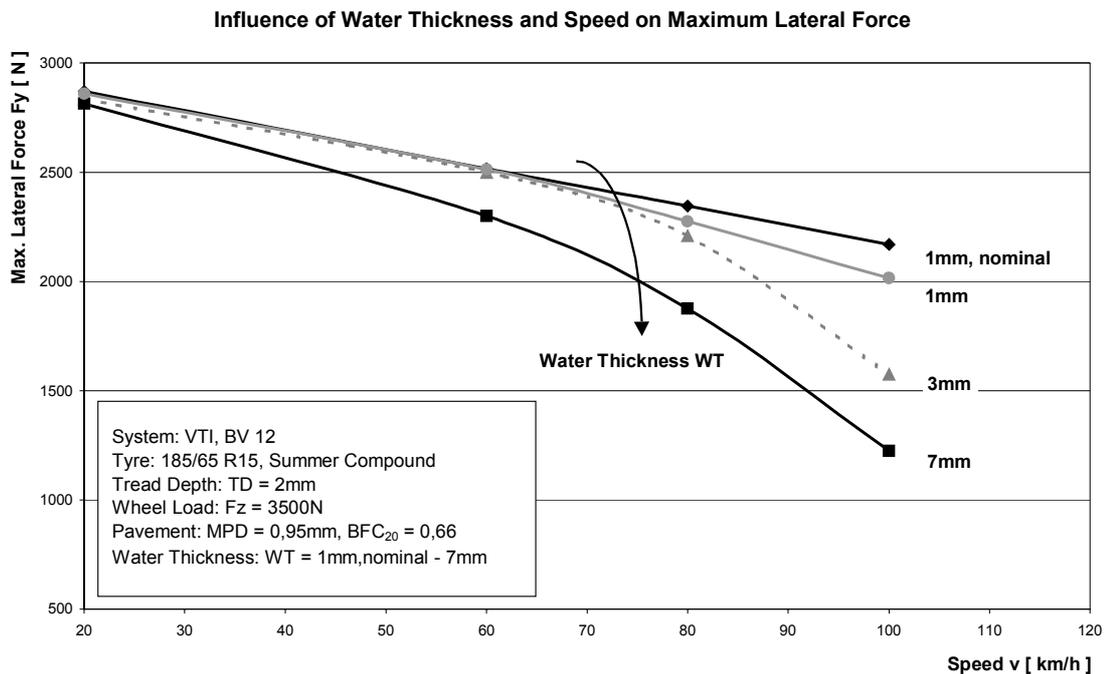


Abbildung 75: Einfluss von Wasserfilmdicke und Geschwindigkeit auf die maximale Seitenkraft
Influence of water thickness and speed on maximum lateral force

Einfluss der Geschwindigkeit

Ebenso wie in Längs- fallen auch in Querrichtung die Reibwerte bzw. die maximalen Querkräfte deutlich mit Zunahme der Geschwindigkeit ab. Allerdings ist die Auswirkung der Wasserfilmdicke bei hohen Geschwindigkeiten signifikant geringer, als dies in Längsrichtung der Fall ist. So beträgt beispielsweise die Seitenkraftdifferenz zwischen der Fahrbahn mit $WT = 3\text{mm}$ und $WT = 7\text{mm}$ bei 100km/h nur ca. 350N (entsprechend $0,1$ Reibwerteinheiten). In Längsrichtung ist der Unterschied mindestens doppelt so groß.

4.3.1 Fazit der Messungen zur Beschreibung des Geschwindigkeitseinflusses

Auch auf trockener Fahrbahn ist eine Reduzierung des Kraftschlusspotentials über der Geschwindigkeit festzustellen. Dies steht teilweise im Gegensatz zu Literaturangaben, in denen ein signifikanter Einfluss nur auf nassen Fahrbahnen gegeben ist. Die Verringerung des Kraftschlusspotentials auf trockener Fahrbahn wird hierbei u.a. auf eine Verringerung der Reifenaufstandsfläche infolge der Aufweitung des Reifenumfangs zurückgeführt. Da eine solche Aufweitung im untersuchten Geschwindigkeitsbereich jedoch sehr gering ausfällt und außerdem bei allen dargestellten Fahrbahnoberflächen gleichermaßen auftritt, kann darin nicht die Ursache für die Reibwertdifferenzen liegen.

Die Reibwertabnahme fällt jedoch bei Fahrbahnen mit ausreichender Mikro- und Makrorauhigkeit deutlich geringer aus als es bei nassen Fahrbahnen der Fall ist. Dies bedeutet, dass eine Fahrbahn mit hoher Griffigkeit den negativen Geschwindigkeitseinfluss teilweise kompensiert (siehe auch **Abbildung 71**). Für die modellmäßige Beschreibung ergibt sich erneut die Forderung nach einer kombinierten Berücksichtigung von Mikro- und Makrotextur.

Wie in den Kapiteln zuvor bereits festgestellt, bestehen starke Wechselwirkungen zwischen dem Einfluss der Geschwindigkeit und der Art und Gewichtung der Einflüsse der anderen Einflussparametern. So steigt beispielsweise die Bedeutung der Profiltiefe auf nasser Fahrbahn mit zunehmender Geschwindigkeit.

Während in Längsrichtung die Kombination aus hoher Geschwindigkeit und hoher Wasserfilmdicke einen deutlichen Abfall des Reibwerts gegenüber Messungen bei geringerer Wasserfilmdicke bewirkt, ist der Abfall in Querrichtung weniger stark ausgeprägt. Dies ist u. a. auf die inhomogene Flächenpressungsverteilung im Reifenlatsch zurückzuführen, die eine bessere Verdrängung des Wasserfilms und auch bei höheren Wasserfilmdicken einen Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn ermöglicht.

4.4 Einfluss der Reifenprofiltiefe

Im Gegensatz zu den bisher diskutierten Einflussparametern kann die Reifenprofiltiefe in Abhängigkeit vom Fahrbahnzustand sowohl einen positiven als auch einen negativen Einfluss auf das Kraftschlusspotential haben. Sowohl bei nasser als auch bei trockener Fahrbahn ist das Ziel, eine möglichst große Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche zur Übertragung der Kräfte zur Verfügung zu haben. Bei trockener Fahrbahn wird dies, wie in Kapitel 2.1.6 beschrieben, durch eine geringere Profiltiefe und die Verringerung des Negativanteils erreicht.

Bei nasser Fahrbahn hat eine Reduzierung der Profiltiefe genau den gegenteiligen Effekt: durch den geringeren Negativanteil und die Verkleinerung der Drainage-Kanalquerschnitte des Reifens kann der Wasserfilm in der Reifenaufstandsfläche nicht ausreichend aufgenommen, bzw. verdrängt werden und das zur Verfügung stehende Kraftschlusspotential verringert sich deutlich, siehe **Abbildung 76**.

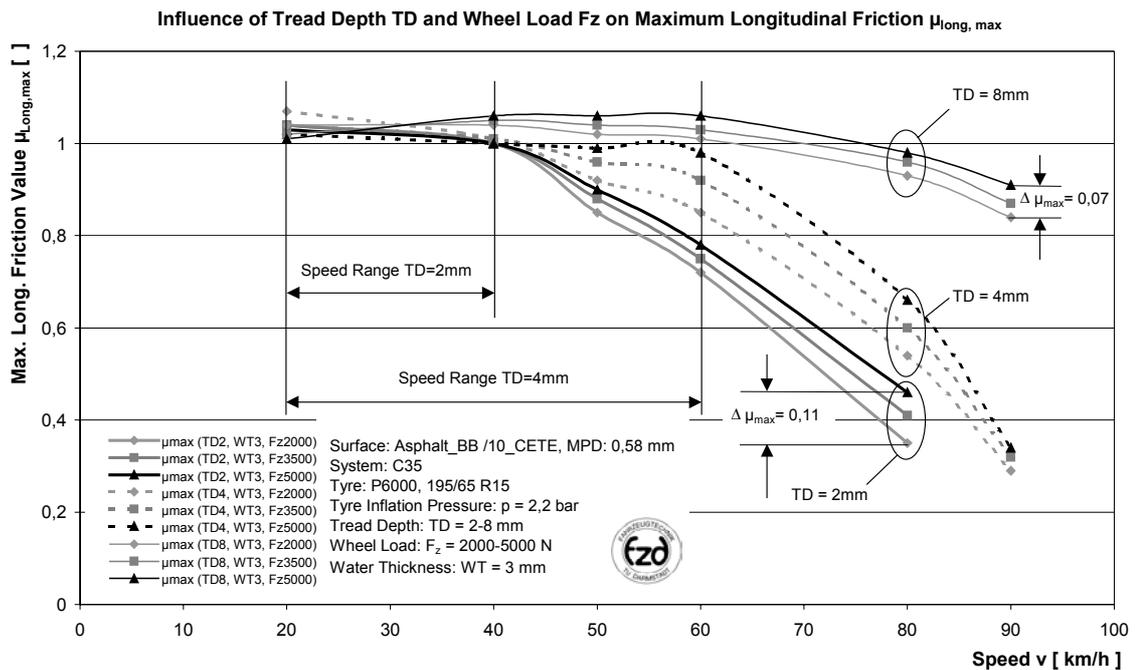


Abbildung 76: Einfluss von Profiltiefe und Radlast auf den Maximalreibwert in Längsrichtung [79]
Influence of Tread Depth and wheel load on maximum friction in longitudinal direction

So ergibt sich auf einer Fahrbahn mit 3mm Wasserfilmdicke bei einem Reifen mit 2mm Profiltiefe schon ab einer Geschwindigkeit von 40km/h ein signifikanter Abfall des Maximalreibwerts in Längsrichtung. Dieser deutliche Reibwertabfall verschiebt sich bei einem Reifen mit 4mm Profiltiefe zu einer Geschwindigkeit von 60km/h. Ein Reifen

Einfluss der Reifenprofiltiefe

mit neuwertiger Profiltiefe (7,5 bis 9mm) zeigt innerhalb des gesamten Geschwindigkeitsbereichs (bis 90km/h) keinen ausgeprägten Reibwertabfall.

Vor dem Hintergrund dieser Erkenntnisse stellt sich auch die Frage nach einer verschärften gesetzlichen Regelung der Mindestprofiltiefe (z.Z. 1,6mm) oder zumindest einer verstärkten Öffentlichkeitsarbeit zur Dokumentation der Risiken.

Ein weiterer hier deutlich zu erkennender Einfluss wird im nächsten Kapitel besprochen: Die Radlast bewirkt, vor allem bei höheren Geschwindigkeiten, eine deutliche Steigerung des Maximalreiwerts. Dieser Effekt ist bei Reifen mit geringer Profiltiefe besonders deutlich zu beobachten. Dort wirkt eine Erhöhung der Radlast den hydrodynamischen Effekten entgegen.

Betrachtet man den Einfluss der Reifenprofiltiefe in Querrichtung, so zeigt sich dieser nicht ganz so ausgeprägt, siehe **Abbildung 77**. Trotz einer großen Wasserfilmdicke ist selbst bei hohen Geschwindigkeiten kein vergleichbar starker Abfall des Maximalreiwerts bei geringer Profiltiefe zu beobachten.

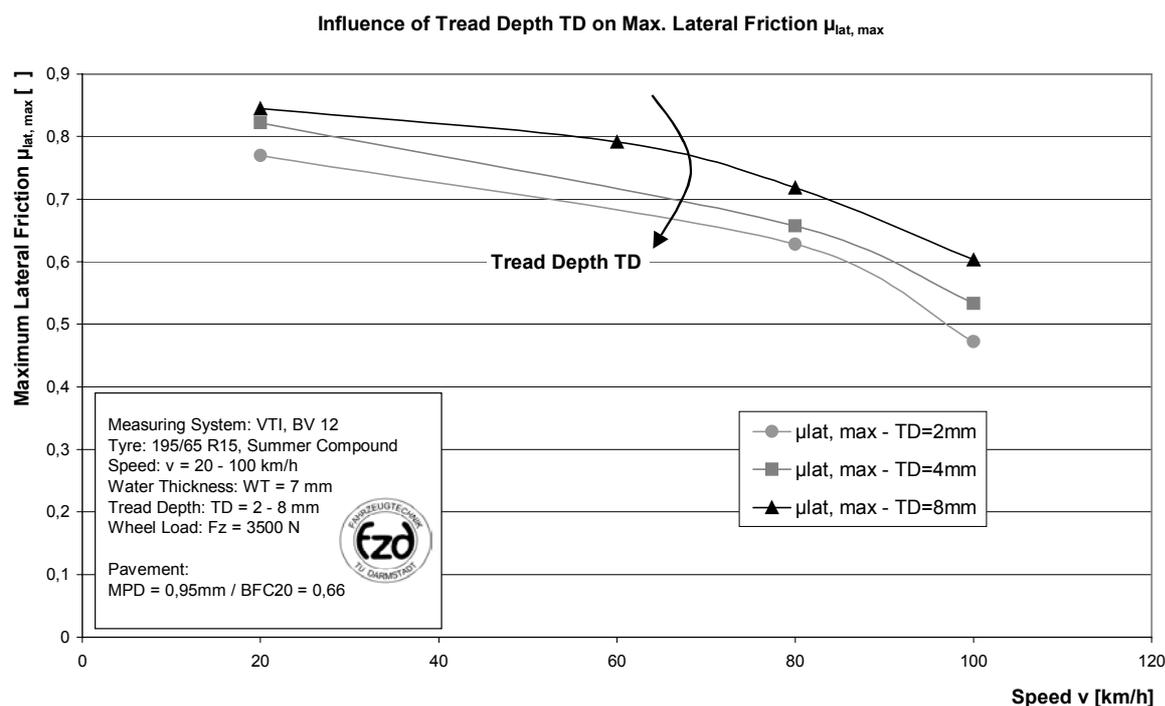


Abbildung 77: Einfluss der Profiltiefe auf den Maximalreiwert in Querrichtung
Influence of tread depth on maximum lateral friction

Dieses Verhalten ist, wie bereits beschrieben, zu einem großen Teil auf die stark inhomogene Druckverteilung im Reifenlatsch zurückzuführen. Diese beeinflusst die Wasserverdrängung und das Kontaktverhalten.

Des Weiteren besitzt die hier verwendete Fahrbahn eine grobe Makrotextur, die ausreichend große Drainagekanäle zur Verfügung stellt.

Dennoch ist festzuhalten, dass auch in Querrichtung eine Reibwertdifferenz von über 0,1 Reibwerteinheiten zwischen dem Neureifen und dem mit 2mm Profiltiefe besteht. Bei höheren Geschwindigkeiten sind noch größere Unterschiede zu erwarten.

4.4.1 Fazit der Messungen zur Beschreibung des Profiltiefeneinflusses

Sowohl in Längs- als auch in Querrichtung hat die Reifenprofiltiefe einen signifikanten Einfluss auf die Maximalreibwerte. Bei trockener Fahrbahn ist der Einfluss leicht negativ. Dies liegt an der verringerten Reifenaufstandsfläche, da sich diese mit zunehmendem Verschleiß erhöht. Des Weiteren bewirken lange Profilelemente eine höhere Beweglichkeit, was zum einen eine Verringerung der Reifenlängs- und Quersteifigkeit zur Folge hat. Zum anderen ergeben sich hieraus Schubspannungen im Reifenlatsch, die das Kraftschlusspotential verringern.

Völlig gegensätzlich sieht der Einfluss bei nasser Fahrbahn aus. Hier bewirkt die größere Profiltiefe eine deutlich bessere Aufnahme und Abfuhr des Wasserfilms in der Reifenaufstandsfläche. Dadurch ergibt sich eine größere Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche und das Eindringen des Wasserkeils in den Reifenlatsch wird verhindert bzw. in höhere Geschwindigkeitsbereiche verschoben.

Der Einfluss der Reifenprofiltiefe nimmt mit steigender Wasserfilmdicke, steigender Geschwindigkeit und verringerter Fahrbahnrauigkeit zu.

4.5 Einfluss der Radlast

Wie die Reifenprofiltiefe, so hat auch die Radlast je nach Fahrbahnzustand entweder einen positiven oder einen negativen Einfluss auf das Reibwertniveau. Wie bereits im **Kapitel 4.5** angemerkt, bewirkt eine hohe Radlast auf trockener Fahrbahn einen geringeren Maximalreibwert, siehe **Abbildung 78**. Dies entspricht den Theorien der Gummimechanik, nach denen der Reibwert mit der Flächenpressung abnimmt [6]. Auf nasser Fahrbahn jedoch unterstützt eine hohe Radlast die Verdrängung des Wasserfilms aus der Reifenaufstandsfläche. Dies bewirkt bei geringer Wasserfilmdicke, dass sogar die Adhäsionskomponente ausgebildet werden kann. Bei großen Wasserhöhen wird zumindest eine ausreichende Hysteresereibung erzeugt, indem durch die erhöhte Flächenpressung die Texturspitzen tiefer in den Laufstreifen eindringen und eine erhöhte Umformarbeit hervorrufen.

Einfluss der Radlast

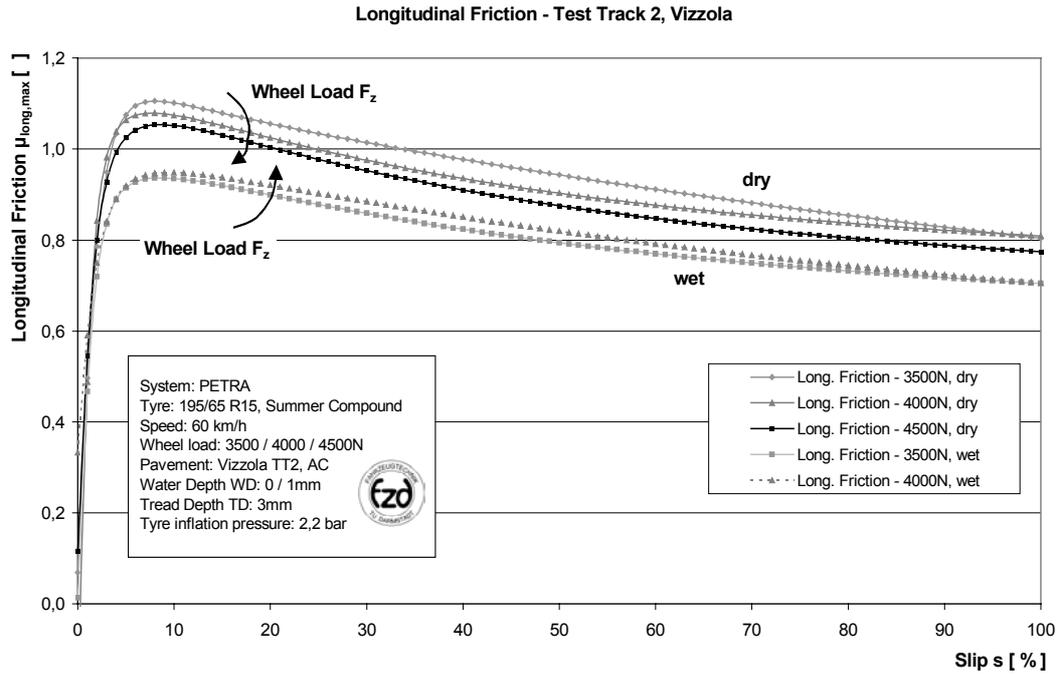


Abbildung 78: Einfluss von Radlast und Fahrbahnzustand auf den Längsreibwert
Influence of wheel load and road condition on longitudinal friction

Diese Erkenntnisse gelten gleichermaßen für die Querrichtung, siehe **Abbildung 79**.

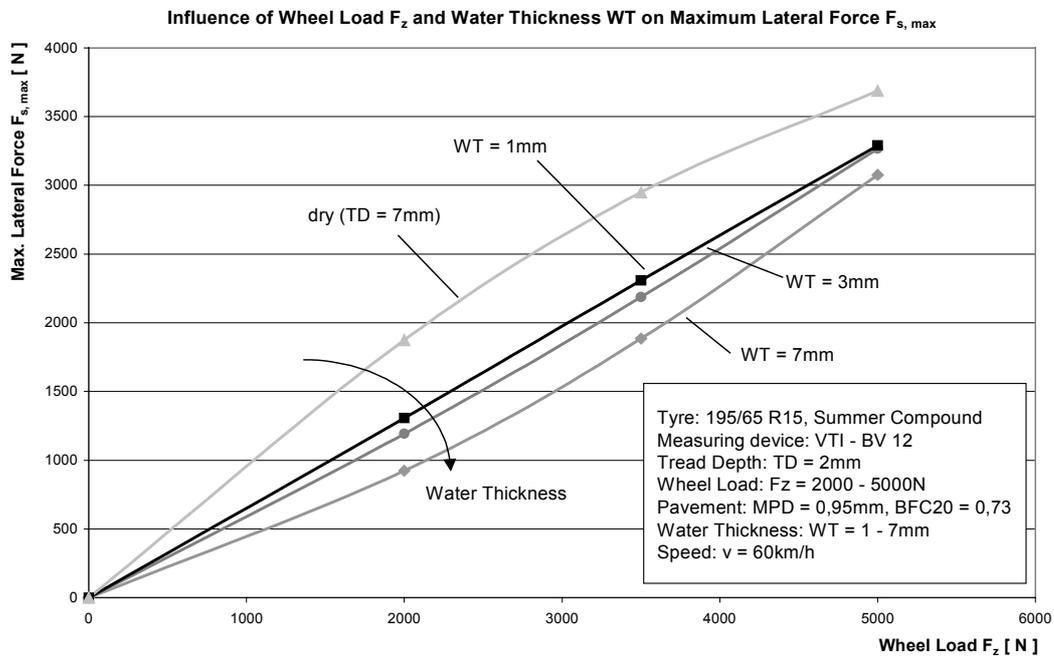


Abbildung 79: Einfluss von Radlast und Wasserfilmtiefe auf die maximale Seitenkraft
Influence of wheel load and water thickness on maximum lateral force

So zeigt sich bei trockener Fahrbahn der bekannte degressive Verlauf der maximalen Seitenkraft, aufgetragen über der Radlast. Bei nasser Fahrbahn mit einer Wasserfilmtiefe von 1mm ergibt sich eine nahezu lineare Abhängigkeit, die mit zunehmender Wasserfilmtiefe einen progressiven Charakter annimmt.

4.5.1 Fazit der Messungen zur Bestimmung des Radlasteinflusses

Bei den Messungen unter Variation der Radlast zeigte sich, dass eine hohe Normalkraft den Einfluss des Wasserfilms auf der Fahrbahn deutlich reduziert, bzw. die Geschwindigkeit, ab der es zu einem (partiellen) Aufschwimmen des Reifens kommt, in signifikant höhere Bereiche verschiebt. Dies deckt sich mit Aussagen von [38]. Dieser Effekt ist zum einen darin begründet, dass die Radlast gegen die geschwindigkeitsabhängigen hydrodynamischen Auftriebskräfte des Wasserfilms arbeitet, zum anderen ermöglicht die inhomogene Flächenpressungsverteilung (siehe auch **Kapitel 2.1.7**) mit einzelnen Kraftspitzen im Reifenlatsch (siehe auch [49]) ein Durchstoßen des Wasserfilms und das Erzeugen von Kontaktflächen und Verformungsvolumina. Dadurch kann vor allem die Hysteresekomponente der Reibung aktiviert und genutzt werden.

Auf trockener Fahrbahn wirken sich neben den in der Reibungstheorie beschriebenen Effekten (Abnahme des Reibwerts mit zunehmender Flächenpressung) die Erhöhung der abplattungsbedingten Schubspannungen, welche u.a. aus einer verstärkten Einfederung der Reifenseitenwände resultiert [117], siehe auch **Kapitel 2.1.7**, negativ aus und reduzieren das Kraftschlusspotential.

4.6 Fazit

Die durchgeführten Messungen zeigen, dass die gewählten Einflussgrößen einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe des Reibwertmaximums in Längs- und Querrichtung haben und somit zu Recht untersucht wurden. Durch die genaue Beschreibung und gezielte Variation der Randbedingungen der Messungen wurde eine gute Vergleichbarkeit der Messdaten ermöglicht. Das Konstanthalten der Einflussfaktoren bei gezielter Variation einzelner Parameter schaffte die Voraussetzung zur Quantifizierung der Einzeleinflüsse.

Von allen Einflussgrößen kommt dem Fahrbahnzustand die größte Bedeutung zu. So zeigte sich bei den Messungen, dass bereits geringe Wasserfilmdicken (kleiner 1mm) ausreichen das Reibwertniveau deutlich zu senken. Daraus ergibt sich die Forderung nach einer Berücksichtigung auch geringer Wassertiefen in der Modellbildung.

Fazit

Der Fahrbahnzustand entscheidet des Weiteren über die Art des Einflusses der Parameter Radlast und Profiltiefe. Haben beide Größen auf trockener Oberfläche einen negativen Einfluss, so kehrt sich dieser bei nassen Fahrbahnbedingungen um.

Überhaupt muss festgestellt werden, dass die einzelnen Parameter in starker Wechselwirkung zueinander sind. So sind die Auswirkungen der Fahrbahnässe in einem erheblichen Maße von der Fahrbahnrauigkeit abhängig. Eine „griffige“ Oberfläche kann den negativen Einfluss des Wasserfilms teilweise kompensieren. Dazu ist zum einen eine grobe Makrotextur nötig, welche eine große Wasseraufnahme und Drainagevermögen besitzt und die Aktivierung der Hysteresreibung ermöglicht. Zum anderen zeigte sich überraschend deutlich, dass die Fahrbahn auch bei Nässe eine scharfe Mikrotextur benötigt.

Der Einfluss der Mikrotextur auf trockener Fahrbahnoberfläche ist unbestritten und größtenteils darauf zurückzuführen, dass eine scharfe Körnung eine hohe Berührungsfläche zwischen Reifen und Straßenoberfläche bewirkt. Diese ist zum Aufbau der Adhäsionsreibung nötig. Dadurch kann auch der negative Einfluss der Geschwindigkeit teilweise kompensiert werden. D.h. der Reibwertabfall mit zunehmender Geschwindigkeit fällt deutlich schwächer aus, als dies bei einer glatten Fahrbahnoberfläche der Fall ist. Die Makrotextur hingegen ist bei trockener Fahrbahn von untergeordneter Bedeutung.

Die Geschwindigkeit als freie, vom Fahrer wählbare Einflussgröße kann als eine Art Gewichtungsfaktor für die verschiedenen Parameter gesehen werden. So ist beispielsweise der Einfluss von Radlast und Profiltiefe auf nasser Fahrbahn im unteren Geschwindigkeitsbereich nur gering. Jedoch ändert sich dies nahezu quadratisch mit zunehmender Geschwindigkeit.

Basierend auf diesen Messungen ergibt sich die Forderung, dass bei einer rechnerischen Bestimmung des Kraftschlusspotentials sämtliche hier untersuchten Einflussgrößen berücksichtigt werden müssen. Dies liegt sowohl an der Bedeutung der einzelnen Parameter selbst, als auch an der starken Wechselwirkung mit den weiteren Einflussgrößen.

5 Modellbildung und Validierung

In diesem Kapitel werden Möglichkeiten beschrieben und diskutiert, Modelle aufzustellen, die die Reifen–Fahrbahn–Interaktion beschreiben. Diese Modelle erlauben es zum einen, den Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn in Abhängigkeit von den Haupteinflussgrößen zu berechnen und zum anderen den Reifen-Fahrbahn-Kontakt näher zu untersuchen, siehe **Abbildung 80**.

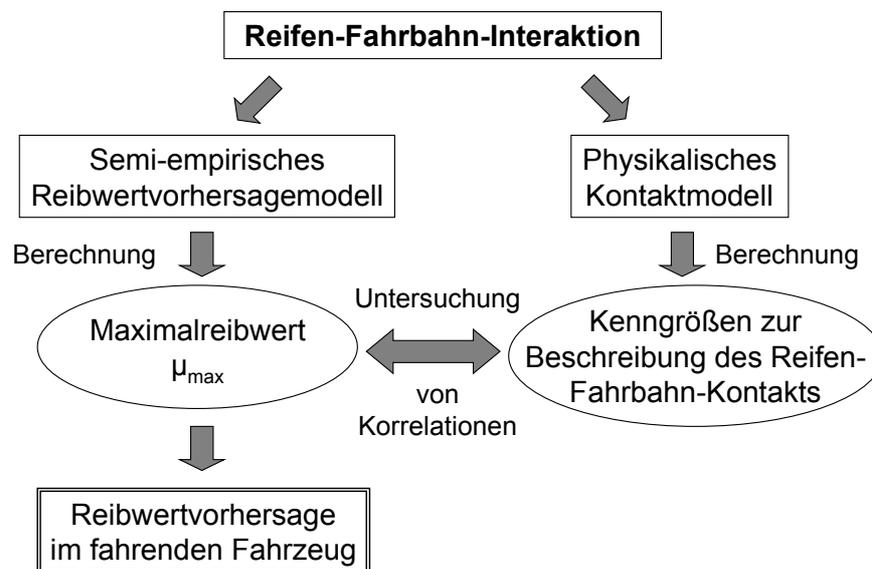


Abbildung 80: Beschreibung der Reifen-Fahrbahn-Interaktion mittels verschiedener Modelle
Description of tire-pavement-interaction by different models

Des Weiteren wird die Eignung dieser Modelle diskutiert, innerhalb eines Reibwertvorhersagesystems im fahrenden Fahrzeug eingesetzt zu werden. Betrachtet wird ein auf Messungen basierendes semi-empirisches Reibwertvorhersagemodell und ein physikalisches Kontakttiefe-Modell.

5.1 Semi-empirisches Reibwertvorhersagemodell (FPM)

Das im Folgenden beschriebene Reibwertvorhersagemodell wurde im Rahmen des VERT Projektes am Fachgebiet Fahrzeugtechnik *fzd* entwickelt und dient zur Bestimmung des Kraftschlusspotentials in Längs- und Querrichtung.

5.1.1 Aufbau des Modells

Basierend auf einer innerhalb des Projektes durchgeführten Literaturrecherche und durch Auswertung von orientierenden Messungen, siehe auch **Kapitel 2** und **4**, wurden die Haupteinflussgrößen auf den Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn definiert und bezüglich ihrer Wirkung beschrieben. Diese Einflussparameter gilt es im Modell zu berücksichtigen. Je mehr Einflussgrößen Verwendung finden, um so besser können durch das Modell die verschiedenen Einsatzbereiche abgedeckt werden. Jedoch erhöht dies wesentlich den Aufwand der Modellbildung, da jeder Parameter, in ein Kennfeld übertragen, eine weitere Dimension darstellt. Umgekehrt führt eine geringe Anzahl von Einflussgrößen auch nur zu einer geringen Übertragbarkeit des Modells auf reale Fahrzustände. Das Gleiche gilt für den Bereich der verwendeten Parameter. So wäre z. B. eine Gültigkeit des Modells für Geschwindigkeitsbereiche bis $v = 200\text{km/h}$ wünschenswert. Dies würde jedoch zu einer starken Verringerung der Modellqualität in Bereichen geringerer Geschwindigkeiten führen und hätte außerdem die Schwierigkeit der Validierung in Bereichen hoher Geschwindigkeit (für Geschwindigkeiten $v > 100\text{km/h}$ stand kein Messequipment zur Verfügung) zur Folge.

Eine weitere Einschränkung der Einflussgrößen betrifft die Messreifen. So wurden Reifenmischung und Profilgestaltung nicht variiert. Des Weiteren sind die Ergebnisse für den verwendeten Reifen der Dimension 195/65 R15 nur eingeschränkt auf Reifen mit abweichender Breite übertragbar.

Folgende Einflussparameter werden innerhalb der dargestellten Bereiche bei der Modellbildung berücksichtigt:

- | | |
|--------------------|--|
| Fahrzeug / Reifen: | - Geschwindigkeit ($30\text{ km/h} < v < 90\text{km/h}$) |
| | - Radlast ($2000\text{N} < F_z < 6000\text{N}$) |
| | - Profiltiefe ($2\text{mm} < TD < 7\text{mm}$) |
| Zwischenmedium: | - Wasserfilmdicke ($0 < WT < 8\text{mm}$) |
| Fahrbahn: | - Mikrotextur ($0,58 < \text{BFC}_{20} < 0,86$) |
| | - Makrotextur ($0,56\text{mm} < \text{MPD} < 0,95\text{mm}$) |

Damit ergibt sich folgendes Übersichtsdiagramm, **Abbildung 81**:

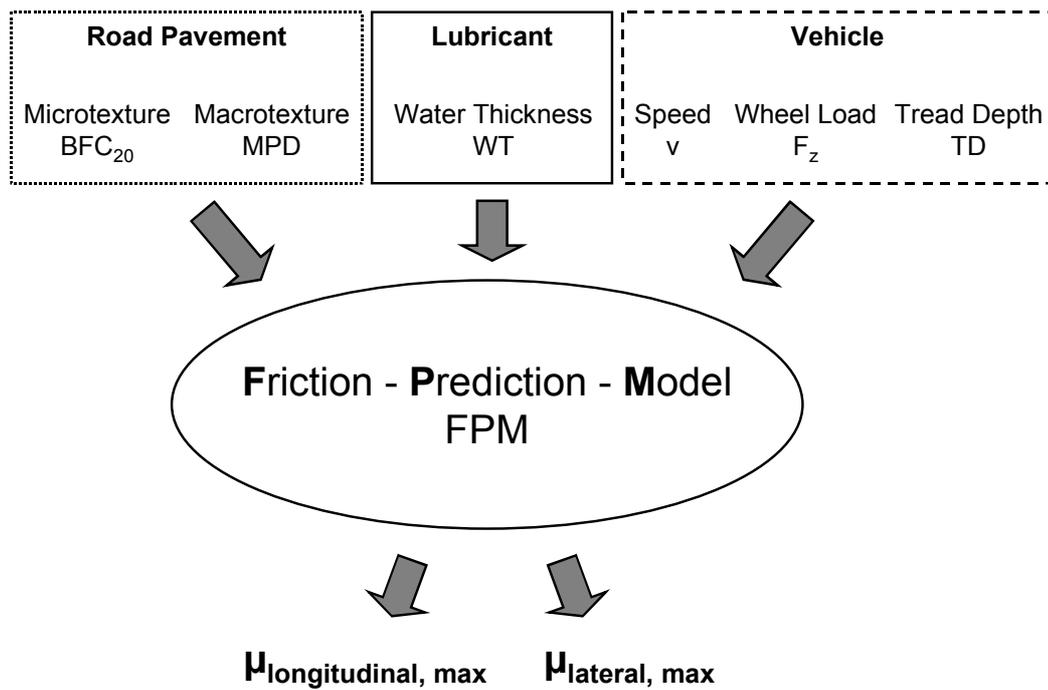


Abbildung 81: Eingangs- und Ausgangsgrößen des FPM
Input and output parameters of FPM

Anhand der durchgeführten Messungen werden zunächst in zwei- und dreidimensionalen Diagrammen Korrelationen zwischen den einzelnen Einflussgrößen und Maximalreibungswerten ermittelt und formelmäßig beschrieben. Dies ermöglicht eine Aussage über die Art der Abhängigkeit (z.B. quadratisch oder exponentiell). Da allerdings die verschiedenen Parameter einen siebendimensionalen Raum aufspannen, ist es zwar möglich einzelne Abhängigkeiten darzustellen, aber Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Einflussgrößen bleiben unberücksichtigt. So haben beispielsweise Radlast und Profiltiefe auf trockener Fahrbahn einen negativen, auf nasser Fahrbahn einen positiven Einfluss auf das Kraftschlusspotential.

Um die verschiedenen Einflüsse und Wechselwirkungen beschreiben zu können wurde daher eine statistische Datenanalyse durchgeführt. Als Programm diente die Statistik Software SPSS© (Statistical Package for the Social Sciences). Diese ermöglicht in einem ersten Schritt die Korrelationsanalyse, mit der Beziehungen zwischen Variablen (Eingangsgrößen) und der Ergebnisvariablen untersucht werden können. Dazu werden sämtliche möglichen und physikalisch sinnvollen Variablenkombinationen, die sich aus den im **Kapitel 4** gewonnenen Erkenntnissen ableiten, vorgegeben und das Maß der Korrelation berechnet. Das Maß des Zusammenhangs zwischen mehreren Variablen kann bei intervallskalierten und normalverteilten Variablen durch den Korrelationskoeffizienten nach Person ausgedrückt werden, **Gleichung 20**. Dieser liegt zwischen -1 und 1 , wobei 1 einen starken, -1 einen starken gegenläufigen und 0 einen

Semi-empirisches Reibwertvorhersagemodell (FPM)

schwachen Zusammenhang zwischen Variable und Ergebnisvariable bedeutet. Auf die Einflussgröße Wasserfilmtiefe und die Ergebnisvariable Reibwert bezogen, ergibt sich somit ein negativer Korrelationskoeffizient, da eine große Wasserfilmtiefe einen geringen Reibwert bedingt.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{(n-1) * s_x * s_y} \quad (33)$$

mit: x_i, y_i Variablen
 n Anzahl der Wertepaare
 \bar{x}, \bar{y} Mittelwerte
 s_x, s_y Standardabweichungen

Zur Aufstellung des Modells wurden nur Zusammenhänge verwendet, die eine hohe oder sehr hohe Korrelation ($r > 0,7$ [SPSS]) aufweisen.

Des Weiteren ergibt die Berechnung die Irrtumswahrscheinlichkeit p . Diese sollte möglichst nahe Null liegen. Aus diesen Berechnungen werden nun die signifikanten Einflussparameter und -kombinationen abgeleitet.

In einem zweiten Schritt wird mit Hilfe einer multiplen Regressionsanalyse die Art des Zusammenhangs zwischen den Variablen ermittelt, d.h. die Vorfaktoren für den gewählten Polynomansatz berechnet. Durch Verwendung der schrittweisen Regressionsmethode werden nacheinander die Variablen, die mit der Abhängigen den höchsten partiellen Korrelationskoeffizienten aufweisen, in die Gleichung aufgenommen. Hierzu wird die Methode der kleinsten Fehlerquadrate verwendet, **Gleichung 34**, und die Vorfaktoren der unabhängigen Variablen, bzw. -paare K_1 bis K_n so lange variiert, bis der Fehler minimal wird.

$$\sum (\mu_g - \mu_b)^2 \rightarrow \text{Min} \quad (34)$$

mit: μ_g gemessener Reibwert
 μ_b berechneter Reibwert

Das damit aufgestellte Berechnungsmodell wird anschließend anhand von neuen Reibwertmessungen, die nicht zur Modellbildung herangezogen wurden, überprüft. Die Randbedingungen dieser Validierungsmessungen liegen innerhalb der Parametergrenzen des Modells. Als Beurteilungskriterium hinsichtlich der Modellgüte wird zunächst der qualitative Verlauf der berechneten Reibwerte in Abhängigkeit von den variierten Einflussgrößen betrachtet. Anschließend werden die Abweichungen von berechnetem zu

gemessenem Reibwert ausgewertet. Damit ergibt sich folgender Ablauf der Modellbildung, **Abbildung 82**:

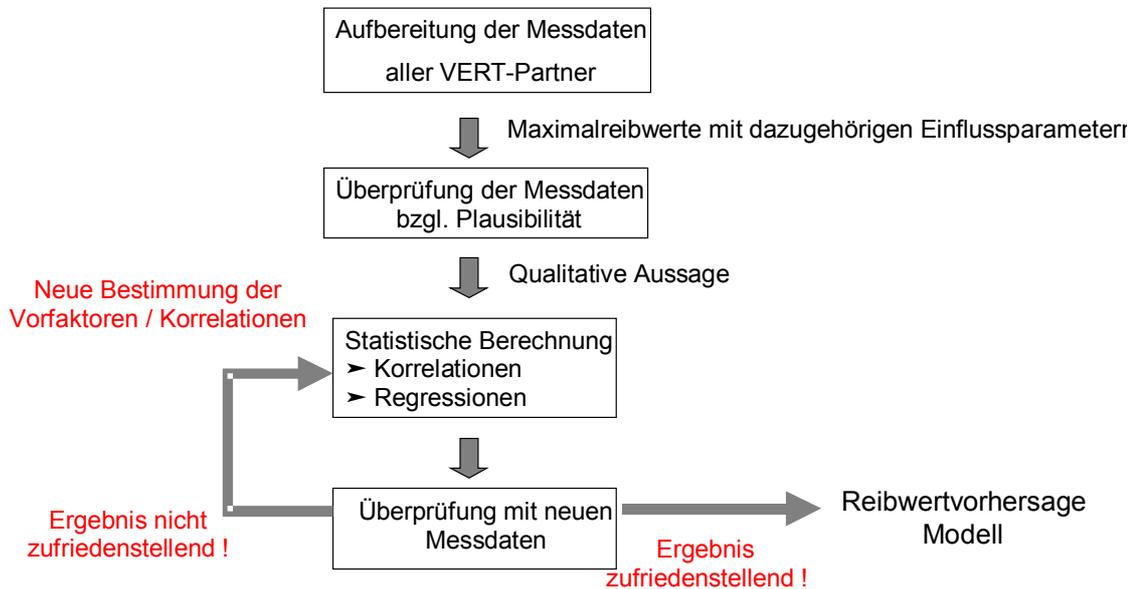


Abbildung 82: Schematischer Ablauf der Modellbildung
Schematic proceeding of model development

Nach mehreren Iterationsschritten haben sich folgende Modelle herauskristallisiert:

Modell 1 zur Berechnung des maximalen Längsreibwerts:

$$\mu_{x,max} = K0 + K1*WD + K2*WD*v + K3*WD*v*v + K4*WD*MPD + K5*Fz + K6*Fz*MPD + K7*Fz*v*v + K8*TD + K9*TD*BFC_{20} + K10*v + K11*v*v + K12*MPD*v + K13*MPD*v*v + K14*BFC_{20}/v + K15*MPD*MPD + K16*BFC_{20}^{0,5} \quad (35)$$

mit:	K0	Ordinatenabschnitt (Offset)
	K1 – K16	Regressionskoeffizienten der berücksichtigten Variablen, bzw. Variablenpaare
	WD	Wasserfilmtiefe [mm]
	v	Geschwindigkeit [km/h]
	MPD	Mean Profile Depth [mm]
	Fz	Radlast [N]
	TD	Tread Depth [mm]
	BFC ₂₀	Brake Friction Coefficient []

Semi-empirisches Reibwertvorhersagemodell (FPM)

Das Polynom des Modells ist für den gesamten Bereich innerhalb der Parametergrenzen gültig und berücksichtigt die definierten Haupteinflussgrößen einzeln oder in Produkten. Es fällt auf, dass dem starken Einfluss der Geschwindigkeit mehrmals durch quadratische Berücksichtigung Rechnung getragen wird. Da der Einfluss der Mikrotextur vor allem im niedrigen Geschwindigkeitsbereich dominant ist, taucht diese in dem Modell nur einzeln, bzw. mit der Geschwindigkeit im Nenner auf. Andere Variablen-Produkte, bzw. Quotienten wie z.B. WD/TD oder $MPD \cdot BFC_{20}$ wurden bei der Korrelationsanalyse als nur gering signifikant bewertet und sind deshalb bei der Modellbildung unberücksichtigt.

Bei der Auswertung der Reibwertmessungen (siehe Kapitel 4), zeigte sich des Weiteren, dass einzelne Parameter speziell bei hoher, andere vor allem bei geringer Geschwindigkeit dominant sind. Daher wurde zusätzlich zum Modell 1, welches den gesamten Bereich innerhalb der Parametergrenzen beschreibt, ein geteiltes Modell entwickelt. Dieses setzt sich zusammen aus einem Teil zur Beschreibung des Geschwindigkeitsbereichs von kleiner 60km/h und aus einem Teil gültig für den Bereich 60km/h und höher.

Modell 2 zur Berechnung des maximalen Längsreibwerts (mit Unterteilung des Gültigkeitsbereichs $v < 60\text{km/h}$ und $v \geq 60\text{km/h}$):

$v < 60\text{km/h}$:

$$\mu_{x,\max} = K_0 + K_1 \cdot WD + K_2 \cdot WD \cdot v + K_3 \cdot WD \cdot v \cdot v + K_4 \cdot F_z + K_5 \cdot F_z \cdot v \cdot v + K_6 \cdot TD + K_7 \cdot TD \cdot BFC_{20} + K_8 \cdot v + K_9 \cdot v \cdot v + K_{10} \cdot BFC_{20} + K_{11} \cdot BFC_{20} \cdot BFC_{20} \quad (36)$$

$v \geq 60\text{km/h}$:

$$\mu_{x,\max} = K_0 + K_1 \cdot WD + K_2 \cdot WD \cdot v + K_3 \cdot WD \cdot v \cdot v + K_4 \cdot WD \cdot MPD + K_5 \cdot F_z + K_6 \cdot F_z \cdot MPD + K_7 \cdot F_z \cdot v \cdot v + K_8 \cdot TD + K_9 \cdot v + K_{10} \cdot v \cdot v + K_{11} \cdot MPD \cdot v + K_{12} \cdot MPD \cdot v \cdot v \quad (37)$$

In diesem geteilten Modell wird u.a. berücksichtigt, dass die Mikrotextur vor allem im unteren Geschwindigkeitsbereich und bei trockener Fahrbahn einen sehr großen Einfluss auf den Maximalreibwert besitzt. Bei der Makrotextur wird deren große Bedeutung im Zusammenspiel mit dem Zwischenmedium vorallem bei hohen Geschwindigkeiten herausgestellt. Diese klare Aufteilung der Fahrbahneigenschaften ist zwar nur eine Annäherung an die realen Zustände, jedoch wird dadurch beispielsweise verhindert, dass die Makrotextur bei niedriger Geschwindigkeit zu stark gewichtet wird. Dies würde zu hohe Anfangsreibwerte bewirken. Ein weiterer Grund für eine geschwindigkeitsabhängige Einteilung des Modells liegt in der Verdrängung und der Wirkung eines Wasserfilms im Reifenlatsch. So bildet sich, in Abhängigkeit vom Reifeninnendruck,

Radlast und Profiltiefe, im Geschwindigkeitsintervall von 50 bis 80km/h ein Übergangsbereich aus, bei dem der Wasserkeil beginnt, in den Reifenlatsch einzudringen. Ab dieser Geschwindigkeit nimmt der Einfluss der Wasserfilmdicke stark zu [82]. Beide Modelle (1 und 2) für die Längsrichtung basieren auf insgesamt $n = 271$ Messkurven.

Eine weitere Möglichkeit, um eine höhere Modellgüte zu erreichen, wurde aus Kapazitätsgründen im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt: So wäre es beispielsweise denkbar, das Modell für trockene und nasse Fahrbahnen zu unterteilen. Dies hätte den Vorteil, dass speziell die Einflussparameter, die auf trockener und nasser Fahrbahn gegenläufige Auswirkungen auf den Reibwert zeigen, von Beginn an entsprechend gewichtet und mit dem richtigen Vorzeichen versehen wären.

Analog zur Bestimmung des Maximalreiwerts in Längsrichtung wurde ein Modell zur Berechnung des Kraftschlusspotentials in Querrichtung entwickelt:

$$\mu_{y,\max} = K0 + K1*WD + K2*WD*v + K3*WD*v*v + K4*WD/MPD + K5*Fz + K6*Fz + K14*BFC_{20}/v + K15*BFC_{20}^{0,5} + K16*WD*WD + K17*WD/Fz + K18*WD*v*v/Fz + K19*WD/TD + K20*BFC_{20}/(2,71825^{WD}) \quad (38)$$

Dieses Modell bestimmt den Maximalreiwert in Querrichtung für den gesamten Geschwindigkeitsbereich. Es kristallisierten sich Kombinationen heraus, bei denen sich Einflussfaktoren mit gegensätzlicher Wirkung auf Zähler und Nenner verteilen. Die große Bedeutung der Wasserfilmdicke auf den Querreiwert zeigt sich in der mehrfachen Berücksichtigung dieser in den Produkten des Polynoms. Im Vergleich zu den beiden Modellen in Längsrichtung basiert das Modell für die Querrichtung auf einer deutlich geringeren Anzahl von Messwerten ($n = 73$).

5.1.2 Berechnungsergebnisse und Vergleich mit Messungen

Im Folgenden sollen beispielhaft einige Ergebnisse der Berechnungen mit den semi-empirischen Modellansätzen dargestellt und diskutiert werden. Wichtig hierbei ist, dass der Einfluss der Parameter richtig wiedergegeben wird und dass die teilweise gegensätzlichen Auswirkungen einzelner Größen auf den Reibwert deutlich werden.

In einer ersten Berechnung mit dem Modell 1, **Abbildung 83**, ist der Einfluss der Radlast und der Profiltiefe auf den Maximalreiwert in Längsrichtung dargestellt. Es fällt auf, dass bei der gewählten Wasserfilmdicke von $WT = 1\text{mm}$ und einer Geschwindigkeit von $v = 50\text{km/h}$ der Einfluss der Radlast nur sehr gering ist. Dies erscheint sinnvoll, da bei dieser Geschwindigkeit und einer recht groben Makrotextur

Semi-empirisches Reibwertvorhersagemodell (FPM)

(MPD = 0,7mm) ausreichend Zeit zur Verdrängung des Wassers aus dem Reifenlatsch besteht. Der Maximalreibwert steigt linear mit der Profiltiefe an.

Bei einer Geschwindigkeit von $v = 100\text{km/h}$ kehrt sich der Einfluss der Radlast um. Es sind deutliche Unterschiede der maximalen Reibwerte bei geringer und hoher Radlast zu erkennen: so steigt der Reibwert deutlich mit der Radlast an ($\Delta\mu \approx 0,1$). Dies ist u.a. auf die geringe Zeitspanne, die dem Reifen verbleibt, um das Wasser aus der Reifenaufstandsfläche zu verdrängen ($\Delta t < 0,004\text{s}$) und auf die wirkenden hydrodynamischen Kräfte zurückzuführen. Gegen diese Kräfte muss der Reifen arbeiten, um einen Kontakt mit der Fahrbahn zu bekommen und Längskräfte übertragen zu können. Der Einfluss der Profiltiefe ist, wie bereits bei geringer Geschwindigkeit dargestellt, linear und geschwindigkeitsunabhängig.

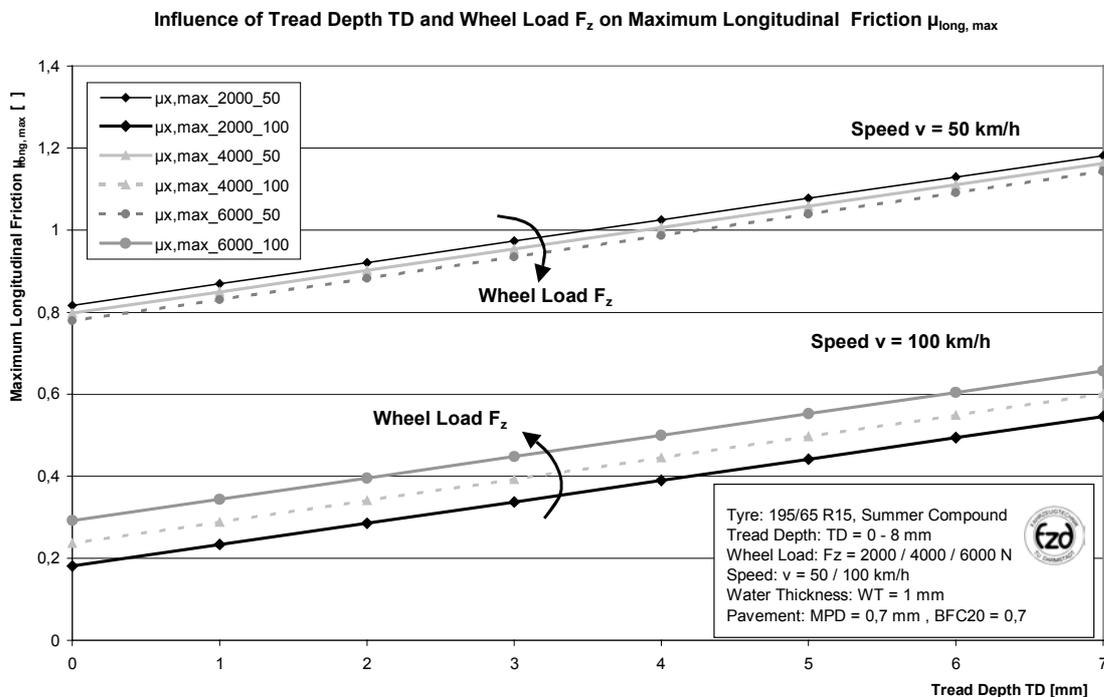


Abbildung 83: Einfluss von Profiltiefe und Radlast auf den Maximalreibwert in Längsrichtung bei einer Wasserfilmdicke von 1mm
Influence of tread depth and wheel load on maximum friction in longitudinal direction at a water thickness of 1mm

Als nächstes werden der Einfluss der Wasserfilmdicke WT und der Makrotextur der Fahrbahn MPD unter Verwendung des Modells 1 untersucht, **Abbildung 84**. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei den gewählten Randbedingungen (Geschwindigkeit $v = 100\text{km/h}$, Profiltiefe $TD = 4\text{mm}$, Radlast $F_z = 4000\text{N}$) die Makrotextur einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe des Kraftschlusspotentials hat. Die Reibwerte, die bei einer geringen MPD erreicht werden, sind, obwohl eine scharfe Mikrotextur vorhanden ist ($BFC_{20} = 0,7$), speziell bei einer hohen Wasserfilmdicke gering. Dies

liegt unter anderem daran, dass der positive Einfluss der scharfen Texturkörner kaum zum Tragen kommt, da nur eine geringe Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn existiert und das Wasser nur unzureichend aus dem Reifenlatsch entfernt werden kann. Da die Wasserfilmdicke die Höhe des Wasserfilms oberhalb der Aggregate beschreibt, ist hier also weniger das Wasseraufnahmevermögen der Fahrbahn entscheidend, als vielmehr das Wasserdrainagevermögen von Fahrbahn und Reifen. Die Steigung der Kurven gleicher Wasserfilmdicke nehmen mit zunehmender MPD ab. Dies bedeutet, dass bei einer sehr hohen MPD (in diesem Beispiel bei einer MPD von 2,1mm) eine Sättigung erreicht wird. Dies entspricht der Realität, da bei sehr hohen Texturspitzen die Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn sehr gering ist und trotz Verzahnungseffekt und starker Hysterese die übertragbaren Kräfte abnehmen.

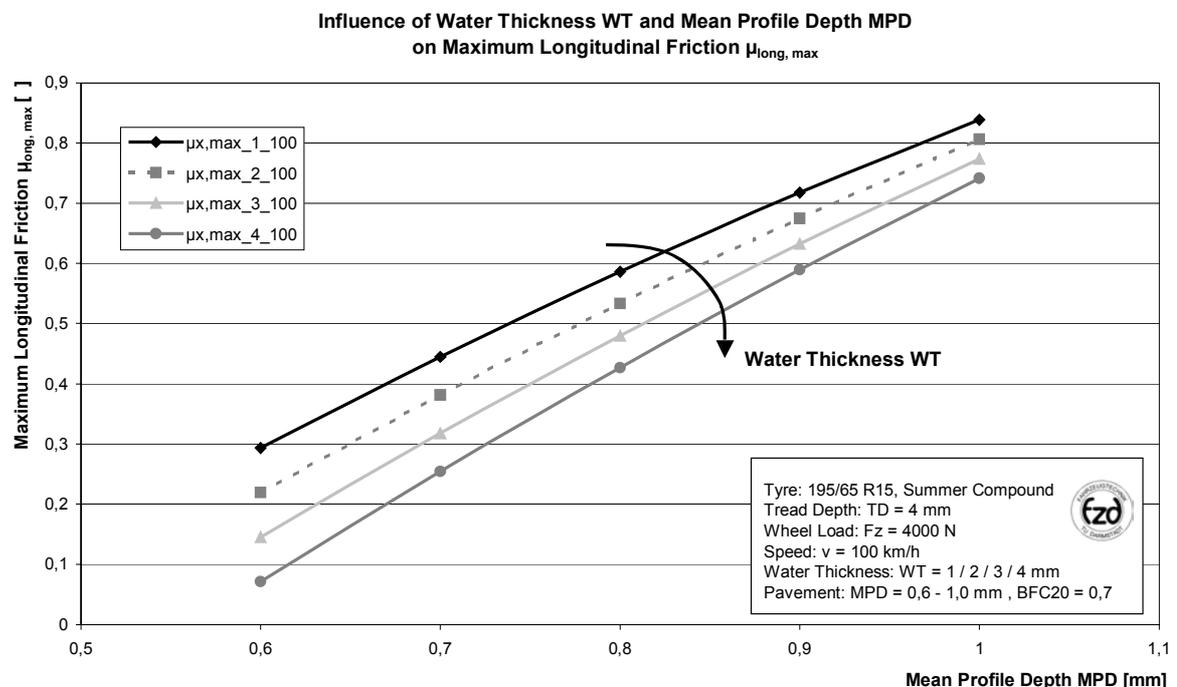


Abbildung 84: Einfluss von Wasserfilmtiefe und Makrotextur auf den berechneten Maximalreibwert in Längsrichtung
Influence of water thickness and macrotexture on calculated maximum friction in longitudinal direction

Um das Zusammenspiel von Wasserfilmtiefe (im Bereich von WT = 1 bis 8mm) und Geschwindigkeit (20 bis 100km/h) zu verdeutlichen, wurde in **Abbildung 85** das Reibwertmaximum in Längsrichtung in Abhängigkeit dieser beiden Größen dargestellt.

Betrachtet man die verschiedenen Grenzbereiche, so zeigt sich bei geringer Geschwindigkeit ein deutlich geringerer Abfall des Reibwerts über der Wasserfilmtiefe, als dies bei hoher Geschwindigkeit der Fall ist. Dies bedeutet, dass das Problem der

Semi-empirisches Reibwertvorhersagemodell (FPM)

Wasserverdrängung durch die geringe zur Verfügung stehende Zeit richtig wiedergegeben wird.

Bei dem Vergleich des Abfalls des Reibwertmaximums bei geringer und großer Wasserfilmtiefe zeigt sich bei einem dicken Wasserfilm ein signifikant steilerer Gradient. Auch dies entspricht den Ergebnissen der durchgeführten Reibwertmessungen, siehe **Kapitel 4.2**.

Influence of Water Thickness WT and Speed v on Maximum Longitudinal Friction $\mu_{\text{long, max}}$

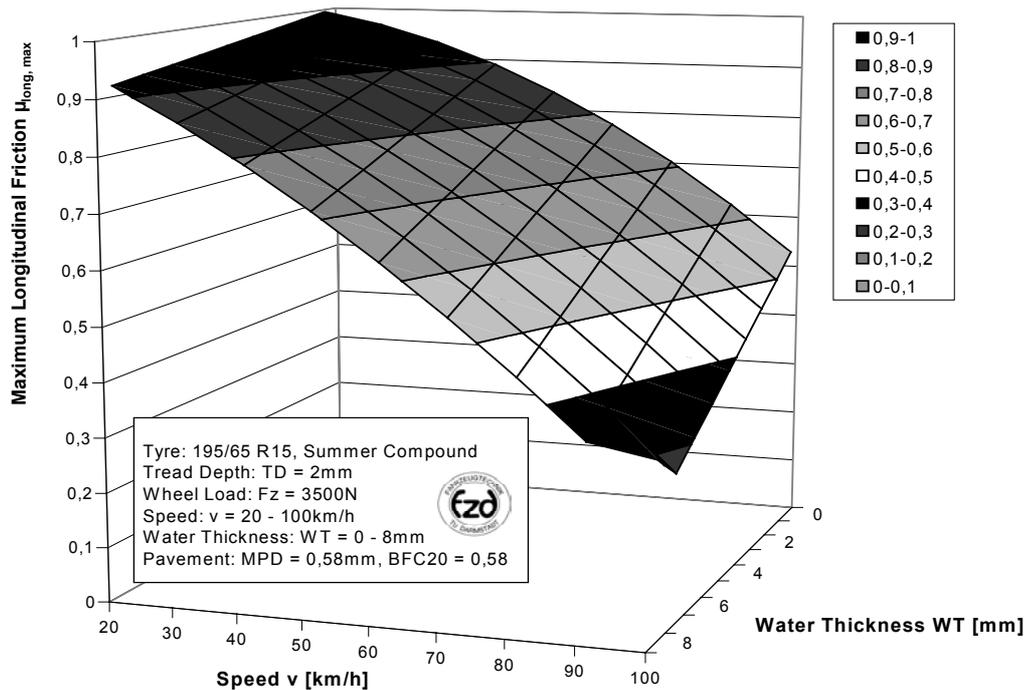


Abbildung 85: Einfluss von Wasserfilmdicke und Geschwindigkeit auf den berechneten Maximalreibwert in Längsrichtung
Influence of water thickness and speed on calculated maximum longitudinal friction

Nachdem der qualitative Verlauf der Reibwerte auf seine Richtigkeit hin überprüft wurde, werden im Folgenden die Berechnungsergebnisse mit realen Messdaten verglichen und diskutiert. In

Abbildung 86 ist eine Messung von CETE der Berechnung mit dem Modell 1 gegenüber gestellt. Bei einer relativ hohen Wasserfilmdicke von $WT = 3\text{mm}$ und einer Radlast von $F_z = 3500\text{N}$ wurde die Profiltiefe von $TD = 2$ bis 7mm und die Geschwindigkeit von $v = 20$ bis 100km/h variiert. Bei Messung und Berechnung ist deutlich der progressive Abfall des Reibwertes über der Geschwindigkeit zu erkennen. Ab einer Geschwindigkeit von $v = 60\text{km/h}$ stimmen die Kurven gut überein. Weniger zufriedenstellend ist das Ergebnis im Bereich geringerer Geschwindigkeiten. Es ergibt

sich ein maximaler Fehler von 11%. Während bei der Messung die Reibwerte unabhängig von der Reifenprofiltiefe auf einem konstanten Niveau liegen, unterscheidet das Modell sehr deutlich. Bei einer Profiltiefe von $TD = 7\text{mm}$ berechnet das Modell Werte, die selbst auf trockener Fahrbahn kaum zu erreichen sind. Der Grund hierfür liegt in der zu starken Gewichtung der Profiltiefe bei geringer Geschwindigkeit.

Da es nur wenige Messungen (insg. 7) bei einem Reibwert kleiner 0,2 gab, konnte das Modell für diesen Bereich nicht verifiziert werden. Deshalb wurde bei Erreichen dieser Reibwertgrenze der berechnete Wert konstant gehalten. Dies bedeutet, dass Aquaplaning (Reibwertbereich von 0,1 bis 0,15) nicht abgebildet werden kann.

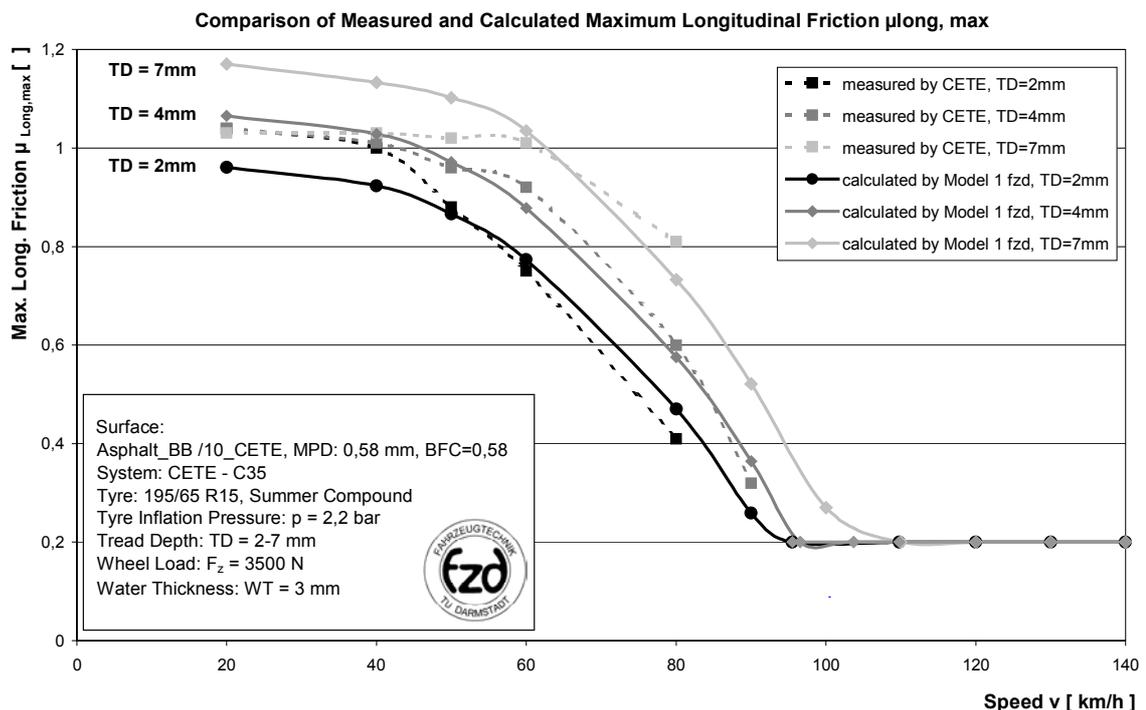


Abbildung 86: Vergleich von gemessenen und berechneten Reibwerten
Comparison of measured and calculated friction coefficient

Um den Konflikt, der sich aus dem stark geschwindigkeitsabhängigen Einfluss verschiedener Parameter ergibt, zu entschärfen, wurde (siehe **Kapitel 5.1.1**) das Modell 2 mit einem geteilten Gültigkeitsbereich entwickelt. Dieses zeigt bei der Gegenüberstellung mit derselben Messung eine bessere Übereinstimmung im Bereich geringer Geschwindigkeiten und stimmt auch bei höheren Geschwindigkeiten gut mit der Berechnung überein, siehe **Abbildung 87**. Allerdings zeigt sich im mittleren Bereich ein stark diskontinuierliches Verhalten, welches zu einem Einbruch der berechneten Maximalreibwerte bei einer Profiltiefe von $TD = 7\text{mm}$ und einer Geschwindigkeit von $v = 60\text{km/h}$ führt.

Semi-empirisches Reibwertvorhersagemodell (FPM)

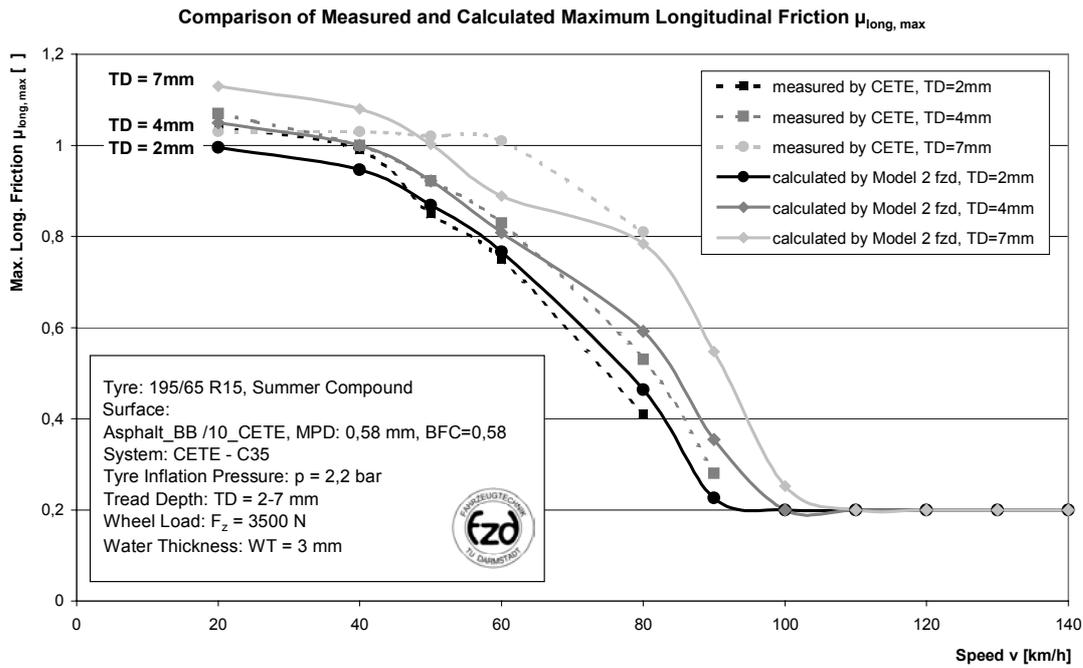


Abbildung 87: Vergleich von gemessenen und berechneten Reibwerten
Comparison of measured and calculated friction coefficient

Fokussiert man nun ausschließlich die Profiltiefe von TD = 4mm und variiert diesmal die Wasserfilmdicke $WD = 1$ bis 8mm, so ergibt sich für das Modell 1 folgender Vergleich mit der Messung, siehe **Abbildung 88**.

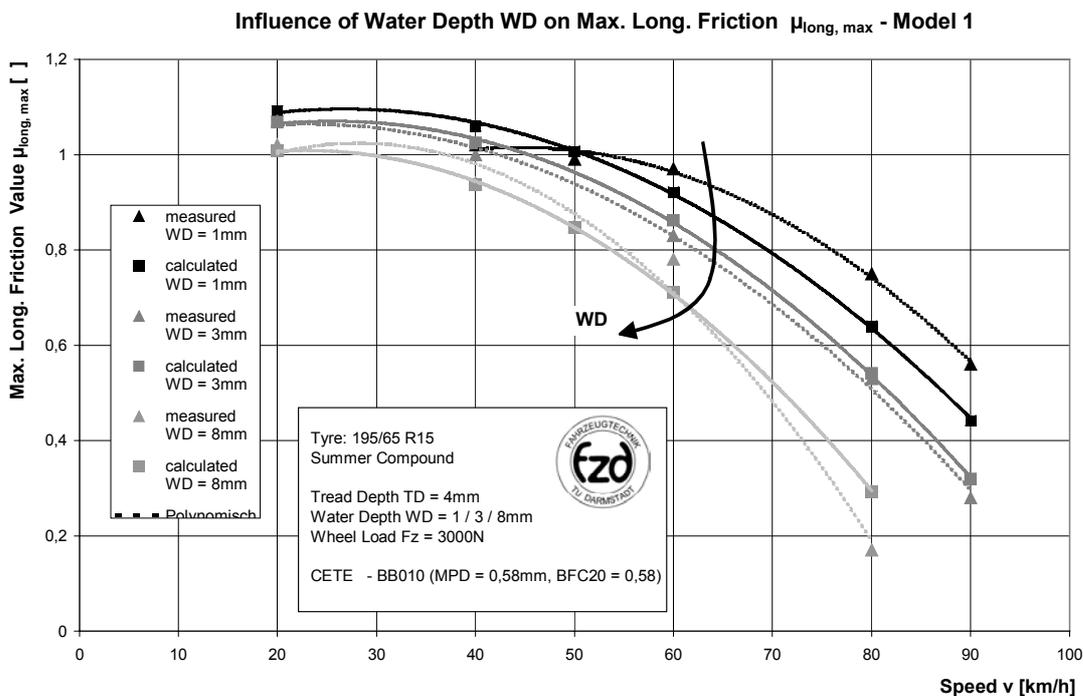


Abbildung 88: Vergleich von gemessenen und berechneten Reibwerten
Comparison of measured and calculated friction coefficient

Speziell bei geringeren Geschwindigkeiten werden die Ergebnisse der Messung gut wiedergegeben. Im Bereich höherer Geschwindigkeiten kommt es zu einer maximalen Abweichung von $\Delta\mu \approx 0,1$. Die Veränderung des Reibwertes bei Zunahme der Wasserfilmtiefe fällt bei der Messung deutlich stärker aus als im Modell. Da jedoch eine stärkere Gewichtung der Wasserfilmdicke bei höheren Geschwindigkeiten stets eine Verschlechterung der Modellgüte in anderen Bereichen zur Folge hatte, wurde von dieser Möglichkeit Abstand genommen.

Betrachtet man nun die Berechnungsqualität des Modell 1 über sämtliche Messungen (5 verschiedene Fahrbahnen, 3 Messsysteme), so zeigt sich folgendes Ergebnis, **Abbildung 89**: Global gesehen ergibt sich eine recht gute Übereinstimmung von Messung und Berechnung. Allerdings wird deutlich, dass im Bereich sehr geringer Reibwerte (hohe Geschwindigkeit, geringe Profiltiefe, hohe Wasserfilmdicke) nur eine relativ geringe Anzahl von Messwerten zur Verfügung steht.

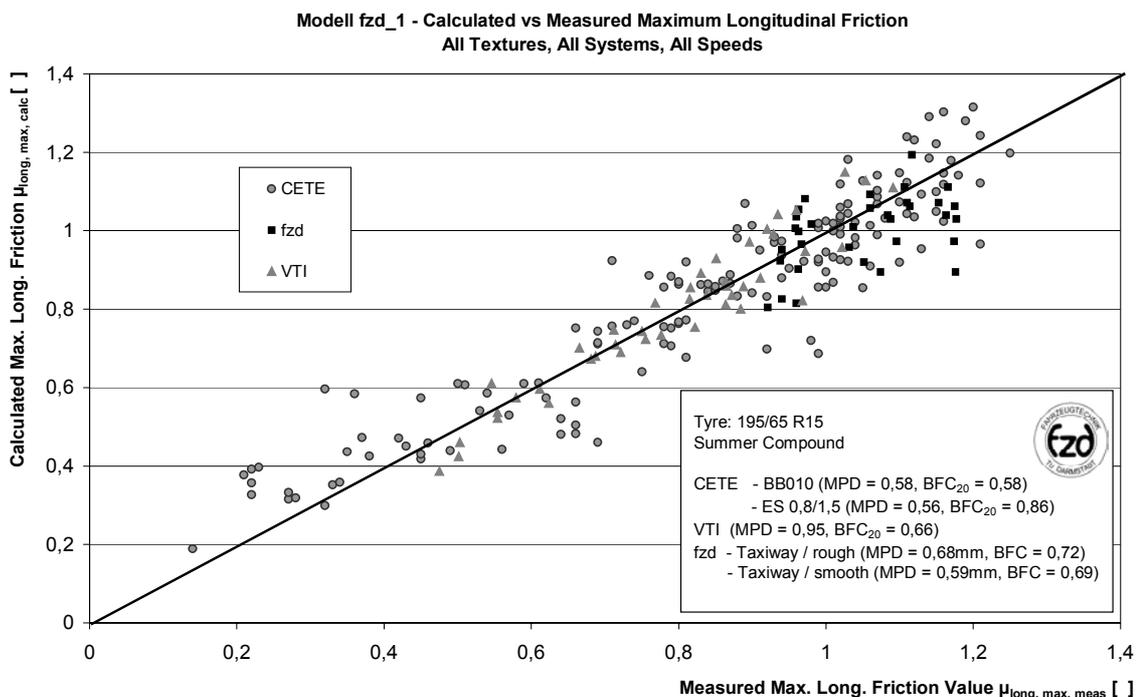


Abbildung 89: Vergleich von gemessenen und berechneten Reibwerten [79]
Comparison of measured and calculated friction coefficient

Die Differenzen zwischen gemessenem und berechnetem Reibwert in dem Bereich von $\mu < 0,35$, ergeben Abweichungen von bis zu 100%. Dies kann vor dem Hintergrund des Einsatzes eines solchen Modells in einem zukünftigen fahrzeuggestützten Reibwertvorhersagesystem sicherlich Schwierigkeiten hervorrufen. Durch den großen Gültigkeitsbereich des Modells und durch die Verwendung mehrerer Messsysteme zur Sammlung der Reibwertdaten war diese Abweichung jedoch kaum zu vermeiden.

Semi-empirisches Reibwertvorhersagemodell (FPM)

Die Modellunschärfe im Bereich der Reibwerte $0,8 < \mu_{\text{long, max, gemessen}} < 1,0$ ist größtenteils auf die Beschreibung des Profiltiefeneinflusses im Bereich geringer Geschwindigkeit zurückzuführen (siehe auch

Abbildung 86) Eine größere Datenbasis, möglichst ermittelt mit nur einem Messsystem, würde helfen, die Regressionskoeffizienten genauer zu bestimmen, eventuell sogar neue Korrelationsterme zu definieren.

Eine weitere Möglichkeit, die Berechnungsgüte zu erhöhen, liegt in der Verwendung eines Modells mit geteiltem Gültigkeitsbereich (Modell 2), **Abbildung 90**. Damit gelingt es, die Abweichungen im Bereich geringer Reibwerte deutlich zu reduzieren und auch im zuvor diskutierten Reibwertbereich von $0,8 < \mu_{\text{long, max, gemessen}} < 1,0$ ergibt sich eine bessere Übereinstimmung. Allerdings können auch hier im ungünstigsten Fall ($\mu_{\text{long, max, gemessen}} < 0,3$) Fehler von 60% beobachtet werden.

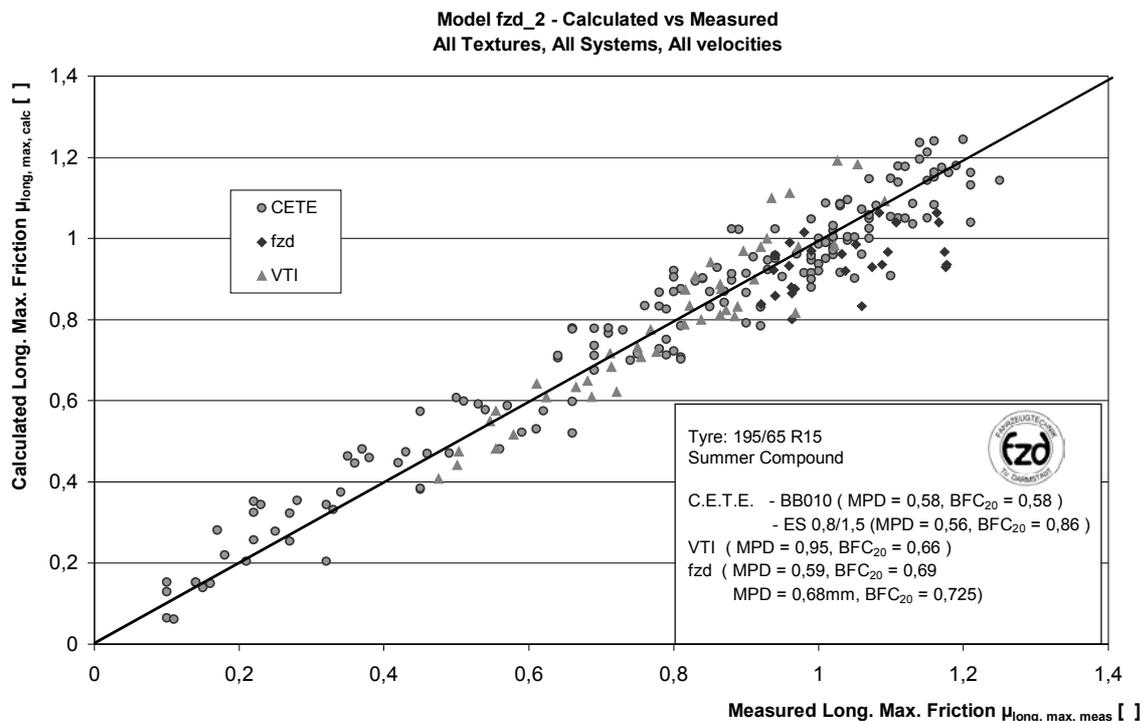


Abbildung 90: Vergleich von gemessenen und berechneten Reibwerten
Comparison of measured and calculated friction coefficient

Betrachtet man nun das Modell für die Querrichtung, so spiegeln sich auch dort die Erkenntnisse der Reibwertmessungen, **Kapitel 4**, wieder. Stellvertretend für sämtliche Variationen der Randbedingungen, soll hier der Einfluss von Profiltiefe und Geschwindigkeit dargestellt werden. Bei einer Wasserfilmdicke von $WT = 3\text{mm}$ auf einer Fahrbahn mit mittlerem Griffniveaue ergibt sich erwartungsgemäß ein starker Einfluss der Profiltiefe auf die Maximalreibwerte in lateraler Richtung, siehe

Abbildung 91. So kann bei dem Vergleich der Profiltiefen von TD = 2 und 8mm eine Reibwertdifferenz von $\Delta\mu = 0,24$ beobachtet werden. Allerdings fällt im Vergleich zu den Messungen und Berechnungen in Längsrichtung auf, dass die Wechselwirkung mit der Geschwindigkeit signifikant geringer ist. Dies zeigt sich zum einen direkt in dem vergleichsweise geringen Abfall des Reibwerts über der Geschwindigkeit (der Abfall nimmt allerdings mit der Wasserfilmtiefe zu), zum anderen ist der Einfluss der Profiltiefe kleiner und über die Geschwindigkeit konstant, d.h. die Abstände der Reibwertlinien gleicher Profiltiefe ändern sich über der Geschwindigkeit nicht.

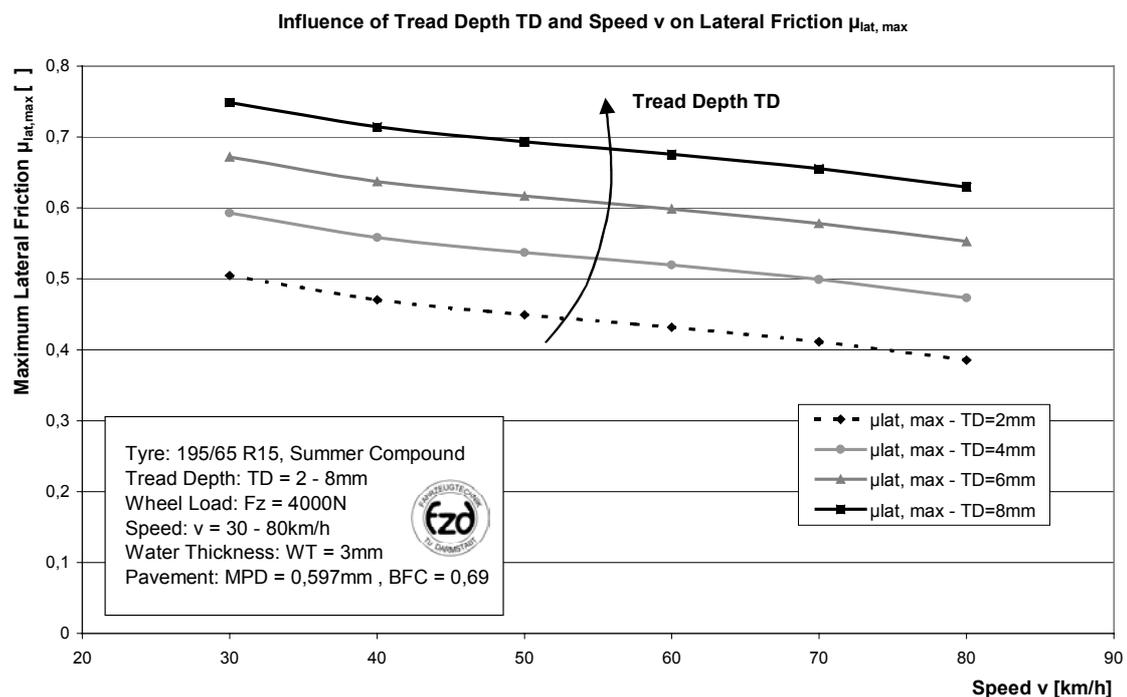


Abbildung 91: Einfluss der Profiltiefe auf den berechneten Maximalreibwert in Querrichtung
 Influence of tread depth on calculated maximum lateral friction

Ein Grund hierfür liegt in der günstigeren Wasserverdrängung unter Schräglauf. Durch eine stark ungleichmäßige Verteilung der Normalkräfte im Reifenlatsch (siehe **Abbildung 74**), kann der Wasserfilm leichter von den Profilelementen durchstoßen und ein großflächiger Kontakt von Reifen und Fahrbahn erzeugt werden.

Der Vergleich der gemessenen und berechneten Maximalreibwerte in Querrichtung bei trockener und nasser Fahrbahn ergibt folgendes Ergebnis, **Abbildung 92**.

Während auf nasser Fahrbahn eine sehr gute Übereinstimmung von Messung und Berechnung zu beobachten ist (die Differenz liegt mit $\mu \approx 0,02$ im Bereich der Messgenauigkeit), ergeben sich bei trockener Fahrbahn größere Abweichungen. Hierbei setzt das Modell eine zu große Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reibwerts voraus.

Semi-empirisches Reibwertvorhersagemodell (FPM)

Diese ist jedoch auf trockener Fahrbahn, siehe **Kapitel 2.1** und **4**, bei den hier berücksichtigten Randbedingungen (relativ geringe Profiltiefe von $TD = 3$ bis 4 mm , recht scharfe Mikrotextrur $BFC_{20} = 0,69$) nicht gegeben.

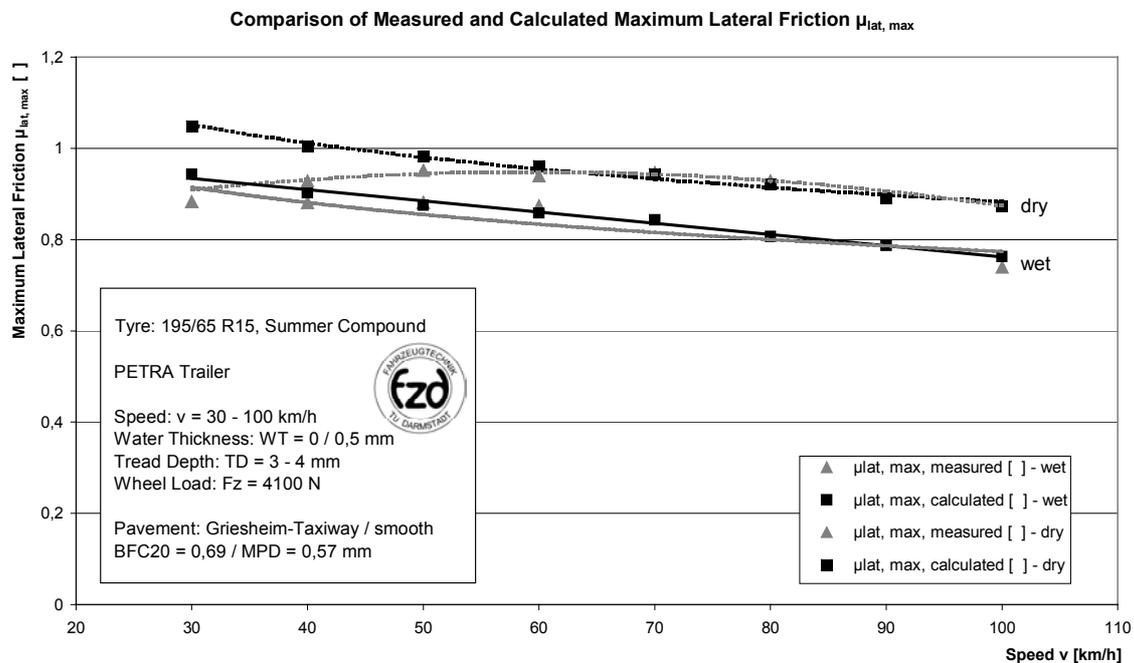


Abbildung 92: Vergleich von gemessenen und berechneten Reibwerten in Querrichtung
Comparison of measured and calculated friction coefficient in lateral direction

Ein Ansatz zur Lösung des Problems könnte in der stärkeren Gewichtung des BFC_{20} -Wertes auf trockener Fahrbahn liegen, wodurch ein geringerer Reibwertabfall über der Geschwindigkeit zu erwarten wäre. Diese Möglichkeit wurde im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weiter verfolgt werden.

Bei der Überprüfung der globalen Modellgüte über sämtliche Messungen und unter Verwendung zweier Messsysteme, ergibt sich eine sehr hohe Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Querreibwerte, **Abbildung 93**. Die Abweichungen, die sich hier ergeben, liegen bei maximal 7%. Dies zeigt, dass zum einen die Haupteinflussparameter richtig gewählt wurden, zum anderen, dass die Verwendung nur weniger Messsysteme (im Idealfall nur eines) die Modellgüte, bzw. die Übereinstimmung von Messung und Berechnung, steigert.

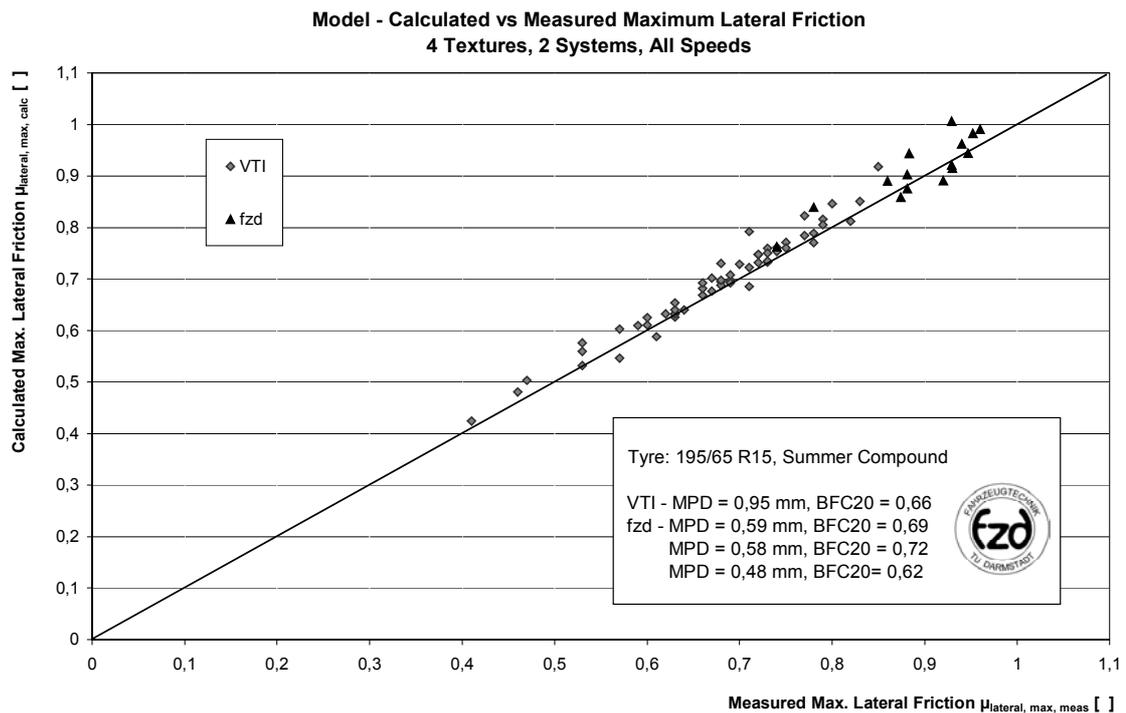


Abbildung 93: Vergleich von gemessenen und berechneten Reibwerten in Querrichtung
 Comparison of measured and calculated friction coefficient in lateral direction

Einschränkend muss jedoch erwähnt werden, dass die Anzahl der Messwerte nur ca. $\frac{1}{4}$ derer in Längsrichtung beträgt und im Bereich sehr geringer Reibwerte ($\mu < 0,4$) keine Messdaten vorliegen.

5.2 fzd – Kontakttiefemodell

Um einen Beitrag zur Bestimmung des Reibwerts zwischen Reifen und Fahrbahn zu liefern, wurde bereits 1993 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik begonnen, ein Kontakttiefemodell zu entwickeln [33]. Dieses Modell beschrieb zunächst das zweidimensionale makroskopische Eindringverhalten eines Texturschnittes in eine profillose Lauffläche. Hierbei wurde der Reifenlatsch durch einzelne Federelemente, die untereinander mit Koppelfedern verbunden sind, beschrieben. In einer zweiten Ausbaustufe [7] wurde auch eine geschwindigkeitsabhängige Latschverformung implementiert, **Abbildung 94**.

Um eine bessere Beschreibung der Interaktion zwischen Reifenlaufstreifen und Fahrbahntextur zu erhalten, musste dieses Modell erweitert werden.

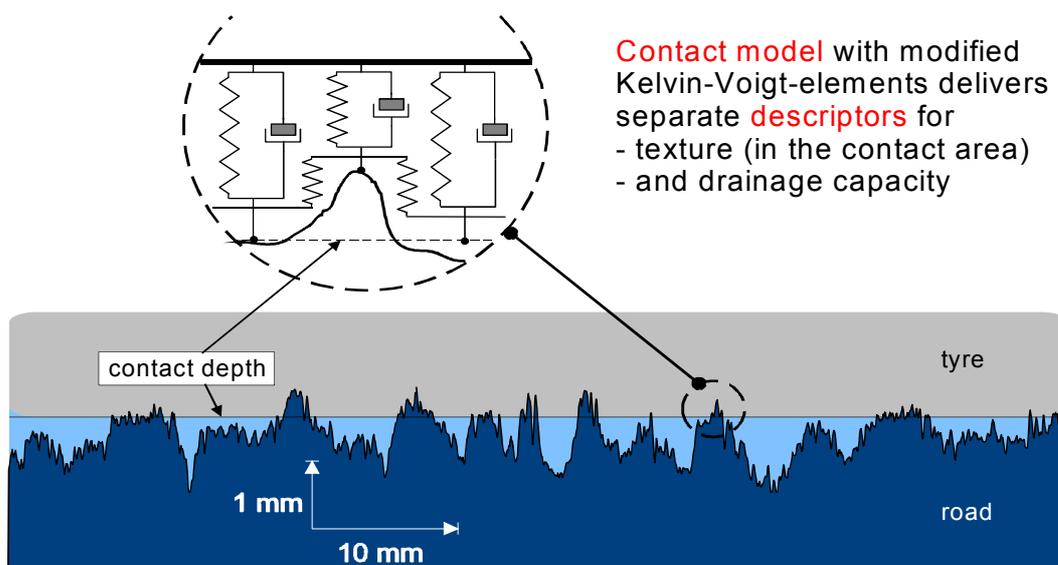


Abbildung 94: Prinzipielle Darstellung des fzd – Kontakttiefemodells [4]
Principle *fzd* – Contact Model

5.2.1 Aufbau des Modells

Basierend auf dem physikalischen Grundprinzip der bisherigen Modellvarianten wurde in einem letzten Weiterentwicklungsschritt die Reifendämpfung berücksichtigt und an reale Materialeigenschaften eines Reifens mit Sommermischung angepasst. Hierzu wurden zunächst die Speicher- und Verlustmodulkennlinien der Mischung herangezogen. Diese wurden von einem Reifenhersteller bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen und unter Variation der Anregungsfrequenzen mittels Stauch-, Dehn- und Torsionsversuchen an Gummiprüfungen ermittelt. So ergaben sich z.B. die in **Abbildung 95** exemplarisch dargestellten Kurven bei einer Prüftemperatur von 70°C. Da sich bei Trockenbremsungen ähnliche Temperaturen im Laufstreifen entwickeln, können die ermittelten Modulkennwerte zur Beschreibung des Trockenbremsverhaltens der Laufstreifenmischung herangezogen werden.

Die Zielsetzung der aktuellen Version des Kontaktmodells liegt nicht in der Beschreibung der Gleitvorgänge von Profilelementen relativ zur Fahrbahn. Daher interessieren hier auch weniger die hochfrequenten Anregungen durch die Mikro- und Makrorauigkeiten der Fahrbahntextur (Anregungsfrequenzen bis in den Megahertzbereich), siehe [125]. Es soll vielmehr die rein vertikale Bewegung eines F-D-Elementes, als Teil eines Profilblocks, beim Auftreffen auf die Fahrbahn und Durchlaufen des Reifenlatsches betrachtet werden.

Die Wechselwirkungen durch Spannungen in Längs- und Querrichtung werden hierbei vernachlässigt, obwohl diese zu einer Änderung der Profilelementeigenschaften führen [41].

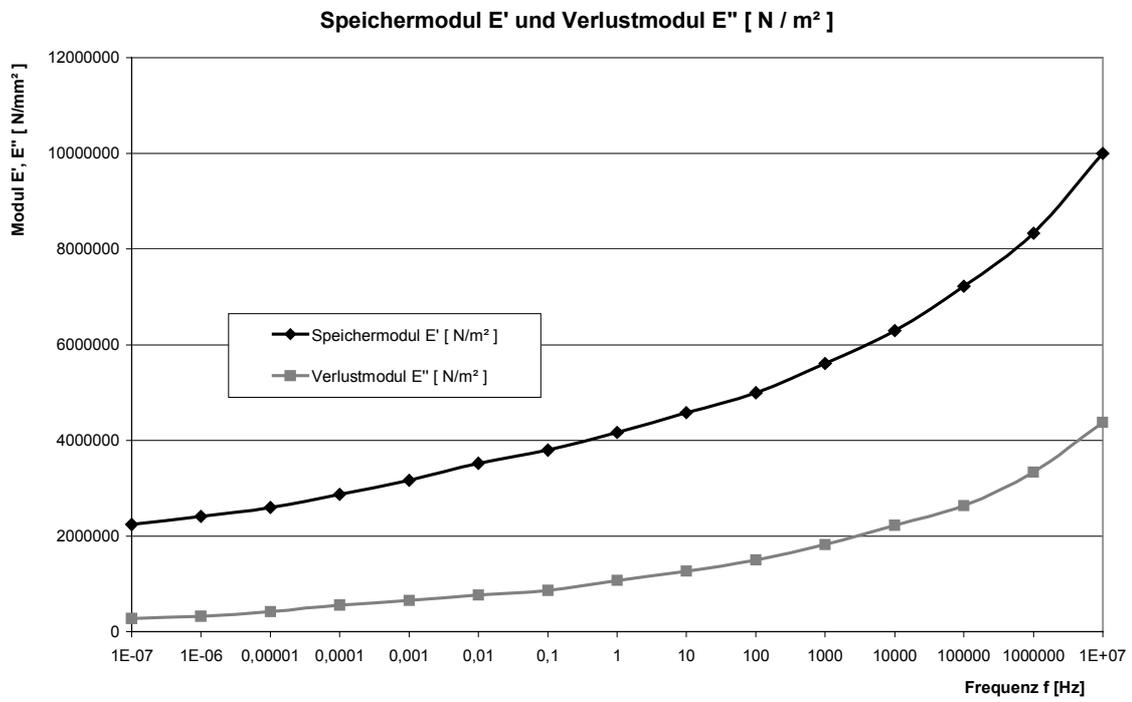


Abbildung 95: Speicher- und Verlustmodul einer Sommermischung
Elastic and lost module of a summer compound

Bei Betrachtung eines Geschwindigkeitsbereichs von $v = 30\text{km/h}$ bis 160km/h und einer angenommenen Latschlänge von $L = 0,15\text{m}$ steht der Fahrbahn die Zeit Δt zur Verfügung, um in den Laufstreifen einzudringen:

$$\Delta t(30\text{km/h}) = \frac{L}{v} = \frac{0,15\text{m} \cdot 3,6}{30\text{m}} = 0,018\text{s} \quad (39)$$

$$\Delta t(160\text{km/h}) = \frac{L}{v} = \frac{0,15\text{m} \cdot 3,6}{160\text{m}} = 0,00337\text{s} \quad (40)$$

Hierbei wird angenommen, dass die Texturspitze am Ende des Latschdurchlaufs komplett eingedrungen ist. Bezieht man dieses Ergebnis nun auf eine sinusförmige Anregung, wie sie bei Prüfstandsversuchen aufgebracht wird, so stellt die obige Zeitdifferenz die Zeit dar, die die Messspitze zur Verfügung hat, um von einem definierten, vorgespannten Zustand mit der Amplitude \hat{A} in den Gummikörper einzudringen, siehe **Abbildung 96**:

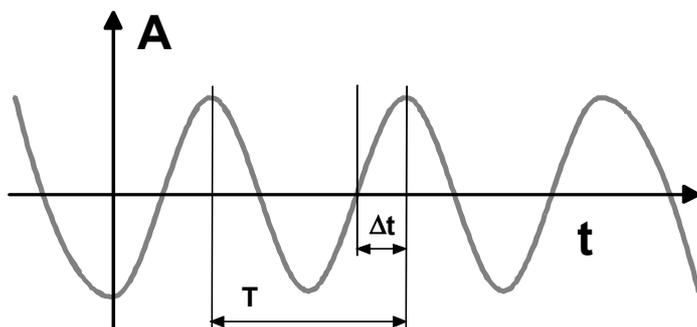


Abbildung 96: Sinusförmige Anregung
Sinusoidal stimulation

Damit ergeben sich Periodendauer und Anregungsfrequenz zu:

$$T(v) = 4 \cdot \Delta t(v) \quad (41)$$

$$T(30\text{km/h}) = 0,072\text{s}$$

$$T(160\text{km/h}) = 0,0135\text{s}$$

$$f(v) = \frac{1}{T} \quad (42)$$

$$f(30\text{km/h}) = 13,89\text{Hz}$$

$$f(160\text{km/h}) = 74,07\text{Hz}$$

Damit ergibt sich ein für das Modell relevanter Frequenzbereich von 10 bis 100Hz, für den Speicher- und Verlustmodul bestimmt werden müssen. Eine Auswertung der Messdaten, siehe **Abbildung 95** ergab folgenden Zusammenhang:

$$E': \quad E'(f) = 416522 \cdot f^{0,0419} \quad (43)$$

$$\text{mit } R^2 = 0,9978$$

$$E'': \quad E''(f) = 106345 \cdot f^{0,0767} \quad (44)$$

$$\text{mit } R^2 = 0,9988$$

Dies ermöglicht es nun, die Materialeigenschaften abhängig von der Radumfangsgeschwindigkeit vorzugeben.

Um die Übertragbarkeit der Materialeigenschaften auf das reale Verhalten der Laufstreifenmischung beim Eindringen der Fahrbahnkörner gewährleisten zu können, wurden Eindringuntersuchungen mit geometrisch definierten Prüfkörpern unter Verwendung eines Hydropulsers durchgeführt.

Als Prüfkörper kamen zum einen ein Kegel ($h=30\text{mm}$, $\alpha=30^\circ$), zum anderen eine Kugel ($d=12\text{mm}$) zum Einsatz. Beide Prüfkörper wurden mit Kraftmessdosen ausgestattet und mit der Kolbenstange des Hydropulsers verbunden, **Abbildung 97**. Des Weiteren wurden 200mm lange Teile des Reifenlaufstreifens auf eine Halterung gespannt. An der Rückseite der Halterung wurde eine Kraftmessdose befestigt und in einen Lagerbock eingespannt. Hiermit war es nun möglich, sowohl die Reaktionskräfte auf ein Eindringen der Prüfkörper in ein profiliertes Reifenstück an 6 verschiedenen Profilelementen ermittelt, als auch den zeitlichen Verzug zwischen den Kräften am Prüfkörper und der Halterung festzustellen.

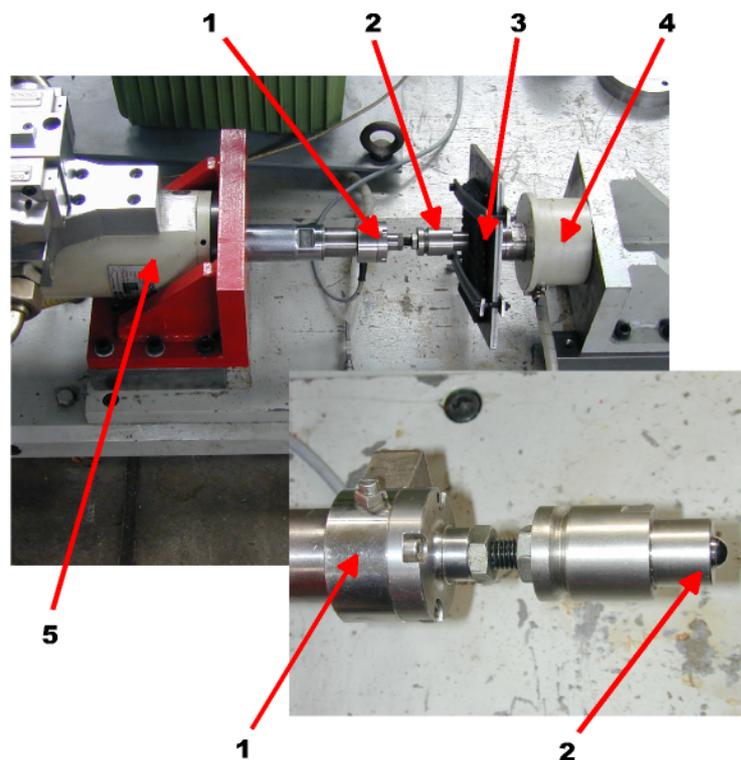


Abbildung 97: Versuchsaufbau Hydropulser
Test facility Hydropulser

- mit:
- 1 vordere Kraftmessdose
 - 2 Prüfkörper (Kegel oder Kugel)
 - 3 Laufstreifenprobe
 - 4 hintere Kraftmessdose
 - 5 Druckzylinder

Durch Variation der Eindringgeschwindigkeit (Frequenz $f = 0,01\text{Hz}$ bis 100Hz) und des Eindringwegs (Amplitude $A_z = 1\text{mm}$ bis 4mm) konnten die vertikale Steifigkeit c_z und die vertikale Dämpfung d_z der Lauffläche ermittelt werden, **Abbildung 98**.

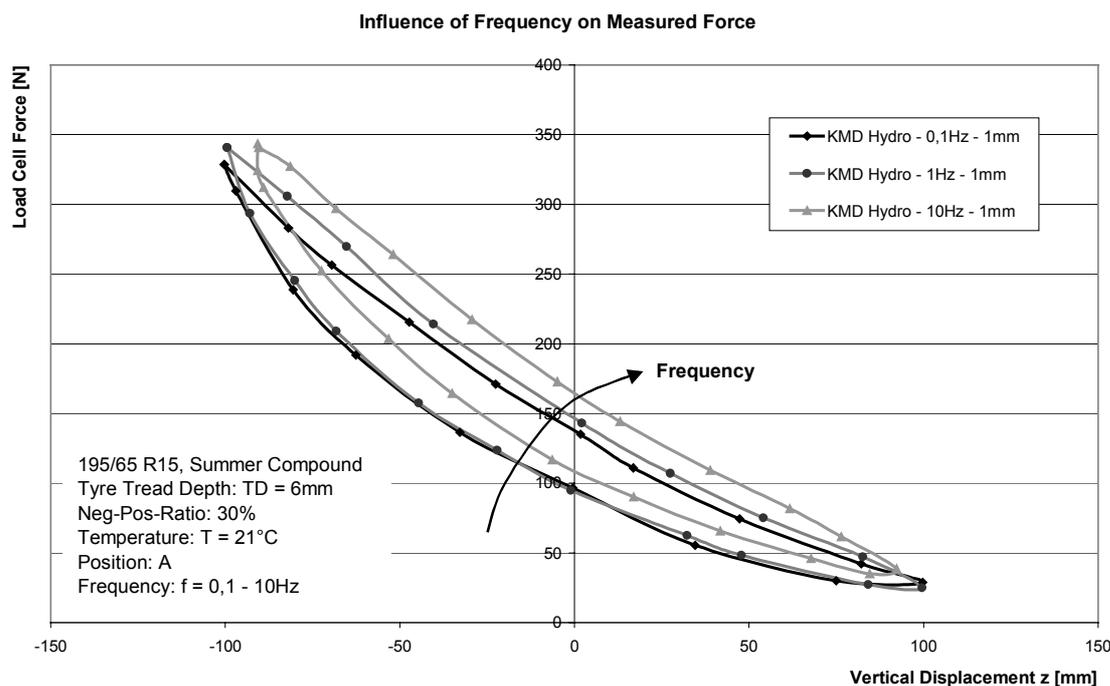


Abbildung 98: Kraft-Weg-Diagramm bei Variation der Anregungsfrequenz
Force-displacement-diagram under variation of frequency

Der „bananenförmige“ Verlauf der Hystereseschleifen ergibt sich aus der Veränderung der projizierten Flächen und der Erhöhung des zu verdrängenden Volumens beim Eindringen der kegel- und kugelförmigen Prüfkörper in das Profilelement:

Kegel:
$$A_{\text{kegel, proj}} = \pi * z^2 \left[\frac{1}{(\cos \alpha)^2} - 1 \right] \quad (45)$$

$$V_{\text{kegel}} = \frac{\pi}{3} * z^3 \left[\frac{1}{(\cos \alpha)^2} - 1 \right] \quad (46)$$

mit: α Kegelwinkel
 z Eindringtiefe

Kugel:
$$A_{\text{kugel, proj}} = \frac{\pi}{4} \left[\frac{4}{D} (D * z - z^2) \right]^2 \quad (47)$$

$$V_{\text{kugel}} = \pi * z^2 \left[\frac{D}{2} - \frac{z}{3} \right] \quad (48)$$

mit: D Außendurchmesser
 z Eindringtiefe

Bedingt durch die Massenträgheiten von Prüfkörper, Kolbenstange, Kraftmessdose und Halterung ließen sich mit dieser Methode bei Amplituden von $A_z = 1\text{mm}$ keine

Anregungsfrequenzen oberhalb von $f = 10\text{Hz}$ realisieren. Dies führte bei dem gewählten Versuchsaufbau stets zu einer Verringerung der aufgeprägten Amplitude.

Um das modellmäßig beschriebene Kontaktverhalten im Reifenlatsch auf den dreidimensionalen Bereich zu erweitern, wurde in dem neuen Modell die Reifenbreite bei der Berechnung der Eindringtiefe und der Kontaktfläche berücksichtigt. Diese hat bei gegebener Radlast einen Einfluss sowohl auf die mittlere Eindringtiefe (die Radlast verteilt sich auf eine entsprechend größere/kleinere Aufstandsfläche) als auch auf die wirksame Kontaktfläche. So haben Niederquerschnittsreifen beispielsweise die Eigenschaft, dass sich das Verhältnis von Latschlänge zu Latschbreite im Vergleich zum Normalreifen umkehrt. Anzumerken bleibt, dass die Erhöhung des Kraftschlusspotentials von Breitreifen (bei trockener Fahrbahnoberfläche) nur zum Teil auf die geringfügige Erhöhung der Kontaktfläche zurückzuführen ist, sondern sich vielmehr aus der, über den Reifenlatsch, gleichmäßigeren Flächenpressungsverteilung ergibt.

Die Berücksichtigung der Reifenprofilierung geschieht über die Vorgabe der Profiltiefe und des Pos.-Neg.-Anteils. Dabei werden jeweils identisch breite, lateral verlaufende Profilkannäle im Reifenlatsch erzeugt. Die Profiltiefe wird ausschließlich benutzt, um das Wasseraufnahmevermögen des Reifens zu bestimmen. Die Veränderung der Profilelementsteifigkeit in Abhängigkeit von der Profiltiefe wird in der Berechnung noch nicht berücksichtigt. Außerdem wird das Modell in Zukunft um einen hydrodynamischen Teil erweitert, der es erlaubt, das Kontaktverhalten auch bei größeren Wasserfilmdicken zu beschreiben.

Die Vorgabe der zu untersuchenden Parametervariationen, bzw. der Fahrbahntexturen erfolgt über eine in MATLAB[®] programmierte Benutzeroberfläche. Dazu ist die Angabe folgender Einflussgrößen erforderlich:

- Reifen:
- Reifenbreite
 - vertikale Steifigkeit
 - max. vertikale Verschiebung einzelner F-D-Elemente
 - vertikale Dämpfung
 - Anzahl der Profilrillen
 - Profiltiefe
 - Neg.-Pos.-Anteil
- Fahrzeug:
- Geschwindigkeit
 - Radlast
 - Latschlänge

Anschließend wird der Texturabschnitt, der näher untersucht werden soll, eingelesen und dargestellt, **Abbildung 99**.

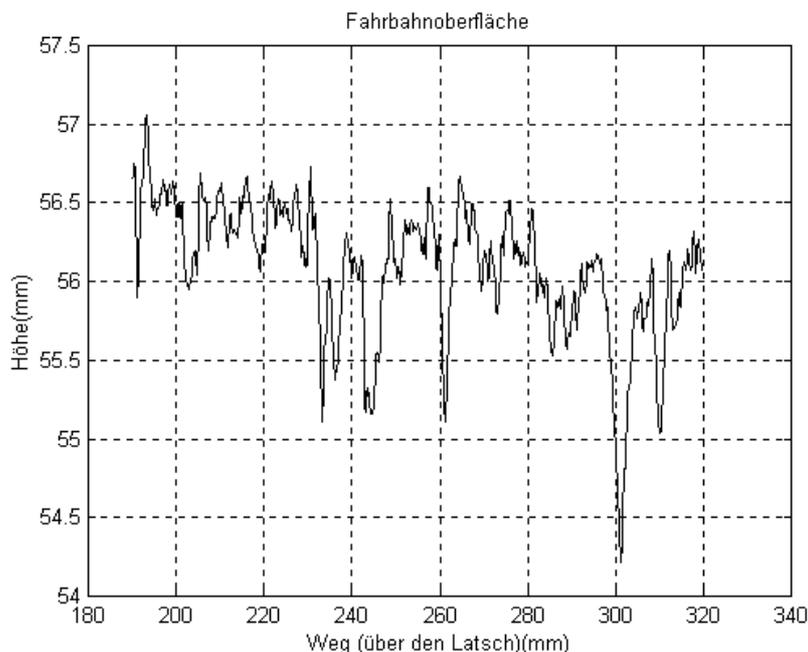


Abbildung 99: Texturschnitt im Reifenlatsch
Pavement texture with tyre contact

Die Länge des Abschnitts entspricht hierbei der vorher gewählten Latschlänge. Im dargestellten Beispiel liegt diese bei $l = 130\text{mm}$. Anschließend kann die Berechnung durchgeführt werden. Dabei wird der idealisierte Reifen so lange abgesenkt, bis die Summe der Kräfte, resultierend aus den einzelnen Feder-Dämpfer-Kräften, der gewählten Radlast entspricht. Da sowohl Feder- als auch Dämpferkräfte geschwindigkeitsabhängige Größen darstellen, mussten diese zuvor innerhalb der Benutzeroberfläche vorgegeben werden.

Das Ergebnis der Berechnung, **Abbildung 100**, zeigt den abgesenkten Reifen mit den lateral verlaufenden Profiltrillen. Die für das Beispiel gewählte Profiltiefe lag bei $TD = 4\text{mm}$. Die Flächen zwischen den Reifenprofilen, die oberhalb der Texturbegrenzungen liegen, stehen, über die Reifenbreite gesehen, als „Freies Volumen“ zur Wasseraufnahme zur Verfügung. Die Flächen unterhalb des Laufstreifens sind ein Maß für das Wasseraufnahmevermögen der Fahrbahn (ähnlich ETD mittels Sandpatchverfahren, Kapitel 2.2.1.4). Die Anzahl der Stützpunkte (entspricht der Anzahl der F-D-Elemente im Reifenlatsch) ist abhängig von der gewählten horizontalen Auflösung des Texturschnittes. Im dargestellten Beispiel lag diese bei $\Delta x = 0,18\text{mm}$, welches zu einer Elementanzahl von $n = 722$ führt. Des Weiteren ist zu erkennen, dass einzelne Texturspitzen bis zu $\Delta z = 0,5\text{mm}$ in den Reifen eindringen.

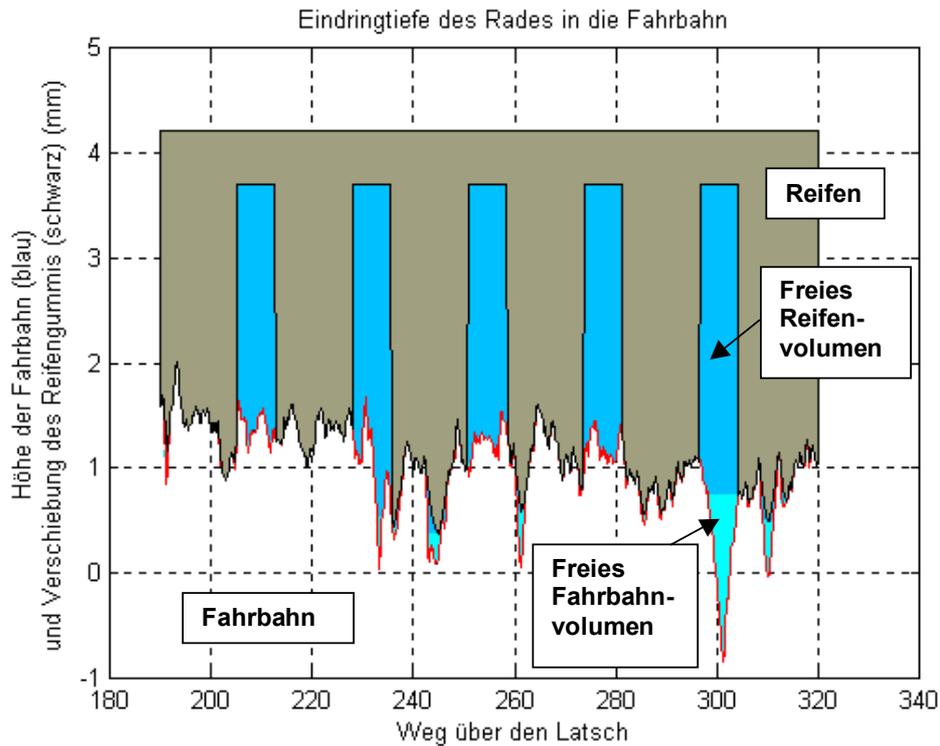


Abbildung 100: Darstellung des Eindringverhaltens
Presentation of intrusion behaviour

Als Ergebnis liefert das Modell folgende Aussagen:

1. Drainagelänge (entspricht der mittleren Entfernung, über die ein Zwischenmedium transportiert werden muss, um aus dem Kontaktbereich entfernt zu werden)
2. Mittlere Breite der Profilrillen
3. Profilfraganteil (Kontaktfläche bezogen auf die Latschfläche – Average Contact Area ACA)
4. Mittlere Kontakttiefe (**Mean Contact Depth MCD**)
5. Drainagevermögen der Fahrbahn (in Abhängigkeit von dem Eindringverhalten)
6. Freies Volumen (zur Wasseraufnahme im Reifen)

Von diesen Ergebnissen sollen im Folgenden vor allem die mittlere Kontakttiefe und die Kontaktfläche näher betrachtet werden.

5.2.2 Berechnungsergebnisse

Da das Kontakttiefemodell in der jetzigen Form hauptsächlich Phänomene beschreiben kann, die eine Anregung der Hysteresekomponente in vertikaler Richtung bewirken, erhält die mittlere Kontakttiefe eine besondere Bedeutung. Diese ist zum einen ein Maß für die Verformungsarbeit, die im Laufstreifen geleistet wird, zum anderen enthält sie eine Aussage über Verzahnungseffekte im makroskopischen Bereich.

Es soll im Folgenden geklärt werden, ob diese theoretischen Überlegungen sich anhand von Messungen belegen lassen und ob sich Korrelationen von Kontakttiefe/-fläche und Reibwert finden.

Da bei feuchter und nasser Fahrbahn die Adhäsionskomponente der Reifenreibung zu einem großen Teil unterbunden wird, vgl. **Kapitel 2.1.1, 2.1.3** und **4.2**, gewinnt die Hysteresekomponente stark an Bedeutung. Da das Modell hydrodynamische Effekte im Reifenlatsch, wie sie bei großen Wasserfilmdicken auftreten, nur unzureichend beschreiben kann, bietet es sich an, Reibwertmessungen auf feuchter Fahrbahn zur Korrelationsbestimmung heranzuziehen. Dazu werden zwei ebene Fahrbahnen mit sehr homogener Oberflächenstruktur (Taxiway/grob und Taxiway/fein) an jeweils 17 verschiedenen Abschnitten mittels Lasertriangulation vermessen, Texturschnitte erstellt und die MCD in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit ermittelt. Die Standardabweichungen der MCD für die beiden Oberflächen liegen bei $\sigma_{\max} = 0,067\text{mm}$ (Taxiway/grob) und $\sigma_{\max} = 0,043\text{mm}$ (Taxiway/fein). Auf beiden Fahrbahnen werden anschließend Reibwertmessungen mit einem Versuchsreifen der Dimension 195/65 R15 bei definiert angenäster Oberfläche durchgeführt. Die Geschwindigkeit wird von $v = 30$ bis 80km/h variiert. Um die Verläufe der MCD und des Maximalreibwertes in Längs-richtung besser darstellen zu können, werden die einzelnen Reibwerte so skaliert, dass es bei $v = 60\text{km/h}$ zu einem Schnittpunkt mit der MCD Kurve kommt, **Abbildung 101**.

Die Verläufe der MCD über der Geschwindigkeit zeigen, dass die Kontakttiefen bei der rauhen Fahrbahnoberfläche stets über den Werten der glatteren Textur liegen. Die Gradienten der MCD – Verläufe von glatter und rauher Oberfläche liegen auf dem selben Niveau.

Die Verläufe der Maximalreibwerte zeigen über der Geschwindigkeit ein differenzierteres Verhalten. So fallen die Reibwerte bei der rauhen Fahrbahn deutlich geringer ab als auf der glatteren Oberfläche. Dies bestätigt die Hypothesen der vorherigen Kapitel, in denen stets der große Einfluss der Hysterese bei nasser Fahrbahn im Bereich höherer Geschwindigkeiten beschrieben wurde. Die hier aufgezeigte Reibwertdifferenz ist, auf ein reales, bremsendes Fahrzeug bezogen, durchaus sicherheitsrelevant.

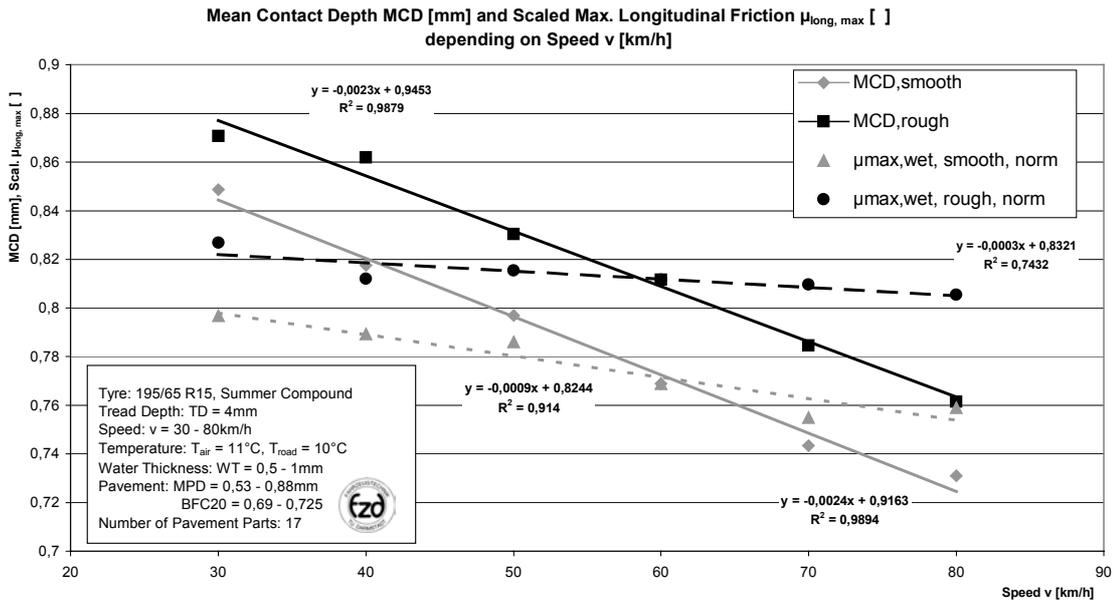


Abbildung 101 : MCD und Maximalreibwert aufgetragen über Geschwindigkeit
MCD and maximum friction depending on speed

Im Folgenden soll untersucht werden, ob gemeinsam auf beiden Fahrbahnoberflächen eine Korrelation von Maximalreibwert und mittlerer Kontakttiefe gefunden werden kann. Wie in **Abbildung 102** zu sehen, besteht ein Zusammenhang zwischen Maximalreibwert und mittlerer Kontakttiefe, wenngleich eine deutliche Streuung der Werte besteht.

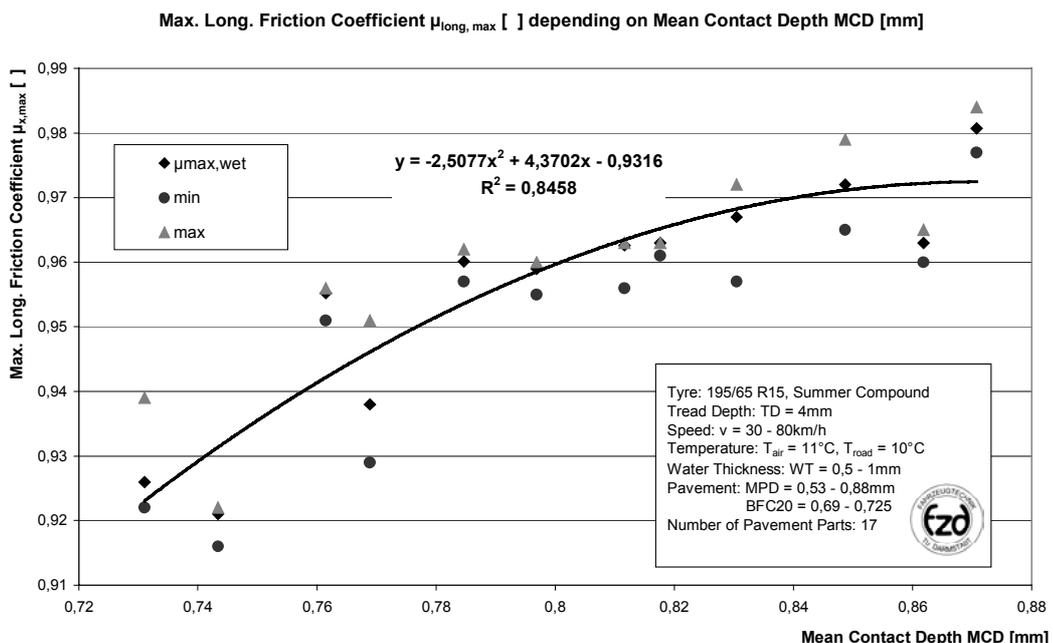


Abbildung 102: Korrelation von Maximalreibwert und mittlerer Kontakttiefe
Correlation of maximum friction and mean contact depth

Speziell die Steigung der Ausgleichskurve im Bereich einer MCD von 0,73 bis 0,8mm ist bemerkenswert. Bestätigt dies doch die These, dass zum einen Verzahnungseffekte nötig sind um die Hysteresekomponente zu aktivieren, zum anderen kann es dazu führen, dass durch das Verdrängen des Wasserfilms auch die Adhäsion zur Wirkung kommt. Vor diesem Hintergrund ist auch das Abflachen der Kurve im Bereich höherer Eindringtiefen (MCD-Werte) logisch, da dort bereits beide Reibmechanismen ausgeprägt sind und eine weitere Erhöhung der mittleren Eindringtiefe dazu führen würde, dass das Laufstreifengummi der Fahrbahntextur nicht folgen kann und dadurch eine Verringerung der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn die Folge ist. Des Weiteren entstünde eine sehr ungleichmäßige Flächenpressungsverteilung, die unter anderem zu Schubspannungen in Querrichtung in der Reifenaufstandsfläche führen kann. Hierdurch würden sich die in Längsrichtung übertragbaren Kräfte reduzieren.

Eine beliebige Erhöhung der Fahrbahnmakrotextur wird also bei einer feuchten Fahrbahn keinen Sicherheitszugewinn mit sich bringen. Jedoch relativiert sich diese Aussage bei höheren Regenintensitäten und Wasserfilmdicken, in denen das Drainagevermögen der Fahrbahn an Bedeutung gewinnt.

Auf trockener Fahrbahn zeigte sich ein deutlich geringerer Einfluss der Fahrbahnmakrotextur und der damit verbundenen Hysteresereibung. Wie in **Kapitel 2.1.1, 2.1.3** und **4.2** besprochen, ist hier vorallem die Adhäsionskomponente entscheidend. Dabei spielt vor allem die Größe der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn eine bedeutende Rolle. Deshalb wurde in einem weiteren Schritt der Maximalreibwert auf trockener Fahrbahn mit der mittleren Kontaktfläche ACA auf einer rauhen und einer glatten Fahrbahnoberfläche in Beziehung gesetzt, siehe **Abbildung 103**.

Sowohl bei der glatteren als auch bei der rauhen Fahrbahn ist ein deutlicher Anstieg des Maximalreibwertes (auf trockener Fahrbahn) mit der ACA zu erkennen. Dass der Reibwert der glatteren Fahrbahn in noch stärkerem Maße auf die Ausbildung der Adhäsionskomponente angewiesen ist, wird durch den steileren Gradienten des Maximalreibwerts über der Kontaktfläche im Bereich zwischen 51% und 53% deutlich. Bei dem eingesetzten Versuchsreifen mit einem Positiv/Negativ – Profilanteil von 70%, stellt diese Größe somit den maximalen ACA – Wert dar. Dies bedeutet, dass eine Steigerung der ACA von 51% auf 53%, auf den Maximalwert bezogen, eine Erhöhung um ca. 3% entspricht. Die Erhöhung des Maximalreibwerts von ebenfalls ca. 3% stellt somit einen erstaunlich hohen Wert dar. Eventuell wirken noch weitere Einflussfaktoren, die diesen reibwertsteigernden Effekt unterstützen. Des Weiteren scheinen beide Kurven bei einer Kontaktfläche von ca. 55% in einen Sättigungsbereich zu laufen. Dies kann, wenn sich das Ergebnis reifentypübergreifend bei Variation der

Randbedingungen in weiteren Messungen und Berechnungen bestätigt, einen wichtigen Beitrag zur Definition einer idealen Reifen-Fahrbahn-Paarung geben.

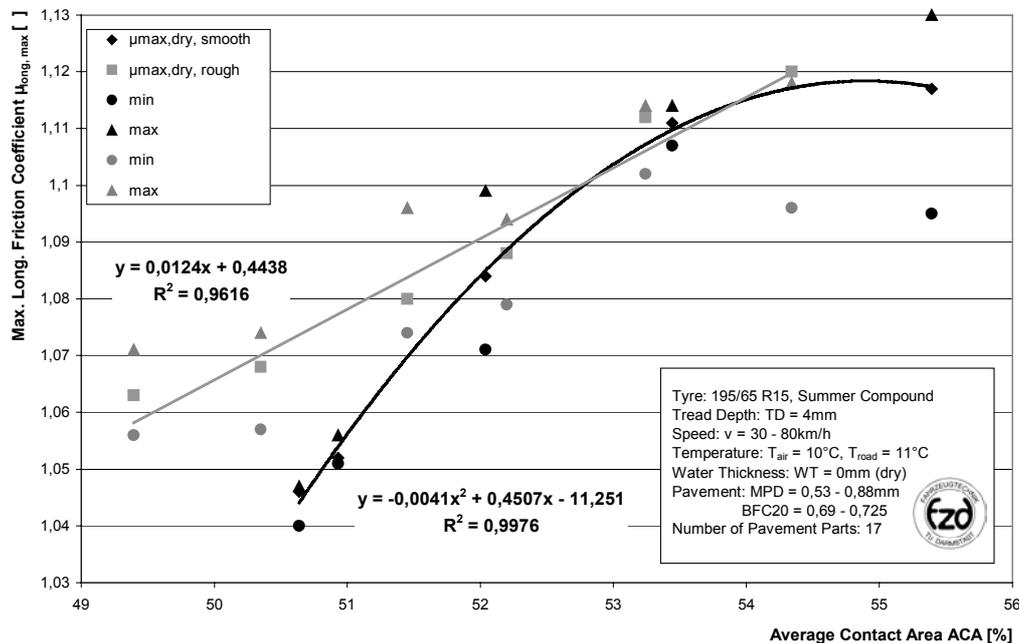


Abbildung 103: Korrelation von Maximalreibwert und mittlerer Kontaktfläche
Correlation of maximum friction and average contact area

Die Gegenüberstellung von Kontaktfläche und Maximalreibwert bei feuchter Fahrbahn und der Vergleich von mittlerer Eindringtiefe und Maximalreibwert auf trockener Fahrbahn ergaben keine Korrelationen. Dies bestätigt die Ergebnisse der Messungen, in denen die Verringerung der Adhäsionsreibung bei Nässe und die untergeordnete Bedeutung der Hysteresekomponente bei trockener Fahrbahn beschrieben wird.

5.3 Fazit

Das **semi-empirische Reibwertvorhersagemodell (FPM)** ist über einen weiten Bereich von Randbedingungen in der Lage, das Kraftschlusspotential in Längs- und Querrichtung zu berechnen. Als Standardreifen wurde eine P6000-Profilierung mit Sommermischung in der Größe 195/65 R15 verwendet. Da bei der Modellbildung die Haupteinflussparameter auf die Reifen – Fahrbahn – Reibung berücksichtigt wurden, sollte dieser Modellansatz auch auf andere Reifen (Variation der Dimension, Profilgestaltung, Laufflächenmischung,...) übertragbar sein. Jedoch wurde in dieser Arbeit der Beweis hierfür nicht erbracht. Um eine Übertragbarkeit zu ermöglichen, müssen orientierende Reibwertmessungen mit den geänderten Reifen durchgeführt und die Regressionskoeffizienten, d.h. die Gewichtungsfaktoren der Einzelterme, angepasst

Fazit

werden. So führt beispielsweise eine geänderte Profilgestaltung zu Unterschieden in der Wechselwirkung von Profiltiefe, Wasserfilmtiefe und Geschwindigkeit.

Des Weiteren wurde das FPM nicht auf winterliche Temperaturen ausgelegt. Die Messungen zur Schaffung der Datengrundlage fanden in einem Temperaturbereich von $T_{\text{Luft}} = 6$ bis 28°C statt. In diesem Bereich konnte kein signifikanter Temperatureinfluss ermittelt werden. Bei dem Vergleich der berechneten und gemessenen Reibwerte wird deutlich, dass das Modell durch eine noch größere Datenbasis gestützt werden sollte, wobei die Verwendung nur eines Messsystems anzustreben ist. Um die Unterschiede der Systeme zu quantifizieren, ist es nötig direkte Vergleichsmessungen auf der selben Fahrbahn bei identischen Randbedingungen durchzuführen.

Die Übertragbarkeit des Modells auf reale mitteleuropäische Fahrbahnen ist durch die Spreizung der MPD- ($0,56\text{mm} < \text{MPD} < 0,95\text{mm}$) und BFC_{20} -Werte ($0,56 < \text{BFC} < 0,86$) gegeben. Allerdings sollten noch Fahrbahnen, wie sie im United Kingdom vorkommen (z.B. Hot Rolled Asphalt mit $\text{MPD} > 1,5\text{mm}$) in das Modell aufgenommen werden.

Das **Kontaktiefemodell** berücksichtigt vertikale Verformungen des Reifenlatsches und erlaubt in seinem aktuellen Entwicklungsstand die Bestimmung der reibwertrelevanten Größen MCD (Mean Contact Depth) und ACA (Average Contact Area).

Die mittlere Kontakttiefe korreliert vielversprechend mit dem Maximalreibungswert in Längsrichtung auf einer feuchten Fahrbahn. Es zeigt sich, dass der Reibwert signifikant mit der Eindringtiefe ansteigt, wobei sich bei $\text{MCD} = 0,87\text{mm}$ eine Sättigung einstellt. Da keine Testfahrbahn mit gröberer Makrotextur zur Verfügung stand, kann das Verhalten oberhalb dieses Bereiches nicht mit Sicherheit vorhergesagt werden. Es darf aber angenommen werden, dass eine zu grobe Textur zu einer Verringerung der zwischen Reifen und Fahrbahn wirksamen Kontaktfläche und damit zu einer Reduzierung der übertragbaren Kräfte führt.

Auf trockener Fahrbahn zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Kontaktfläche und dem Maximalreibungswert. Dieser steigt bei grober und glatter Makrotextur mit der ACA an. Dieses Ergebnis bestätigt Literatursagen, in denen eine enge Verknüpfung von Kontaktfläche und Adhäsionsreibung beschrieben wird. Einschränkend muss jedoch erwähnt werden, dass mit diesem Modell keine Aussagen zu Vorgängen in Längs- und Querrichtung im Reifenlatsch getroffen werden können.

Für die Zukunft ist eine Erweiterung der Gültigkeit des Modells auf nasse Fahrbahnen geplant. Hierzu bietet sich eine Verknüpfung der in HYDROMOD verwendeten hydrodynamischen Gleichungen mit den Berechnungsalgorithmen des Kontaktiefemodells an.

HYDROMOD ist ein Berechnungsmodul, welches innerhalb des VERT-Projekts in Zusammenarbeit mit PORSCHE entwickelt und in das Reifensimulationsmodell TOMS [87] implementiert wurde.

Damit wird es möglich sein, die geschwindigkeitsabhängige Veränderung der MCD und ACA unter verstärkter Berücksichtigung der Profilierung bei größeren Wasserfilmdicken zu bestimmen.

6 Aufbau eines Reibwertvorhersage- systems im Fahrzeug

Basierend auf den durchgeführten Messungen und unter Verwendung des in **Kapitel 5.1** vorgestellten Reibwertvorhersagemodells werden im folgenden Überlegungen zum Aufbau eines Reibwertvorhersagesystems dargelegt.

6.1 Zielsetzung

Um die Fahrsicherheit gerade bei wechselnden Fahrbahnzuständen zu erhöhen, gilt es, ein System zu entwickeln, das den Reibwert nicht nur am Ort des Fahrzeugs ermitteln, sondern ihn auch im Voraus prognostizieren kann. Damit soll es dem Fahrer oder einem Assistenzsystem ermöglicht werden, Handlungen einzuleiten, bevor eine kritische Situation entsteht [76]. Mögliche Einsatzbereiche liegen in der kraftschlussangepassten Wahl des Folgeabstandes bei Kolonnenfahrt oder in der richtigen Wahl der Kurveneingangsgeschwindigkeit, siehe **Abbildung 104**.

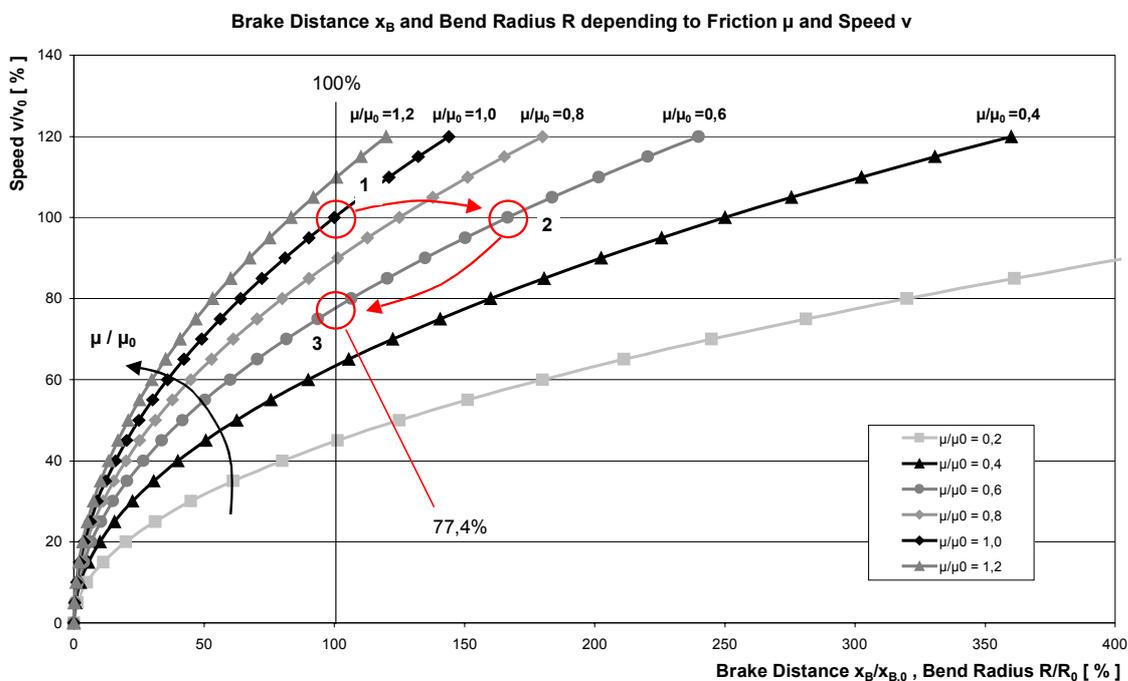


Abbildung 104: Auswirkungen einer Reibwertveränderung auf Kurvenradius und Bremsweg
Influence of friction variation on bend radius and braking distance

Fährt man beispielsweise mit einer bezogenen Geschwindigkeit von $v/v_0 = 100\%$ auf einer Fahrbahn, deren Reibwertpotential sich von 1,0 (Punkt 1) auf 0,6 Reibwerteinheiten reduziert (Punkt 2), so würde dies eine Erhöhung des bezogenen Bremswegs $x_B/x_{B,0}$ auf über 160% bewirken. Um jedoch den Bremsweg konstant zu halten, müsste die bezogene Geschwindigkeit auf unter 77% verringert werden (Punkt 3). Derselbe Zusammenhang ist für das Durchfahren einer Kurve gegeben. Hier interessiert zunächst weniger der Bremsweg, als vielmehr der zur Verfügung stehende Kurvenradius. Dieser ist i. A. vorgegeben und kann nur in Grenzen durch den Fahrer beeinflusst werden.

Der erste geschilderte Einsatzbereich eines solchen Systems bietet sich in Kombination mit einem ACC/Distronic-System an. Dort wird vom Fahrer ein Wunschabstand gewählt. Dieser Abstand ließe sich mit Hilfe eines Reibwerterkennungssystems selbstständig an die Kraftschlussverhältnisse anpassen.

Der zweite Einsatzbereich befasst sich mit der Thematik „Automatische Kurvenbremsung“. Um dies zu realisieren, müssen u. a. Daten über Kurvenradien und Fahrbahnverhältnisse vorliegen. Wie eine solche Reibwerterkennung aufgebaut sein kann, wird im Folgenden beschrieben.

Für beide Anwendungsbereiche existieren allerdings auch Einschränkungen durch eine vorgegebene Maximalverzögerung des ACC oder Probleme der Fahrerakzeptanz. Diese Punkte sollen zu einem späteren Zeitpunkt zumindest ansatzweise ebenfalls diskutiert werden.

6.2 Systemaufbau

Um ein Reibwerterkennungssystem aufzubauen, müssen zunächst die Einsatzbereiche und Solleigenschaften definiert werden. Idealerweise sollte ein zu entwickelndes System auf jeder Fahrbahn (unabhängig von Streckenführung, Material, Textur, usw.), in allen Ländern, bei sämtlichen klimatischen Bedingungen, bei sämtlichen Geschwindigkeiten, völlig autark und sowohl am Fahrzeug selbst als auch ca. 500m im Voraus funktionieren. Dies ist zum jetzigen Zeitpunkt jedoch noch utopisch, da weder eine geeignete Sensorik, noch ausreichende Kenntnisse über die Wechselwirkungen der einzelnen Einflussfaktoren zur Verfügung stehen. So ändert beispielsweise Schnee seine reibwertrelevanten Eigenschaften mit seinem Feuchtigkeitsgehalt, der Temperatur, dem Untergrund, der Dichte und vielen weiteren Einflussgrößen.

Das System, das im Folgenden näher beschrieben wird, ist bezüglich seines Einsatzbereichs abhängig von dem Validierungsbereich des Reibwertvorhersagemodells, siehe **Kapitel 5**:

Systemaufbau

- Fahrzeug / Reifen:
- Geschwindigkeit ($30 \text{ km/h} < v < 90 \text{ km/h}$)
 - Radlast ($2000 \text{ N} < F_z < 6000 \text{ N}$)
 - Profiltiefe ($2 \text{ mm} < TD < 7 \text{ mm}$)
- Zwischenmedium:
- Wasserfilmdicke ($0 < WT < 8 \text{ mm}$)
- Fahrbahn:
- Mikrotextur ($0,58 < BFC_{20} < 0,86$)
 - Makrotextur ($0,56 \text{ mm} < MPD < 0,95 \text{ mm}$)

Innerhalb dieser Grenzen soll das Reibwertvorhersagesystem eine Prognose des aktuellen und des zukünftigen Kraftschlusspotentials liefern. Die „Vorausschau“ muss weit genug vor dem Fahrzeug stattfinden, um eine verwertbare Information / Warnung zu geben (unter Berücksichtigung der Reaktionszeit des Assistenzsystems, bzw. des Fahrers). Jedoch darf sie auch nicht zu weit vor dem aktuellen Standort des Fahrzeugs sein, da ansonsten der Fahrbahnzustand (z.B. Fahrbahnnässe) oder die aktuelle Geschwindigkeit nur schlecht übertragbar sind. Um das Kraftschlusspotential zu bestimmen, ist es nötig, dass das Berechnungsmodell die nötigen Informationen bzgl. der Einflussfaktoren zur Verfügung gestellt bekommt. Damit ist es möglich, die Maximalkräfte in Längs- und Querrichtung zu bestimmen. Durch Erfassung weiterer fahrdynamischer Größen ist eine Berechnung der aktuellen und durch Kenntnis des Streckenverlaufs und weiterer Größen die Berechnung der zukünftigen Kraftschlussausnutzung möglich [77]. Diese Auskunft kann zur Fahrerwarnung, zur „Fütterung“ eines Assistenzsystems oder zur Information weiterer Verkehrsteilnehmer genutzt werden, siehe **Abbildung 105**.

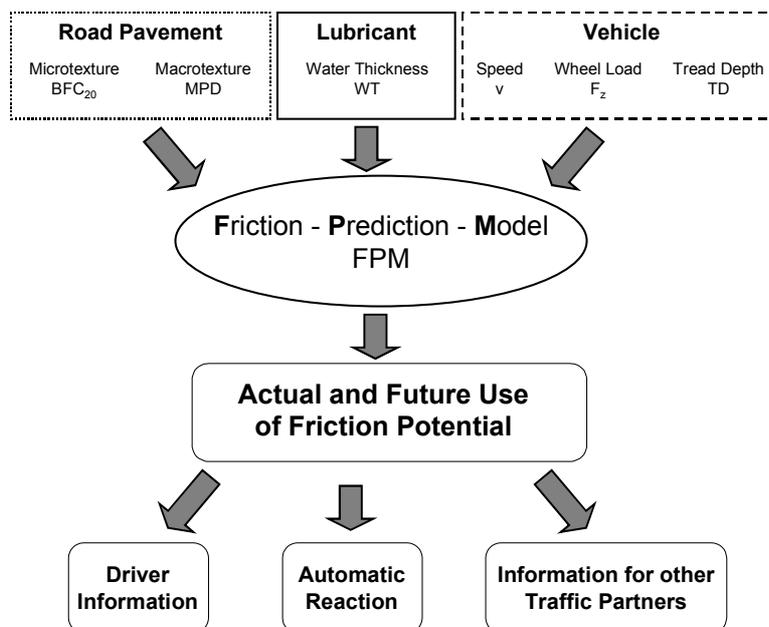


Abbildung 105: Informationsfluss des Reibwertvorhersagesystems
Information flow of friction prediction system

Nachdem die Einsatzgrenzen definiert und der Informationsfluss innerhalb des Systems vorgegeben ist, besteht die weitere Aufgabe darin, die nötigen Informationen bzgl. der Einflussparameter zu sammeln und dem Modell zur Verfügung zu stellen. Hierbei lassen sich grundsätzlich drei Arten der Informationsbeschaffung unterteilen:

1. Sämtliche Einflussgrößen werden am Fahrzeug erfasst.
2. Die Einflussgrößen werden sowohl am Fahrzeug als auch extern erfasst.
3. Sämtliche Einflussgrößen werden extern zur Verfügung gestellt.

Um auf sämtlichen Fahrbahnen eine Information über den Fahrbahnzustand und die Fahrbahntextur zu erhalten, ist ein autark operierendes System Grundvoraussetzung. Dies bedeutet, dass die nötige Sensorik zur Bestimmung von Geschwindigkeit, Radlast, Profiltiefe, Wasserfilmdicke, Mikro- und Makrotextur im Fahrzeug integriert werden muss. Das ist bei Sensoren zur Bestimmung der Geschwindigkeit und der Wasserfilmdicke durchaus möglich. Deutlich größer gestaltet sich der Aufwand bei der Erfassung von Radlast, Profiltiefe und Makrotextur. Eine Online - Erfassung der Mikrotextur ist bislang nicht ohne weiteres möglich. Es wurden zwar bereits Systeme angedacht, die ein fünftes, gebremstes Rad im Fahrzeug nutzen bzw. einzelne Räder gezielt abbremsen oder gegensinnig einschlagen, um daraus eine Information über das Kraftschlusspotential gewinnen zu können, doch dies stellt in Hinblick auf ein späteres Anwendungspotential sicherlich keine praktikable Lösung dar.

Auch die Erfassung der Fahrbahnmakrotextur auf optischem Weg ist bei nasser Fahrbahn nur bedingt möglich, siehe **Kapitel 3.2.1.2**. Eventuell stellt die Luft- und / oder Körperschallanalyse, siehe **Kapitel 2.2.1**, eine Lösungsmöglichkeit dar, indem je nach Frequenzbereich eine Information über den Fahrbahnzustand bzw. die Fahrbahntextur ermittelt wird. Die Signalauswertung hierfür ist bislang noch sehr aufwendig und durch die vielen verschiedenen Randbedingungen stöempfindlich.

In jedem Fall ist jedoch eine Voraussage des Kraftschlusspotentials nur bedingt möglich, da stets von dem aktuellen Zustand auf den zukünftigen geschlossen werden muss, ohne explizite Kenntnisse über den weiteren Streckenverlauf zu haben. Dies könnte beispielsweise dazu führen, dass ein Wechsel des Fahrbahnbelags in einer Kurve trotz konstanter Wasserfilmtiefe zu einem deutlichen Abfall des zur Verfügung stehenden Querreibwerts führt. Daraus würde bei zu hoch gewählter Kurvengängigkeit ein Defizit beim Kraftschlussangebot resultieren, siehe **Abbildung 106**. Aus diesem Grund und wegen der oben angesprochenen Schwierigkeiten bzgl. der Sensorik wird von einer Verfolgung dieses Ansatzes abgesehen.

Eine weitere Möglichkeit stellt die alleinige Nutzung von externen Daten als Informationsquelle für das FPM dar. Dies ist zwar bezüglich der Fahrzeug und Reifen

Systemaufbau

betreffenden Größen nicht möglich, wäre aber bei Daten die Fahrbahn betreffend durchaus sinnvoll. So könnten beispielsweise Informationen über die Fahrbahntextur je nach Fahrzeugstandort von verschiedenen lokalen Sendestationen zur Verfügung gestellt werden.

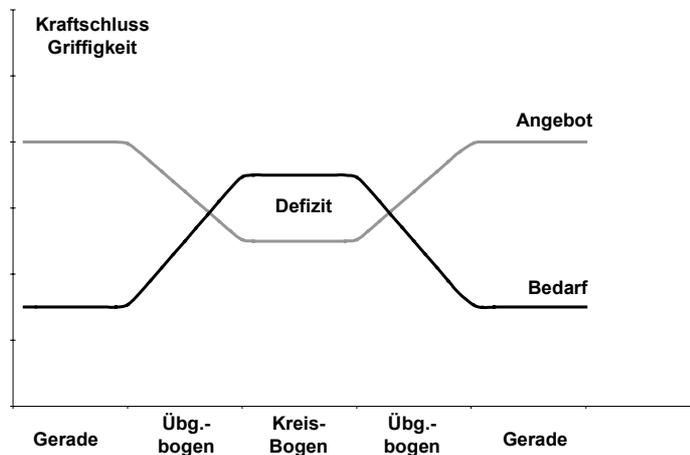


Abbildung 106: Auswirkung eines Texturwechsels auf das Kraftschlusspotential [70]
Influence of changing texture on friction potential

Die Datenbank, die hierzu nötig ist, könnte zum einen durch die Messungen der Bundesanstalt für Straßenwesen, die im Zweijahresrhythmus auf sämtlichen BAB und Bundesstraßen durchgeführt werden, gespeist werden. Zum anderen könnten private Unternehmen die Messungen auf Landstraßen und im Städtebereich durchführen und dem System zur Information anbieten. Hierbei kommt der Aktualität der Daten eine große Bedeutung zu. Selbstverständlich können lokale, plötzliche Verschmutzungen nicht erfasst und dem System zur Verfügung gestellt werden. Jedoch gibt es genügend Bereiche, in denen eine permanente Verschmutzung besteht, z.B. Ausfahrten von Dauerbaustellen, Steinbrüchen oder Betonwerken. Diese Informationen gilt es intelligent zu nutzen.

Voraussetzung hierfür ist das Senden einer Positionsangabe vom Fahrzeug an den Datensender zwecks Abfrage der aktuellen Informationen. Mögliche Datenschutzprobleme müssen selbstverständlich im Vorfeld geklärt werden.

Auch Informationen bezüglich der Wasserfilmdicke müssten bei einem rein auf externen Daten basierenden System zur Verfügung gestellt werden. Dies gestaltet sich deutlich schwieriger, da sich im Gegensatz zur Fahrbahntextur die Wasserfilmtiefe deutlich häufiger ändert. Eine am Straßenrand positionierte Sensorik, die z.B. die Regenintensität erfasst und durch Kenntnis der Fahrbahnoberfläche und der Fahrbahnneigung die Wasserfilmdicke berechnet, siehe **Kapitel 6.3**, ist auf Autobahnen

durchaus denkbar. Jedoch stößt dieses Vorgehen spätestens auf Bundes- und Landstraßen an seine Grenzen.

Aus diesem Grund erscheint ein Vorgehen sinnvoll, das es erlaubt, beide Lösungsansätze miteinander zu verbinden. Dabei gilt es, sowohl externe Daten zur Vorhersage als auch integrierte Sensoren zur direkten Reibwertbestimmung zu nutzen [79]. Ein mögliches Vorgehen bei dem Aufbau eines solchen Systems wird im Folgenden beschrieben:

Um eine Information über die Fahrzeuggeschwindigkeit zu erhalten, bietet sich die kombinierte Nutzung von Signalen an, wie sie auch bei Navigationssystemen realisiert ist. Dieses verwendet zum einen ein GPS (Global Position System), welches je nach Ausführung alle 2s die aktuelle Geschwindigkeit angibt. Des Weiteren ergibt sich durch die Nutzung der ABS-Raddrehzahlsensoren die Möglichkeit zur Geschwindigkeitsbestimmung. Diese entspricht zwar nicht exakt der Geschwindigkeit über Grund (bedingt durch den Reifenschlupf in Längs- und Querrichtung), jedoch ist die erreichbare Genauigkeit für diesen Zweck ausreichend und liefert auch Informationen, wenn aufgrund von Abschattung kein GPS-Signal zur Verfügung steht. Zusammen mit einem Gyrometer, wie er in jedem ESP-System vorhanden ist, und durch Nutzung einer Magnetfeldsonde ergibt sich des Weiteren die Möglichkeit, eine Standortbestimmung auf ca. 5m genau durchzuführen (Genauigkeit bei alleiniger Verwendung von GPS: ca. 25m). Diese Genauigkeit und vor allem deren Verfügbarkeit wird sich durch das europäische Satellitensystem GALILEO ab 2008 noch deutlich erhöhen. Bereits verfügbar wäre eine Standortermittlung auf weniger als 1m genau mittels DGPS (Differentielles GPS). Dieses nutzt zusätzlich zu den Satellitensignalen Funksignale von Sendestationen, deren Standort exakt bekannt ist. Dies ermöglicht z.B. die Erkennung der aktuellen Fahrspur auf mehrspurigen Autobahnen. Im Rahmen der Vernetzung von Fahrzeug- und Mobilfunksystemen ergibt sich auch die grundsätzliche Möglichkeit der Nutzung von UMTS-Daten zur Standortbestimmung mittels Handy. Dieses Verfahren ermöglicht jedoch nur Genauigkeiten bis 100m, und eine flächendeckende Verfügbarkeit ist durch den hohen finanziellen Aufwand nicht zu erwarten [62].

Durch die Verwendung eines Navigationssystems wird auch eine Hauptvoraussetzung zur Reibwertprognose erfüllt, nämlich dass dem System bekannt ist, welche Fahrbahn als nächste befahren wird [78]. Diese Forderung ist auf Autobahnabschnitten ohne Abfahrt noch trivial. Spätestens jedoch, wenn das FPS die Entscheidung treffen muss, ob das Fahrer-Fahrzeug-System die nächste Abfahrt nimmt oder weiter auf der Strecke bleibt, wird diese zusätzliche Information benötigt.

Um nun dem Reibwertvorhersagemodell Kennwerte bezüglich der Mikro- und Makrotextur zur Verfügung zu stellen bietet es sich an, die Datenbank des Navigationssystems zu nutzen. Eine ähnliche Idee wird mittlerweile durch das ADAS

Systemaufbau

(Advanced Driver Assistance System) verfolgt. Hierdurch sollen in wenigen Jahren Systeme wie z.B. adaptive Frontscheinwerfer (ALC – Adaptive Light Control [9]), die ein Hineinleuchten in die Kurve ermöglichen, mit genauen Informationen bezüglich der Streckenführung versorgt werden. Da diese schrittweise Erweiterung der mitgeführten Datenmenge zu einem erhöhten Bedarf an Speicherplatz führen wird, ist der Umstieg von CDROM auf DVD sicher [92]. Dies würde auch den nötigen Platz für Texturinformationen bieten.

In einem ersten Ansatz zum Aufbau und der Erprobung eines Reibwertvorhersage-Systems wurde am *fzd* eine Fahrernavigation programmiert. Diese beinhaltet den Verlauf einer öffentlichen MMI-Strecke (Man-Machine-Interaction) und einen Parcours auf der Teststrecke in Griesheim. Die MMI-Strecke ist ein 89km langer Doppelrundkurs von öffentlichen Fahrbahnen in der Nähe von Darmstadt, die einer repräsentativen Verteilung der Straßenarten in Deutschland entspricht und u.a. nach der Art und Anzahl der aufgetretenen Unfälle zusammengestellt wurde. Der Schwerpunkt der ausgewählten Unfallursachen lag bei zu hoher Geschwindigkeit, ungenügendem Abstand und falscher Fahrbahnbenutzung. In der Fahrerunterstützung zur Vermeidung dieser Unfallarten liegt ein mögliches Potential der Reibwernerkenntnis. Die MMI-Strecke wurde bezüglich ihrer Fahrbahnoberfläche, ihrem Verlauf (z.B. Kurvenradien) und ihrer Gestaltung (z.B. Längs- und Querneigung) vermessen und die Daten innerhalb einer Notebook-Datenbank abgelegt. Die Zielführung erfolgt sowohl optisch über Richtungsanzeiger, siehe **Abbildung 107**, und dem Zoomen von Kreuzungsbereichen als auch akustisch.

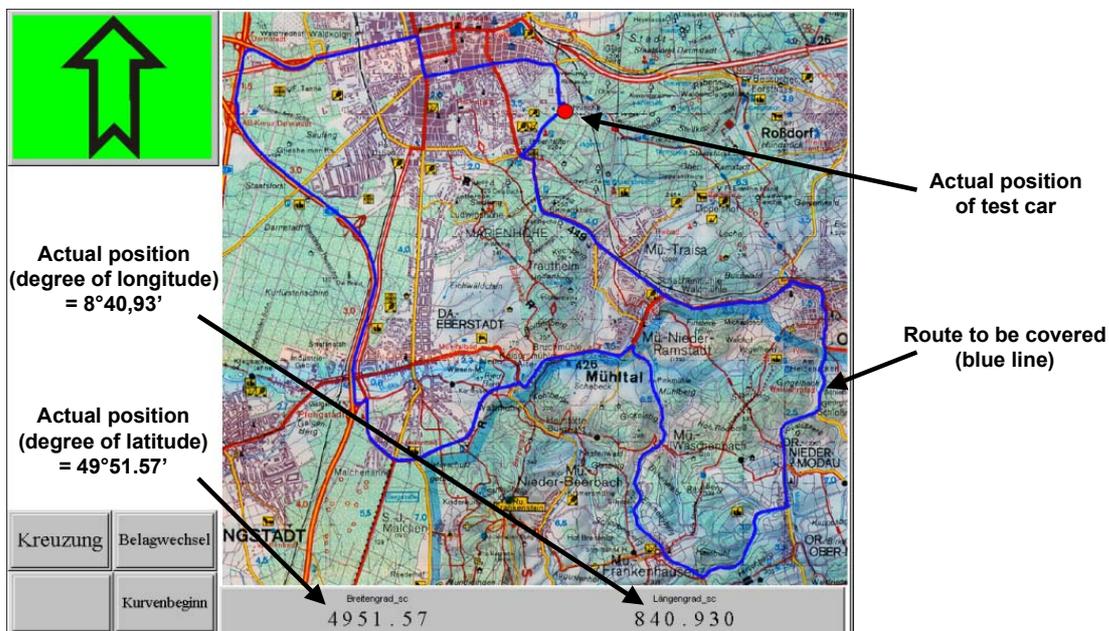


Abbildung 107: Navigationsoberfläche
Navigation window

Bedingt durch diese Zielführung „weiß“ das System, welcher Streckenabschnitt als nächstes durchfahren wird und kann somit die betreffenden Fahrbahndaten zur Verfügung stellen.

Um weniger Fahrbahnwechsel berücksichtigen zu müssen und damit die Funktionsweise des Gesamtsystems differenzierter betrachten zu können, fanden die ersten Versuche jedoch auf dem Testgelände in Griesheim und der Versuchsstrecke in Michelstadt statt. Dies hatte den Vorteil, dass gezielt Fahrbahnbereiche bewässert werden konnten, um die verwendete Sensorik zu überprüfen ohne den öffentlichen Verkehr zu behindern. Des Weiteren sind die Fahrbahntexturen der Strecken sehr genau vermessen und erlauben dadurch eine gute Beurteilung der Systemfunktion. Das Gesamtsystem, welches in einem AUDI V8 untergebracht wurde, ist folgendermaßen aufgebaut, siehe **Abbildung 108**.

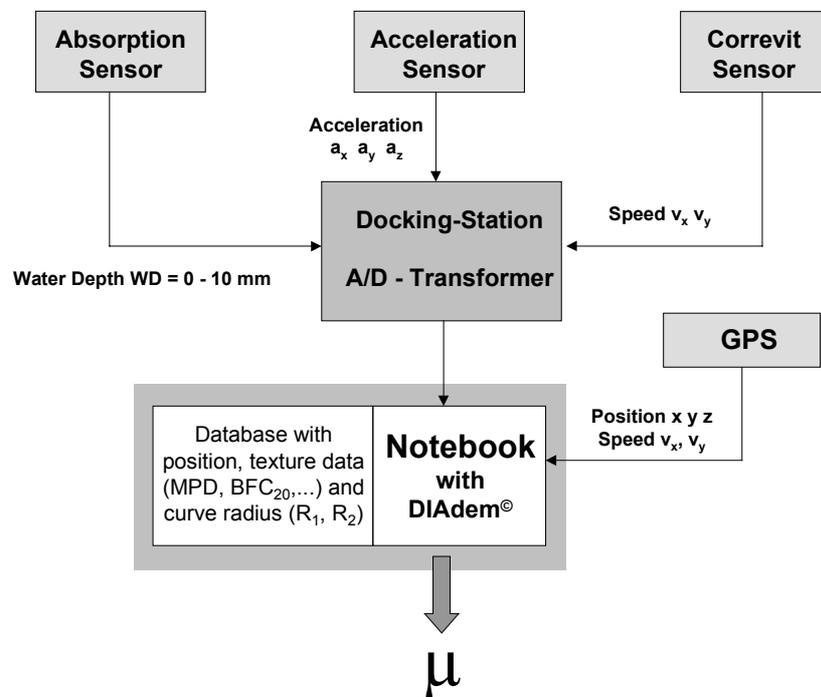


Abbildung 108: System Architektur [79]
System architecture

Im Gegensatz zu einer Lösung, wie sie für spätere Fahrzeuge angedacht ist, werden in dieser ersten Stufe nicht die Raddrehzahlsignale zur Bestimmung der Geschwindigkeit genutzt. Stattdessen werden das Geschwindigkeitssignal des GPS und eines Correvitsensors verwendet. Als GPS kommt hierbei ein Garmin III mit 12 Kanal Empfänger und RS 232 Schnittstelle zum Einsatz. Dieses erlaubt über ein NMEA 0183 Protokoll die Kommunikation mit dem Messnotebook. Dieses Protokoll hat sich als Standard bei GPS-Systemen durchgesetzt und erlaubt eine weitgehende Hardwareunabhängigkeit.

Systemaufbau

Eine weitere vom FPM benötigte Größe ist die dynamische Radlast. Diese wird nicht direkt gemessen. Stattdessen müssen die statischen Radlasten vor Versuchsbeginn eingegeben werden. Über schwerpunktnah eingebaute Beschleunigungssensoren können nun die stationären Radlasten (eingeschwungener Zustand, ohne Dämpferkräfte) in Abhängigkeit von Längs- und Querschleunigung berechnet werden. Da eine Variation des Beladungszustands bei einem Pkw keine gravierende Veränderung der statischen Radlasten bewirkt, könnte bei einem späteren System bereits eine Unterscheidung in Halb- oder Vollbeladen als Radlastvorgabe ausreichen. Ein ähnliches Vorgehen wird standardmäßig auch zum Anpassen des Reifenluftdrucks praktiziert.

Auch die Reifenprofiltiefe wird nicht im Fahrbetrieb aktuell ermittelt. Zwar sind verschiedene Möglichkeiten zur online-Bestimmung denkbar, siehe **Kapitel 6.3**, doch wurde aus Gründen der schnellen Realisierbarkeit die Profiltiefe manuell vor Fahrtbeginn gemessen.

Zur Bestimmung der Wasserfilmtiefe wurden versuchsweise sowohl der Absorptionssensor als auch der Fahrbahnzustandserkennungssensor eingesetzt, siehe **Kapitel 3.3**. Durch seine sehr kompakte Bauweise ergab sich beim FbZS die Möglichkeit der Unterbringung im Motorraum. Der Sensor wurde hierbei so platziert, dass er die Fahrbahnoberfläche vor dem rechten Vorderrad abtastet. Um den Einfluss von Sonnenlicht auf das Sensorsignal zu unterbinden, wurde eine Abschirmung an der Fahrzeugvorderseite installiert, siehe **Abbildung 109**.

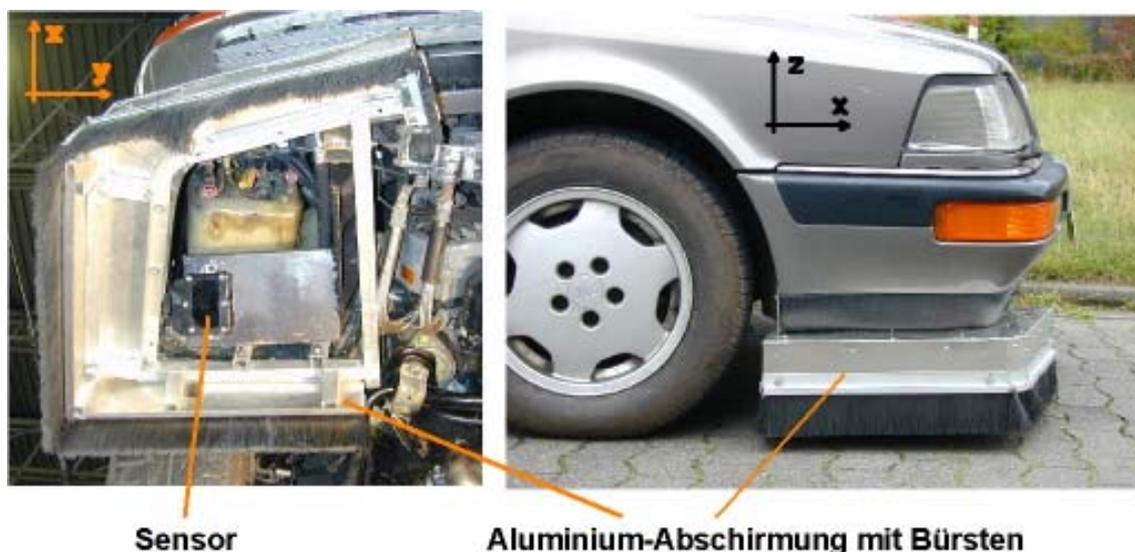


Abbildung 109: Sensorplatzierung und Abschirmung
Sensor position and cover

Diese basiert auf demselben Prinzip wie an dem Messanhänger PETRA und erlaubt durch die Verwendung von langen steifen Bürsten auch starke Nickbewegungen, ohne dass es zu einem Aufsetzen der metallischen Teile kommt. Einschränkend muss jedoch

erwähnt werden, dass bei einer Vollbremsung die Bürsten u. U. die Fahrbahn berühren und den Wasserfilm verdrängen. Dies führt dazu, dass die vom Sensor erfasste Wasserfilmtiefe geringer ist als die vor der Abschirmung.

Die Texturkennwerte (BFC_{20} und MPD) werden, wie oben bereits beschrieben, dem Reibwertvorhersagemodell über eine Datenbank zur Verfügung gestellt. Somit sind sämtliche Einflussgrößen zur Reibwertprognose bekannt.

Durch den Vergleich des berechneten Reibwertpotentials mit den aktuellen Beschleunigungen unter Berücksichtigung der aktuellen Geschwindigkeit (zur Berechnung der stationären Antriebskräfte) kann die aktuelle Kraftschlussausnutzung für Vorder- und Hinterachse sowie global für das Gesamtfahrzeug bestimmt werden.

Um die zukünftige Kraftschlussausnutzung zu erhalten, werden die aktuelle Geschwindigkeit, Profiltiefe und Wasserfilmdicke als konstant angenommen. Durch Kenntnis des Streckenverlaufs (Kurvenradius) kann die zu erwartende Querbewegung ermittelt werden. Diese wiederum erlaubt die Berechnung der entsprechenden stationären Radlast. Damit besitzt das FPM sämtliche nötigen Einflussparameter zur Berechnung des zu erwartenden Kraftschlusspotentials. Durch Vergleich desselben mit der berechneten zukünftigen Querbewegung, unter Berücksichtigung der nötigen Antriebskräfte, ergibt sich die zu erwartende Kraftschlussausnutzung, siehe **Abbildung 110**.

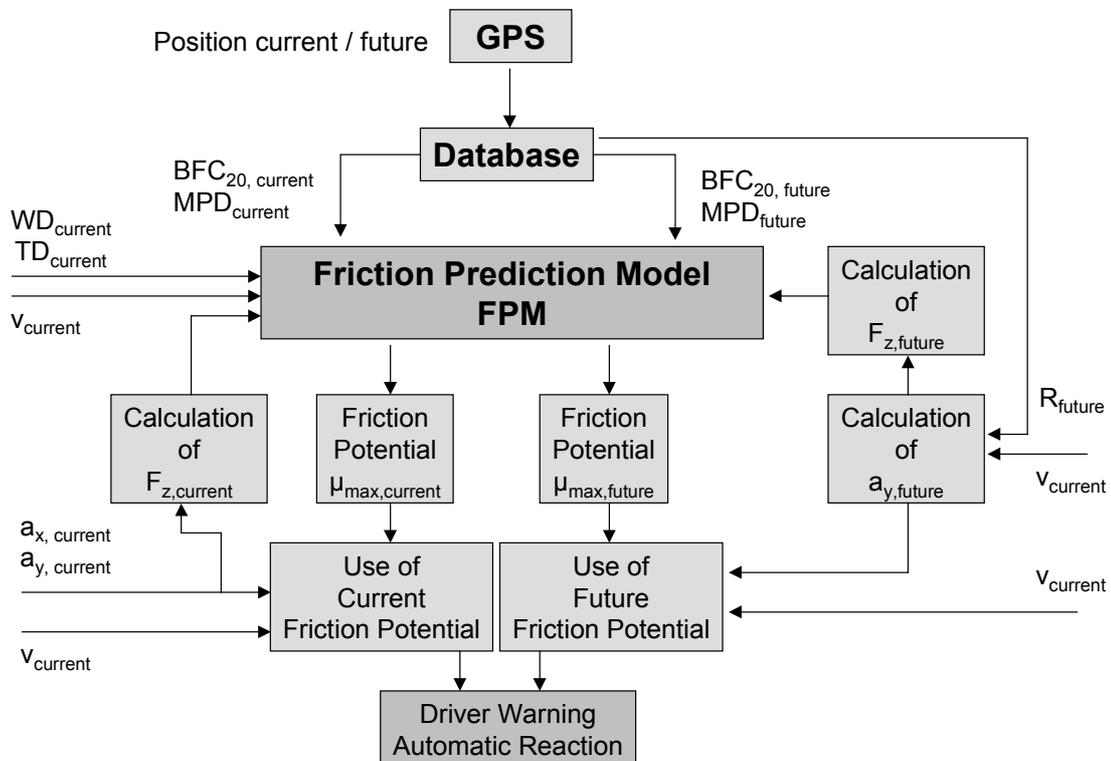


Abbildung 110: Berechnungsablauf
Calculation flow

Systemaufbau

Mit diesem System wurden erste orientierende Versuche auf den Teststrecken durchgeführt, in denen sich das Gesamtsystem als zuverlässig erwiesen hat. In **Abbildung 111** ist exemplarisch für die durchgeführten Messungen die Durchfahrt eines Kreisrings bei trockener Fahrbahn dargestellt.

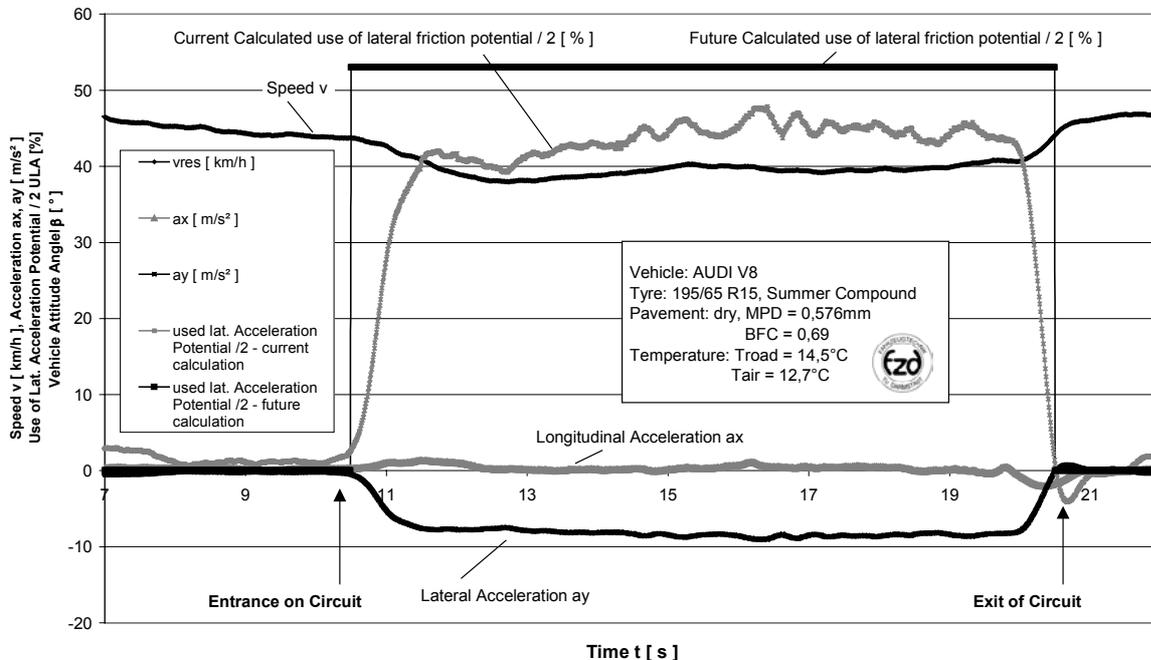


Abbildung 111: Erprobung des FPS
Testing of FPS

Die Berechnung der zukünftigen Kraftschlussausnutzung bedient sich der aktuellen Geschwindigkeit vor dem Einfahren in den Kreis, in diesem Fall 44km/h. Unter Berücksichtigung des in der Datenbank gespeicherten Kurvenradius von 15m und durch Berechnung des Kraftschlusspotentials beim Durchfahren des Kreisrings ergibt sich eine berechnete Ausnutzung von 106%. Dies bewirkt eine Fahrerwarnung, obwohl die aktuelle Kraftschlussausnutzung (nur durch die Antriebskräfte) bei ca. 5% liegt. In diesem Fall wurde die Warnung bewusst ignoriert und stattdessen versucht, die Geschwindigkeit konstant zu halten. Beim Ein- und Durchfahren des Kreises fällt sie jedoch auf 38 bis 40km/h. Daher berechnet das Reibwertvorhersagesystem eine Ausnutzung in der Größenordnung von 79 bis 94%. Bei diesem Zustand befindet sich das Fahrzeug kurz vor der Kraftschlussgrenze und beginnt bereits über die Vorderräder nach außen zu schieben.

6.3 Grenzen des aktuellen und Gedanken zu zukünftigen Systemen

Das Reibwertvorhersagesystem in seiner jetzigen Ausbaustufe berücksichtigt zwar die **Profiltiefe** als wichtige Einflussgröße, jedoch ist bislang noch keine automatische Bestimmung dieser praktikabel. Es ist daher zu prüfen, ob Simulationsrechnungen bezüglich Reifenverschleiß, wie sie bei den verschiedenen Reifenherstellern entwickelt wurden, für den Einsatz in einem fahrenden Fahrzeug genutzt werden können. Dies bedeutet, dass durch Messung einiger Einflussgrößen, die maßgeblichen Einfluss auf die Höhe des Verschleißes haben, dieser weitestgehend bestimmt werden kann. Zusätzlich dazu müssen in definierten Intervallen die Berechnungsergebnisse manuell überprüft werden. Verschleißuntersuchungen wurden z.B. von [15] und [47] durchgeführt. Hierbei ergab sich ein starker Einfluss von Profilmischung, -gestaltung, Reifenluftdruck und Schlupfgeschwindigkeit. Zur Beschreibung der Einflüsse wurden bei [47] Gleichungen aufgestellt, welche Verschleißvorgänge beschreiben.

Basierend auf diesen Erkenntnissen müssten jedoch, um die Lebensdauer bzw. die aktuelle Profiltiefe zu bestimmen, noch die Betriebsbedingungen berücksichtigt werden. D. h. in Untersuchungen müssen, ähnlich wie bei dem Vorgehen zum Aufbau eines Reibwertvorhersagemodells, zunächst die Haupteinflussgrößen auf den Reifenverschleiß bestimmt werden. Anschließend gilt es, Korrelationen zwischen dem Verschleiß und den Parametern zu finden und Berechnungsvorschriften aufzustellen. Im Fahrzeug werden die Verschleißgleichungen in das FPM integriert, wobei die Einflussparameter gemessen werden müssen.

Das in **Kapitel 6.2** vorgestellte FPS basiert auf einer Datenbank mit möglichst lückenloser Dokumentation des Straßennetzes und der Fahrbahnoberflächen-Kennwerte. Da keine On-Board-Abtastung der Fahrbahn mittels geeigneter Sensorik erfolgt, können **Veränderungen der Fahrbahn**, wie sie sich z.B. durch einen **veränderten Streckenverlauf** infolge von Baustellen ergeben, nicht erfasst werden.

Eine Berücksichtigung dieser Änderungen könnte durch Aktualisierung der Datengrundlage durch externe Dienste (z. B. dem Bauunternehmer) erfolgen, was bei Tagesbaustellen und kurzen Intervallen jedoch kaum praktikabel ist. Eine weitere, deutlich wahrscheinlichere Möglichkeit zur Bereitstellung der nötigen Information liegt in der Nutzung von Mobil- oder Rundfunksystemen mittels RDS-TMC (**R**adio **D**ata **S**ystem – **T**raffic **M**essage **C**hannel) und DAB (**D**igital **A**udio **B**roadcast). Eine Einbindung weiterer Verkehrsteilnehmer liegt in dem Aufbau eines Car-to-Car Informationssystems (z.B. XFC_D Extended Floating Car Data [8]), welches durch Erfassung des geänderten Streckenverlaufs (innerhalb der Grenzen eines GPS-

Navigationssystemen) und der Effekte (z.B. Schlupf an den angetriebenen Rädern oder Gierwinkelgeschwindigkeiten beim Durchfahren der Baustelle) nachfolgenden Fahrzeugen wertvolle Daten zur Verfügung stellen kann. Da jedoch die Streckenveränderungen infolge von Baustellen stets mit einer Limitierung der erlaubten Höchstgeschwindigkeit einhergehen und dadurch die Kraftschlussgrenze, außer bei extrem widrigen Verhältnissen, nicht erreicht werden kann, ist die hier dargestellte Systemeinschränkung als weniger kritisch zu sehen.

Ein weiterer zu beachtender Punkt liegt in der **Veränderung der Fahrbahntextur über die Nutzungsdauer und die Jahreszeiten**. Hierbei treten mehrere, teilweise gegensätzliche Mechanismen auf: So kommt es infolge von feinen Fahrbahnverschmutzungen zu einer Polierwirkung, welche die Kornschärfe reduziert. Ein direkter Zusammenhang mit der Überrollungszahl ist jedoch nicht feststellbar [69], [84] und [110]. Jedoch zeigt sich der Poliervorgang stark ausgeprägt an Fahrbahnabschnitten, an denen die Reifen mit erhöhtem Schlupf bewegt werden. Dies kommt besonders häufig bei Brems- und Beschleunigungsstrecken an Kreuzungen und Ampeln, sowie bei Kurven mit engen Radien vor. Außerdem ist der Verschmutzungsgrad von Schnellstraßen und Autobahnen fahrtwindbedingt sehr gering.

Die Polierwirkung selbst hängt in starkem Maße von der Widerstandskraft des verwendeten Deckschichtmaterials ab [25], [29], [44], [101] und [110]. So ergeben sich speziell für Quarzporphyre, Diabas und Brechsand aus Basalt sehr gute Polierwiderstandswerte (Polished-Stone-Value PSV), welche auch über Jahre hin ihre Mikrotextur beibehalten [110] und [122]. Gemäß [27] wird für Straßen mit besonderer Beanspruchung ein Wert von $PSV \geq 50$ empfohlen.

Einen entscheidenden Beitrag zur Nachschärfung von Fahrbahnbelägen spielt die Witterung: Regen beispielsweise bewirkt einerseits eine Reinigung der Oberfläche, andererseits kommt es durch den Säureanteil zu einem partiellen Auf-, bzw. Anlösen von Kalkteilchen der Fahrbahndeckschicht, welches wiederum zu einem Verstumpfen der Oberfläche führt [26], [69] und [110]. Ein gegenläufiger Effekt, der zu einem Schärfen der Oberfläche führt, liegt in dem Aufbrechen von mikro- und makroskopischen Teilchen infolge von Eiskristallbildung. Durch den präventiven Einsatz von Streusalz ist diese Wirkung auf Autobahnen jedoch nicht zu beobachten.

Eine Möglichkeit, die saisonale Veränderung der Fahrbahngriffigkeit zu beschreiben, ergab sich aus Langzeitbeobachtungen von CETE auf französischen Schnellstraßen und Versuchsstrecken [56]:

$$SFC = 0,655 + 0,047 * \cos [6,28 (t - 0,208)] \quad (49)$$

mit: $t = \text{Monat} (1, 2, \dots, 12)$

Dies bedeutet, dass sich über das Jahr aufgetragen, das Griffigkeitsniveau (beschrieben durch den SFC-Wert) wie folgt verhält, **Abbildung 112**:

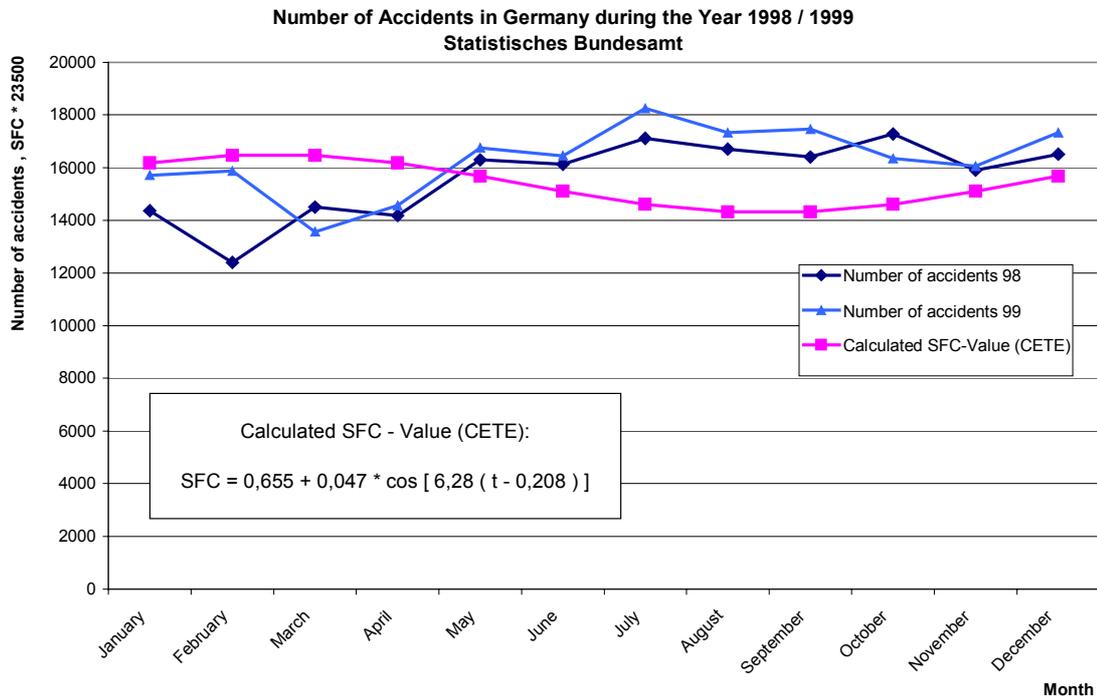


Abbildung 112: Saisonale Unfallrate nach [113] und [114] und Verlauf des Reibwertepotentials
Seasonal rate of accidents and friction potential

Der hier dargestellte Verlauf mit einem Maximum im Februar und einem Minimum im August ist sehr ähnlich zu dem in [110] dargestellten Verlauf mit einem Maximalwert im Januar und einem Minimalwert im Juli. Die dabei auftretenden Schwankungen des SFC-Wertes betragen bis zu 0,1 Reibwerteinheiten. Vergleicht man den hier berechneten Reibwertverlauf mit der saisonalen Gesamtunfallrate, [113] und [114], ergibt sich ein gegensätzlicher Verlauf. Obwohl eine Vielzahl weiterer Einflussparameter in diese Statistik miteinfließen (Kilometerleistung in den verschiedenen Monaten, Fahrzeugart, gefahrene Geschwindigkeiten, usw.), so scheint ein Zusammenhang zwischen der Anzahl der Unfälle und dem Griffigkeitsniveau zu bestehen.

Aus diesem Grund bietet es sich an, die jahreszeitliche Veränderung des Reibwertes z. B. durch Verwendung der o. g. Gleichung innerhalb eines Reibwertvorhersagesystems zu berücksichtigen.

Neben dem direkten Einfluss der Fahrbahnoberfläche durch Veränderungen der Mikro- und Makrotextur haben **langwellige Abweichungen** der Ist- von der Idealoberfläche einen Einfluss auf Radlaständerungen und Wasserfilmdicken. Während die Bedeutung von Längsunebenheiten und den damit verbundenen Radlastschwankungen eng mit der Entwicklung von adaptiven Fahrwerken sowie Regelstrategien bei Bremsvorgängen verbunden ist, soll an dieser Stelle speziell der Einfluss von Spurrillen auf die **Wasserfilmdicke** und deren Berücksichtigung in einem Reibwertvorhersagesystem diskutiert werden. Laut [74] ergeben sich durch Spurrillen bei Nässe keine „besonderen“ Gefahren. Dies ist jedoch nur so lange der Fall, wie die Wasserlachen vom Fahrzeugführer zu erkennen sind. In diesem Fall verringert er deutlich die Fahrgeschwindigkeit, wodurch es zu einer Überkompensation der Kraftschlussverringering kommt [32]. Eine Gefahr stellen daher hauptsächlich die nicht erkennbaren Änderungen der Wasserfilmdicke, wie z.B. in Kurven, dar.

Da ein Reibwerterkennungssystem in der Lage sein sollte, eine „sichere“ Geschwindigkeit vorzugeben, sollten die Abschnitte mit signifikanten Spurrillen, die beispielsweise bei der von der BASt durchgeführten Zustandserfassung ermittelt wurden, in die Datenbank aufgenommen und/oder durch Nutzung eines Floating-Car-Systems zur Verfügung gestellt werden.

Die mittleren Wasserfilmtiefen in Spurrillen, ab denen es bei einem „zügigen“ Spurwechsel zu kritischen Fahrzuständen kommen kann, wurden von [53] für ein heckgetriebenes Fahrzeug in Simulationsrechnungen ermittelt. Hieraus lassen sich erste Ansätze zur Bestimmung einer Sollgeschwindigkeit bei Spurrillen ableiten.

Neben den dynamischen Verfahren zur Berücksichtigung von Unebenheiten und der Bestimmung der Wasserfilmdicke können **stationäre Einrichtungen** eine Alternative darstellen. So erlaubt ein am Fahrbahnrand positioniertes System durch Messung der Regenintensität bei Kenntnis des Fahrbahnzustands (Quer- und Längsneigung der Fahrbahn, Makrotextur der Oberfläche und Fließlänge) die Berechnung der Wasserfilmdicke oberhalb der Texturspitzen, **Gleichung 23** [56]:

$$WT = 0,26 * (ETD)^{0,4} \frac{(RI * L_F)^{0,4}}{q^{0,3}} - ETD + 0,3 \quad (50)$$

mit: RI = Regenintensität (Rainfall Intensity) [mm/h]
L_F = Fließlänge [m]
q = Querneigung [%]

Die Fließlänge beschreibt die Distanz, die ein Wasserteilchen beim Abfließen über die Fahrbahn zurücklegen muss. Eine ähnliche Berechnungsvorschrift wurde auch zur Beschreibung des Einflusses der Megatextur auf die Höhe des Wasserfilms gefunden. Dies ermöglicht somit auch die Berücksichtigung von Spurrillen oder Längswellen auf die Wasserfilmdicke.

Die **Fahrbahnneigung** in Längs- und Querrichtung hat jedoch nicht nur einen Einfluss auf die Wasserfilmdicke bei Regen, sie beeinflusst auch direkt die erreichbaren Längs- und Querschleunigungen. So ergeben sich für die Bremsverzögerung bzw. die Querschleunigung und die daraus resultierende maximale Geschwindigkeit beim Durchfahren einer Kurve folgende Zusammenhänge:

Maximale Bremsverzögerung (bergab):

$$a_x = g \left(\frac{\mu_x - \tan \alpha}{1 + \mu_x \cdot \tan \alpha} \right) \quad (51)$$

mit: μ_x = max. Längsreibungswert
 α = Längsneigungswinkel (bergab)

maximale Querschleunigung und Kurvengeschwindigkeit:

$$a_y = g \left(\frac{\mu_y + \tan \delta}{1 - \mu_y \cdot \tan \delta} \right) \quad (52)$$

$$v_{\max} = \sqrt{R \cdot g \left(\frac{\mu_y + \tan \delta}{1 - \mu_y \cdot \tan \delta} \right)} \quad (53)$$

mit: μ_y = max. Querreibungswert
 δ = Querneigungswinkel in Richtung Kurvenmittelpunkt
 R = Kurvenradius

Hieraus ergibt sich die Forderung, innerhalb der Datenbank des Reibwertvorhersagesystems bzw. des Navigationssystems auch Informationen über die Fahrbahnneigung zu speichern und diese bei der Berechnung der maximalen Längs- und Querschleunigungen zu berücksichtigen.

Auch dem fahrbahnbezogenen Sturz der Räder und die damit verbundenen Auswirkungen auf das Kraftschlusspotential in Querrichtung wird im FPS bislang nicht Rechnung getragen. Die Aufnahme von Seitenkraft-Sturzwinkel- Kennlinien stellt zwar kein Problem dar. Jedoch ergibt sich ein komplexer Zusammenhang zwischen den einzelnen Einflussgrößen und den Auswirkungen des Radsturzes auf das Kraftschlusspotential. Dieser Zusammenhang bedarf intensiver Untersuchung. Des

Grenzen des aktuellen und Gedanken zu zukünftigen Systemen

Weiteren ist die Messung des fahrbahnbezogenen Sturzes nur unter Verwendung aufwendiger Sensorik möglich. Da jedoch die aktive Regelung des Radsturzes, wie es in Prototypen bereits realisiert wurde, eine deutliche Erhöhung des Maximalreibungswertes in Querrichtung ermöglicht, sollte zumindest eine fahrzeugbezogene Sturzbestimmung innerhalb des FPS erfolgen.

Im Gegensatz hierzu lassen sich Einflüsse aus **dynamischen Fahrzuständen**, wie z. B. Lastwechselreaktionen und auch das Gleiten einzelner Räder beim Überschreiten des Kraftschlussmaximums nur schwer in diesem recht einfachen System berücksichtigen. Hierzu wäre eine Erweiterung des Reibwertvorhersagemodells um ein Fahrdynamikmodell nötig. Ein solcher Forschungsansatz wird z. Zt. in einem weiteren Projekt verfolgt, in dem die Potentiale der Vernetzung von Fahrdynamiksystemen bei bekanntem Reibwert ermittelt werden.

Um eine Überprüfung der Güte der Reibwertvorhersage im Fahrbetrieb zu erzielen, bietet sich die Verwendung eines **Reifensensors** an, der das gemessene Kraftschlusspotential mit dem berechneten vergleicht. Hierdurch ergibt sich die Möglichkeit, eine Autokalibrierung zu implementieren, die z. B. auch Effekte aufgrund von Profilverschleiß kompensiert.

Eine weitere Einschränkung des aktuellen Reibwertvorhersagemodells liegt in der Bestimmung der **Wasserfilmtiefe an den Hinterrädern**. Bisher wurden für die Vorder- und Hinterräder die gleichen Bedingungen angenommen. Dies bedeutet, dass die Wasserverdrängung durch die Vorderräder und die dadurch geringere Wasserfilmdicke an den Hinterrädern nicht berücksichtigt wird. Dadurch befindet man sich zwar auf der sicheren Seite, da der reale Reibwert über dem berechneten liegt (außer bei engen Kurven, in denen keine Spurüberlappung stattfindet). Soll jedoch der berechnete Reibwert verwendet werden, um z. B. eine schnellere, kraftschlussoptimierte Bremsregelung zu realisieren, so würde dies zu einem Verschenken von Bremsweg führen. D. h. die vorgegebene Bremskraft wäre zu gering. Eine Abhilfe hierfür könnte natürlich die Verwendung eines Wassertiefensensors vor den Hinterrädern sein. Aus Kostengründen ist dies jedoch nicht anzustreben. Vielmehr sollten Untersuchungen durchgeführt werden, die die Verdrängung des Wasserfilms durch die Vorderräder in Abhängigkeit von Geschwindigkeit, Wasserfilmdicke, Radlast, Fahrbahntextur, Profiltiefe und -gestaltung beschreiben. Der Aufwand für diese Untersuchungen darf jedoch nicht unterschätzt werden, da speziell unterschiedliche Reifendimensionen eine zusätzliche Schwierigkeit ergeben.

6.4 Abgrenzung zu Vorgängerarbeiten und Fazit

Das in diesem Kapitel vorgestellte Reibwertvorhersagesystem nutzt Erkenntnisse von [33], wo speziell die Einflüsse der Fahrbahngrobrauhigkeit und der Fahrbahnnässe auf den Reibwert dargestellt wurden. Das damals entwickelte Konzept, siehe **Kap. 2.2.4**, basiert auf der Bestimmung von Kenngrößen, die die Makrotextur und das Eindringverhalten / Verzahnungsverhalten von Laufstreifen und Fahrbahn beschreiben. Mittels dieser Größen wird ein zweidimensionales Reibwertkennfeld aufgespannt. Aus diesem Kennfeld kann das dem aktuellen Fahrbahnzustand entsprechende Kraftschlusspotential ermittelt werden. Die nötige Sensorik zur Abtastung der Fahrbahnmakrotextur und zur Bestimmung des Fahrbahnzustands („Nässezahl“) wird on-board mitgeführt.

Dieses Konzept beinhaltet allerdings auch Einschränkungen. So wurden beispielsweise die Größen Mikrotextur und Profiltiefe nicht zur Bestimmung des Kraftschlusspotentials herangezogen. Da diese Einflussparameter jedoch für die Fahrsicherheit von hoher Bedeutung sind, ein sechsdimensionales Kennfeld (sechs Haupteinflussgrößen) zur Berechnung des Maximalreiwerts aber schwierig zu handhaben ist, wurde in dieser Arbeit ein neues Konzept verfolgt und ein Berechnungsmodell entwickelt.

Der in zahlreichen Messungen nachgewiesene große Einfluss der Mikrotextur, wurde in dieser Arbeit unter Verwendung des BFC-Wertes, bei der Kraftschlussberechnung berücksichtigt. Da jedoch eine Erfassung der Mikrotextur und bei feuchter / nasser Fahrbahn sogar eine Erfassung der Makrotextur mittels mitgeführter optischer Sensorik kaum möglich ist, kommt beim FPS eine Datenbank zum Einsatz. In dieser sind die reibwertrelevanten Texturdaten gespeichert und werden mittels GPS-gestützter Ortsbestimmung zur Verfügung gestellt.

Da die Größen „stationäre Radlast“ und „Profiltiefe“ gerade in Wechselwirkung mit dem Fahrbahnzustand einen großen Einfluss auf die übertragbaren Kräfte haben, werden diese nun im FPM berücksichtigt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Aufbau dieses Systems zur Reibwertvorhersage, basierend auf einer Kombination aus mitgeführter Sensorik und dem Zugriff auf eine Datenbank, ein realisierbares Konzept darstellt. Dadurch können reibwertrelevante Informationen, die im Fahrzeug nur schwer und teuer oder überhaupt nicht erfasst werden können, einem System zur Reibwertprognose zur Verfügung gestellt werden. Ohne Informationen, die in einer Datenbank abgelegt bzw. von einer

Abgrenzung zu Vorgängerarbeiten und Fazit

externen Quelle bezogen werden, ist eine Prognose zukünftiger Kraftschlussverhältnisse nicht möglich.

Die verwendeten Sensoren zur Bestimmung der Wasserfilmdicke sind grundsätzlich in der Lage, die nötigen Informationen zu liefern. Jedoch muss sowohl die Auflösung, d. h. das Erkennen von bereits geringen Wasserfilmdicken, als auch die Abtastrate erhöht werden. Des Weiteren gilt es, die Störsicherheit vor allem gegenüber Fremdlicht und Sprühnebel zu verbessern.

Das Funktionieren des Gesamtsystems unter verschiedenen Umgebungsbedingungen und häufig wechselnden Fahrbahnbelägen muss durch Versuche im realen Verkehr, z. B. auf der beschriebenen MMI-Strecke, weiter überprüft werden. Außerdem gilt es, beim Reibwertvorhersagemodell rauhere Fahrbahnen und höhere Geschwindigkeiten zu berücksichtigen.

Für die Zukunft sollte eine Möglichkeit zur schnellen Aktualisierung der Datenbank durch externe Kommunikation gegeben sein. Dies könnte ähnlich wie bei heutigen Navigationssystemen über eine Art TMC erfolgen. Würde man ganz auf eine mitgeführte Datenbank verzichten, so müssten die Daten in einer 2-Wege-Kommunikation ausgetauscht werden. D. h. das Fahrzeug sendet eine Information über seinen Standort, die Strecke und das Ziel und erhält die relevanten Daten bezüglich der Fahrbahnbeschaffenheit. Dies ließe sich noch beliebig auf weitere Informationen ausbauen. Jedoch beinhaltet eine solche Lösung auch stets die Gefahr eines Datenmissbrauchs.

7 Abschließende Betrachtungen und Ausblick

Die Haupteinflussparameter auf die Reifen-Fahrbahn-Reibung, die sich bei einer intensiven Literaturrecherche herauskristallisiert haben, zeigten auch in den anschließenden quantifizierenden Messungen ihre große Bedeutung. Die Art des Einflusses lässt sich stets auf die Gummimechanik und die Gummireibungstheorie zurückführen.

Mit verschiedenen Ansätzen wurde in früheren Arbeiten versucht, unter Berücksichtigung von ausgewählten Einflussgrößen, bzw. durch Erfassung der aus dem Reibwert resultierenden Effekte am Reifen oder dem Gesamtfahrzeug, eine Reibwerterkennung zu realisieren.

Es zeigte sich hierbei, dass je weniger Einflussparameter in eine Modellbildung einfließen und bei definierten Umgebungsbedingungen variiert wurden, die Abweichungen von Messung und Modellberechnung geringer wurden. Dies schränkt jedoch eine Übertragbarkeit auf andere Bedingungen, wie sie in realen Verkehrssituationen zwangsläufig entstehen, stark ein. Eine große Anzahl von Modellparametern ermöglicht einen weiten Anwendungsbereich, bewirkt aber zwangsläufig eine geringere Genauigkeit.

Eine reine Nutzung von Effekten, die am Reifen, Rad oder am Fahrzeug gemessen werden können, siehe **Kapitel 2.2.1** bis **2.2.3**, ist wiederum relativ unabhängig von wechselnden Umgebungsbedingungen, ermöglicht jedoch keine auf zukünftige Fahrbahnverhältnisse gerichtete Reibwertprognose.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde in dieser Arbeit versucht, einen Kompromiss zu finden aus einer ausreichend hohen Modellgüte und einem großen Gültigkeitsbereich. Dies wurde realisiert, indem die maßgeblichen Einflussgrößen auf die Reifen-Fahrbahn-Reibung bestimmt und bezüglich ihrer Wirkung im Detail beschrieben wurden. Als Einschränkungen hinsichtlich eines noch größeren Gültigkeitsbereichs wurden bei der Modellbildung die Reifenbreite, die Laufstreifenmischung, das Profildesign und die Witterung (tiefe Temperaturen, Schnee und Eis) nicht berücksichtigt. D.h. diese Parameter wurden möglichst konstant gehalten. Damit ist das Modell beispielsweise auf Temperaturen oberhalb von 5°C beschränkt.

Aus diesem Grund muss eine Forderung an zukünftige Arbeiten sein, das Modell zunächst unter Verwendung des selben Sommerreifens auf tiefere Temperaturen und

Abschließende Betrachtungen und Ausblick

größere Fahrbahnrauigkeiten zu erweitern. Für die dafür nötigen Messungen, auch bei Schnee- und Reifoberflächen, steht das Messsystem PETRA und AUDI V8 zur Verfügung. Jedoch sollte der Einsatzbereich des Anhängers, z.B. mittels geeigneter Getriebeübersetzung, auf höhere Geschwindigkeiten erweitert werden.

Um die verschiedenen Einflussparameter, die teilweise starke Wechselwirkungen untereinander zeigen, in einem gemeinsamen Modell berücksichtigen zu können, stellte sich die Verwendung einer Statistiksoftware als ein mögliches Hilfsmittel heraus. Damit sich jedoch eine verlässliche Aussage ergibt, ist man auf eine möglichst große Menge von Messdaten angewiesen. Nur dadurch ist eine Absicherung/Validierung des Modells möglich. Eine einfache Übertragung des FPM auf Bereiche, zu denen keine Messungen vorliegen, ist nicht ohne weiteres möglich. Dies liegt daran, dass zwar physikalische Größen zur Reibwertberechnung eingesetzt werden, diese jedoch nicht gemäß physikalischen Gesetzen zu einer Berechnungsvorschrift zusammengefügt wurden.

Bezüglich der untersuchten Parameter stellte sich der Einfluss der Mikrotextur auch auf nassen Oberflächen (bei geringer Wasserfilmdicke) als signifikant heraus. Um so erstaunlicher ist es, dass diese Einflussgröße bisher nicht direkt gemessen wird und somit auch keine Kennwerte zur Beurteilung existieren. Lediglich die Auswirkung der Fahrbahnschärfe auf den Nassgriff wird mittels Pendel oder SRM/BFC-Wert erfasst. Die Größen zeigten eine gute Korrelation mit dem Reibverhalten realer Fahrzeugreifen. Jedoch ist anzumerken, dass das Pendel bedingt durch Aufbau und Funktion nur einen kleinen Bereich der beim Reifen auftretenden Aktivierungsfrequenzen durchlaufen kann.

8 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung und Quantifizierung von Einflüssen auf den Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn. Aufbauend auf einer Literaturrecherche wurden folgende Parameter als relevant definiert: Fahrbahnmakro- und Mikrotextrur, Wasserfilmtiefe, Geschwindigkeit, Radlast und Profiltiefe. Reifenbezogene Größen wie z. B. die Reifendimension, das Profildesign und die Laufstreifenmischung waren nur seltener Bestandteil von Veröffentlichungen und stellen vielmehr die gut gehütete Kernkompetenz von Gummi- und Reifenentwicklern dar. Diese Parameter wurden bei den durchgeführten Untersuchungen konstant gehalten.

Um den Einfluss der berücksichtigten Einflussgrößen auf den Reibwert quantifizieren zu können, wurden neben der Erweiterung des Reifenmessanhängers PETRA, detaillierte Untersuchungen mit verschiedenen Sensoren und Messsystemen durchgeführt. Die dabei gewonnenen Kennwerte wurden anschließend bezüglich ihrer Korrelation mit dem Reibwert überprüft.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden im Rahmen dieser Arbeit zwei Modelle entwickelt, bzw. erweitert: Das Reibwertvorhersagemodell (FPM – **F**riction-**P**rediction-**M**odel) und das Kontakttiefenmodell. Das FPM ermöglicht in einem weiten Parameterbereich die Vorhersage des Reibwertmaximums in Längs- und Querrichtung. Das Kontakttiefenmodell dient der näheren Untersuchung der Kontaktstellen zwischen Laufstreifen und Fahrbahntextur. Der Laufstreifen wird aus Feder-Dämpfer-Elementen (Kelvin-Voigt-Elementen mit Koppelfedern) nachgebildet. Relativbewegungen zwischen Reifen und Fahrbahn werden nur in vertikaler Richtung zugelassen. Als Ergebnis der Berechnung ergibt sich u. a. die mittlere Eindringtiefe der Fahrbahn in den Laufstreifen und die mittlere Kontaktfläche. Diese Werte ergaben gute Korrelationen mit gemessenen Reibwerten auf nasser und trockener Fahrbahn.

Unter Verwendung des FPM wurden anschließend Untersuchungen zum Aufbau eines Reibwertvorhersagesystems im fahrenden Fahrzeug durchgeführt. Um dem Modell die nötigen Informationen zur Verfügung zu stellen, kommt eine Kombination aus autark gemessenen Werten und der Nutzung einer Datenbank zum Einsatz. Zur Vorhersage des Kraftschlusspotentials in einem zukünftigen Streckenabschnitt wurde ein Navigationssystem unter Verwendung eines GPS-Empfängers programmiert. Dadurch gelang es sowohl Fahrbahntexturgrößen als auch Informationen zur Streckenführung dem Reibwertvorhersagesystem zur Verfügung zu stellen und das aktuelle sowie zukünftige Kraftschlusspotential zu bestimmen. Eine Berechnung des nötigen Bremswegs, bzw. der zulässigen Kurvengeschwindigkeit ist somit möglich.

9 Literatur

9.1 Quellenverzeichnis

- [1] **Abendroth**, B.: Gestaltungspotentiale für ein Pkw-Abstandsregelsystem unter Berücksichtigung verschiedener Fahrertypen. Herausgeber Kurt Landau, Schriftenreihe Ergonomie, Ergonomie Verlag Stuttgart, 2001.
- [2] **AIPCR / PIARC** : International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurement, Final Report, 1994
- [3] **ASTM**: Annual Book of ASTM Standards. Road and Paving Materials; Paving Management Technologies, 1995
- [4] **Bachmann**, Th.: Reibwertforschung an der Schnittstelle Reifen/Fahrbahn. Darmstädter Reifenkolloquium des Fachgebiets Fahrzeugtechnik der TH Darmstadt, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 285, 1996
- [5] **Bachmann**, Th.: Berührungslose Kraftschlusserkennung. BMFT-Forschungsvorhaben TV 9312, PROMETHEUS Phase III - Schlussbericht, Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TH Darmstadt, 1996
- [6] **Bachmann**, Th.: Literaturrecherche zum Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn. Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TH Darmstadt, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 286, 1996
- [7] **Bachmann**, Th.: Wechselwirkungen im Prozeß der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn. Dissertation, Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 360, 1998
- [8] **Bachmann**, Th., Hoppstock, R., Naab, K.: On-board detection of friction between tyre and road as an example of a driver assistance system. Intelligent Transportation System Conference, 1999
- [9] **Bachmann**, Th., Naab, K., Reichart, G., Schraut, M.: Enhancing traffic safety with BMW's driver assistance approach connected drive, Intelligent Transportation Systems Conference, Turin, 2000

- [10] **Bachmann, V.:** Untersuchungen zum Einsatz von Reifensensoren im Pkw. Dissertation, Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 381, 1998
- [11] **Backfisch, K.P., Heinz, D.:** Das Reifenbuch-Umrüstung, Reifentechnik, Fahrpraxis.Motorbuch Verlag Stuttgart, 1992
- [12] **Bantle, M.:** Kein Respekt vor $Mü=1$. Porsche Zeitschrift „Christophorus“, Nr. 102, 1970
- [13] **Barthelt, H.:** Die Berechnung des Aquaplaning-Verhaltens von glatten und profilierten Reifen. Automobiltechnische Zeitschrift 75 Nr. 10, 1973
- [14] **Becherer, Th.:** The Sidewall Torsion Sensor System. 2. Darmstädter Reifenkolloquium, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 362, 1998
- [15] **Becker, A., Seifert, B.:** Simulation von Abrieb und von Reifenkennwerten für Handling mit einem stationär rollenden FE-Reifenmodell. Reifen Fahrwerk Fahrbahn, VDI Berichte 1350, 1997
- [16] **Becker, W., Hacker, G., Pressler, H., Wickinghoff, J.:** Bewertungshintergrund für Griffigkeitsmessungen auf Bundesautobahnen mit der SCRIM. Projekt Nr. 90 630, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 1992
- [17] **Bielaczek, C.:** Untersuchungen zur Auswirkung einer aktiven Fahrerbeeinflussung auf die Fahrsicherheit beim Pkw-Fahren im realen Straßenverkehr. Dissertation, Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, VDI Fortschritt-Berichte, 1997
- [18] **Bosch Kraftfahr Technisches Taschenbuch.** VDI-Verlag, 21. Auflage, 1991
- [19] **Braess, H.-H., Seiffert, U.:** Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 2. Auflage, Vieweg Verlag, 2001
- [20] **Breuckmann, B.:** Bericht über die Vermessung der Fahrbahnoberfläche auf dem Flughafen in Griesheim. 1999 (unveröffentlicht)
- [21] **Breuer, B.:** Skriptum Kraftfahrzeuge I. Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, September 1997
- [22] **Breuer, B.:** Skriptum Kraftfahrzeuge II. Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, April 2001
- [23] **Breuer, B., Strothjohann, Th.:** Der Darmstädter Reifensensor – Ein mechatronisches System zur Ermittlung dynamischer Größen im rotierenden Reifen. Fachtagung Kautschuk und Elektronik zum 75jährigen Bestehen der Deutschen Kautschuk-Gesellschaft, 2001.

Quellenverzeichnis

- [24] **Breuer, J.:** Ergonomische Beurteilung und Gestaltung der Sicherheit des Arbeitssystems Kraftfahrzeugführen. Dissertation, Fachgebiet Arbeitswissenschaft der TU Darmstadt, 1995
- [25] **Breuer, J.-U. ; Baierl, V.:** Einfluss der Splittqualität auf die Griffigkeit und Lebensdauer von Oberflächenbehandlungen an einer Versuchsstrecke. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 592, 1991
- [26] **Bühlmann, F.:** Einfluss der Witterung auf die Griffigkeit von Fahrbahnen. Mitteilung Nr. 55, Institut für Straßen-, Eisenbahn- und Felsenbau ETH-Zürich 1985
- [27] **Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.):** Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 27/1994, 1994
- [28] **Burkhardt, Eberhardt, Himbert, Löhle:** Rekonstruktion von Verkehrsunfällen. Deutsche Automobil Treuhand GmbH, Stuttgart, 1979
- [29] **Dames, J. ; Lindner, J.:** Ermittlung der Endpolierwerte von im Straßenbau verwendeten Gesteinen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 574, 1989
- [30] **Dieckmann, Th.:** Der Reifenschlupf als Indikator für das Kraftschlußpotential. Dissertation Universität Hannover, 1992
- [31] **DIN:** Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen, Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe. DIN-ISO 13473-1, Entwurf September 1995
- [32] **Domhan, M.:** Verantwortung der Baulastträger für die Griffigkeit bei Nässe und andere Oberflächeneigenschaften der Straßen. Ministerium für Stadtentwicklung, Wohnen und Verkehr, 1998
- [33] **Eichhorn, U.:** Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn – Einflußgrößen und Erkennung. Dissertation, Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TH Darmstadt, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 222
- [34] **Ernst, G. K.:** Naßgriff: Dauerauftrag für die Reifenentwicklung. Haus der Technik Tagung Wechselwirkung zwischen Fahrzeug und Fahrbahn, 1994
- [35] **Essers, U.; Wohanka, U.:** Einflüsse von Profiltiefe und Nässe auf das Reifenkennfeld. Darmstädter Reifenkolloquium des Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TH Darmstadt, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 285, 1996

- [36] **Euler**, G., Schröder, R., Lang, J., Plhank, R., Retzlaff, G.: Ermittlung der zeitlichen Feuchte- und Nässeverteilung auf Fahrbahnen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, BMV, Heft 567, 1989
- [37] **Fach**, M.: Einfluß der Umgebungstemperatur auf den Naßgriff von Pkw Reifen unterschiedlicher Gummimischung. Abschlußbericht zu Projekt Nr.: 95 531 – Messung von μ -Schlupf-Kurven als Funktion der Temperatur, Bundesanstalt für Straßenwesen, 1995
- [38] **Fach**, M.: Einflußgrößen auf den Kraftschluß bei Nässe. Abschlußbericht zu Projekt Nr.: 94 530 – Untersuchungen zum Einfluß der Profiltiefe unterschiedlich breiter Reifen auf den Kraftschluß bei Nässe, Bundesanstalt für Straßenwesen, 1996
- [39] **Fach**, M.: Kraftschlußverhalten von „Öko-Reifen“. Abschlußbericht zu Projekt Nr.: 96 531 – Kraftschluß bei Nässe, Einflußgrößen und Erkennung, Kraftschlußverhalten von rollwiderstandsoptimierten Reifen, Bundesanstalt für Straßenwesen, 1996
- [40] **Fach**, M.; Bachmann, V.; Breuer, B.: Der Darmstädter Reifensensor im Labor und am Fahrzeug. 2. Darmstädter Reifenkolloquium des Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 362, 1998
- [41] **Fach**, M.: Lokale Effekte der Reibung zwischen Pkw-Reifen und Fahrbahn. Dissertation, Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 411, 1999
- [42] **FGSV** Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Arbeitsanweisung für kombinierte Griffigkeits- und Rauigkeitsmessungen mit dem Pendelgerät und dem Ausflussmesser, FGSV 402, Köln 1972
- [43] **FGSV** Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Merkblatt über den Rutschwiderstand von Pflaster und Plattenbelägen für den Fußgängerverkehr, Köln, 1997
- [44] **FGSV** Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für bauliche Erhaltung von Verkehrsflächen – Asphaltbauweisen. ZTV BEA-StB 98, Köln, 1998
- [45] **FGSV** Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Richtlinien zur Bewertung der Strassengriffigkeit bei Nässe, Köln, 1999

Quellenverzeichnis

- [46] **Fischlein**, H.: Untersuchung des Fahrbahnoberflächeneinflusses auf das Kraftschlussverhalten von Pkw-Reifen, Dissertation, Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau der TU Karlsruhe, VDI-Fortschritt Berichte Reihe 12, Nr. 414, 2000
- [47] **Fluegge**, J.H., Sparks, J.D., Vekschman, I.W.: Tire treadwear experiment using Taguchi methods. Ford Motor Company, SAE-Paper 880580, 1988
- [48] **Gehman**, S., D.: Rubber Structure and Properties. Mechanics of Pneumatic Tires, US Department of Transportation, Washington DC, USA, 1982
- [49] **Gengenbach**, W.: Experimentelle Untersuchung von Reifen auf nasser Fahrbahn. Automobiltechnische Zeitung, ATZ70, 1968
- [50] **Glaeser**, K.-P., Fach, M.: Kraftschlußmessungen bei Nässe im Innentrommelprüfstand der BAST. Darmstädter Reifenkolloquium, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 285, 1996
- [51] **Gnadler**, R.: Naßgriff- und Aquaplaningverhalten von Pkw-Reifen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 11-12/88, 1988
- [52] **Gnadler**, R., Unrau, H.J., Fischlein, H., Frey, M.: Ermittlung von μ -Schlupf-Kurven an Pkw-Reifen. Abschlußbericht zum FAT-Forschungsvorhaben, TH Karlsruhe, Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, 1995
- [53] **Gnadler**, R.: Wasserabfluss von unebenen Fahrbahnoberflächen – Simulation des Fahrzeugverhaltens auf unebener, nasser Fahrbahn. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, H 728, BMV, 1996
- [54] **Görich**, H.-J.: System zur Ermittlung des aktuellen Kraftschlußpotentials eines Pkw im Fahrbetrieb. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1992
- [55] **Görich**, H.-J., Jacobi, S., Reuter, U.: Ermittlung des aktuellen Kraftschlusspotentials eines Pkw im Fahrbetrieb. Reifen Fahrwerk Fahrbahn, Tagung Hannover Oktober 1993, VDI Berichte, Nr. 1088
- [56] **Gothie**, M.: Model proposed for assessing water depth on pavement surfaces. CETE de Lyon, August 2000
- [57] **Grandel**, J., Hörz, E.: Gleitbeiwert, maximaler Kraftschlußbeiwert und Bremsschlupf in Abhängigkeit vom Reifenprofil, Fahrbahnbelag und Fahrbahnzustand. Deutsche Kraftfahrtforschung und Straßenverkehrstechnik, VDI-Verlag Düsseldorf, 1974

- [58] **Grosch**, K.A.: Visko-elastische Eigenschaften von Gummimischungen und deren Einfluss auf das Verhalten von Reifen. Kautschuk und Gummi Kunststoffe 42/9, 1989
- [59] **Grünberg**, H.: Untersuchung des Radradienverhältnisses und des Schlupfaufkommens als Beitrag zur Fahrsicherheit, Dissertation, Institut für Kraftfahrwesen der TU Hannover, 1999
- [60] **Haken**, K.-L.: Konzeption und Anwendung eines Meßfahrzeugs zur Ermittlung von Reifenkennfeldern auf öffentlichen Straßen. Dissertation, Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der TU Stuttgart, 1993
- [61] **Hegmon**, R.R.: Tire-pavement interaction. Public Roads Vol. 51-1, 1987
- [62] **Hein**, G.W.: Zur Integration von Satelliten-Navigation und UMTS. Internationaler Kongress Kommerzielle Anwendung der Satelliten-Navigation, München, 2001
- [63] **Heinrich**, G.: The dynamics of tire tread compounds and their relationship to wet skid behaviou. Progress in Colloid and Polymer Science, Vol. 90, 1992
- [64] **Heinrich**, G., Helmig, G., Vilgis, T.: Polymere Netzwerke – Entwicklungsstand der molekular–statistischen Theorie. Kautschuk Gummi Kunststoffe, 48. Jahrgang, Nr.10/95
- [65] **Heinrich**, G., Vilgis, T.A.: Viscoelastic Hysteresis Friction on Fractal Road Surfaces: Molecular Theory and Application. Darmstädter Reifenkolloquium des Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TH Darmstadt, VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Nr. 285, 1996
- [66] **Heinrich**, G.: Reifen - Anforderungen an Rohstoffe und Produkt. DIK – Workshop, Hannover, 1998
- [67] **Hofferberth**, W.: Ergebnisse von neuen Untersuchungen über das Bremsverhalten von Kraftfahrzeugen. Vortrag, 11. Arbeitstagung über Unfall-Untersuchung, Baden-Baden, 1974
- [68] **Holzwarth**, F.: Entwicklung eines Verfahrens zur berührungslosen Messung der Wasserfilmdicke auf Fahrbahnen. Dissertation, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der TU Stuttgart, 1996
- [69] **Huschek**, S.: Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe. Straße + Autobahn 46, Heft 3, 1995

Quellenverzeichnis

- [70] **Huschek, S.:** Anforderungen an die Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen – Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe. Neue Entwicklungen in der Straßenbautechnik, 1997
- [71] **Huschek, S.:** Kennzeichnung und Auswirkungen der Textur von Fahrbahnoberflächen. 2. Darmstädter Reifenkolloquium des Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 362, 1998
- [72] **Huschek, S.:** Die Bewertung von Fahrbahnoberflächen hinsichtlich Griffigkeit, Ebenheit und Substanz. Plenarvortrag, Reifen Fahrwerk Fahrbahn Tagung, Hannover, 1999
- [73] **Kalender, U.:** Wechselwirkung Reifen/Fahrbahn auf den Kraftschluss bei Nässe und hohen Fahrgeschwindigkeiten bei Verwendung neuester Reifentypen. Schriftenreihe Straßenbau und Verkehrstechnik, Heft 498, 1986.
- [74] **Kamplade, J.:** Auswirkung von Verschleiß und Verformung der Fahrbahnoberfläche auf die Verkehrssicherheit. Straße und Verkehr 2000, Vol 2B, Berlin 1988
- [75] **Kirste, T.:** Untersuchung über den Einfluß eines Schmierfilms auf die Fahrbahngriffigkeit. FKFS Bericht Nr. 17/1980, Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren der TH Aachen, 1980
- [76] **Klempau, F.:** Kraftschlussensorik. Continental Innovations Workshop, Oktober 1999 (Vortrag)
- [77] **Klempau, F.:** Reibung Reifen/Fahrbahn. Unterlagen zur Vorlesung Kraftfahrzeuge III, 3. November 2000
- [78] **Klempau, F.:** Untersuchungen zum Einsatz eines modellunterstützten Reibwertvorhersagemodells im fahrenden Fahrzeug. 3. Darmstädter Reifenkolloquium des Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Nr. 437, 19. Oktober 2000
- [79] **Klempau, F.:** Development of a friction prediction system. 2nd International Colloquium on Vehicle Tyre Road Interaction, Florence, February 23rd, 2001
- [80] **Knepper, S.:** Vergleichsmessungen zwischen dem Stuttgarter Reibungsmesser und der Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine im Hinblick auf ihre Einsatzmöglichkeiten im Rahmen des Managements der Straßenerhaltung. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 582, 1990

- [81] **Kummer**, H.W.: Unified theorie of rubber and tire friction. Pennsylvania Stat University, Engineering Research Bulletin B-94, 1966
- [82] **Kummer**, H.W., Meyer, W.E.: Verbesserter Kraftschluß zwischen Reifen und Fahrbahn – Ergebnisse einer neuen Reibungstheorie. Automobiltechnische Zeitschrift Nr. 8 und 11, 1967
- [83] **Kunz**, A., Broszeit, E., Schröder, H.-J.: Abschätzung der Beölungsmenge von Tiefziehblechen mit unterschiedlicher Oberflächenfeingestalt zur Beurteilung des Tiefziehverhaltens. Blech, Rohre, Profile 39, 1992
- [84] **Litzka**, J. ; Friedl, E.: Untersuchungen über den maßgebenden Reibwert. Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Straßenforschung Heft 376, Wien 1988
- [85] **Ludwig**, D.: Untersuchung zur Profilelementverformung von Pkw-Reifen auf realer Fahrbahn bei Geradeauslauf unter besonderer Berücksichtigung von Verschleiß und Reibwert. Dissertation , Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 363, 1998
- [86] **Lukaszewicz**, J.: Einfluß der Reifenbreite auf den Kraftschluß bei Nässe unter Berücksichtigung verschiedener Profiltiefen. Haus der Technik Tagung Wechselwirkung zwischen Fahrzeug und Fahrbahn, 1994
- [87] **Maulick**, Th.: Ein neues Verfahren zur Berechnung von Reifenkennfeldern. Dissertation, Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der TU Stuttgart, Band 17, 2001
- [88] **Mercedes-Benz**: Kompensation von MKMR-Signalen. Vorläufige Fassung, Juni 1996
- [89] **Mitschke**, M.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, Band B: Schwingungen. 2. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1984
- [90] **Moore**, D.F.: The friction and lubrication of elastomers. Pergamon Press, Oxfort, GB, 1972
- [91] **Nakkel**, E.: Straßenbestandserhaltung – weltweit wachsender Straßenverkehr – weltweiter Erfahrungsaustausch. 18. Weltstraßenkongreß (PIARC), Brüssel 1988, Bitumen, Heft 4, 1988
- [92] **NAVTECH**: Navigation Technologies, www.navtech.com/vehicle/adas_eu.html, 2001

Quellenverzeichnis

- [93] **Olms**, H.: Untersuchungen zu den Einflüssen auf Reifen-/Fahrbahngeräusche. Dissertation, Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 468, 2001
- [94] **Otte**, D.: Charakteristika von Unfällen auf Landstraßen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit, Heft M122, 2000
- [95] **Overhoff**, D.: Reifentechnologie I und II, Skript zur Vorlesung am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, 1998
- [96] **Pacejka** H.B.: MF-Tyre User Manual Version 4.3, Delft-Tyre, 1995
- [97] **Pacejka** H.B., Besselink, I.: Magic Formula Tyre Model with Transient Properties. Vehicle System Dynamics Supplement 27, 1997
- [98] **Persson**, B., N. J.: Sliding Friction – Physical Principles and Applications. Springer-Verlag, 1998
- [99] **Pohle**, G.; Vogt, K.; Beetz, L.; Glattki, W.; Fleisch, J.: Erarbeitung von Prüfverfahren für Griffigkeitsmessungen. Abschlussbericht zum Projekt 95 652, Bundesanstalt für Straßenwesen BASt, Außenstelle Inzell, 1999
- [100] **Reimpell**, J., Sponagel, P.: Fahrwerktechnik: Reifen und Räder, Vogel-Verlag, Würzburg, 1988
- [101] **Reuß**, W.: Griffigkeit von Asphaltdeckschichten. Asphaltstraßentagung 1995, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Heft 32, Köln 1995
- [102] **Roth**, J.: Untersuchungen zur Kraftübertragung zwischen Pkw-Reifen und Fahrbahn unter besonderer Berücksichtigung der Kraftschlusserkennung im rotierenden Rad. Dissertation, Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TH Darmstadt. VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 195, 1993
- [103] **Sabey**, B.E.: Anforderungen an die Oberflächenrauheit von Straßen mit schnellem Verkehr, Richtwerte an die Straßengriffigkeit, Schleudern bei Unfällen. Internationales Kolloquium über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, Berichte des Instituts für Straßen- und Verkehrswesen, Heft 2, Berlin 1968
- [104] **Schmidt**, B.; Gronskov, L.: Macrostructure – Laboratorie Experiment using SELCOM Profile Sensor Technology. The Danish Road Institute and Greenwood Engineering, Brøndby, 1995
- [105] **Schulze**, K.-H.: Einfluß der geometrischen Feingestalt der Straßenoberfläche auf den Kraftschluß. Straße und Autobahn, Heft 10, 1959

- [106] **Schulze, K.-H.:** Typen der Oberflächenfeingestalt und ihre Wirkung auf den Reibungswiderstand bei Nässe. Internationales Colloquium über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, Berlin 1968, Berichte des Instituts für Straßen- und Verkehrswesen Heft 2, 1970
- [107] **Schulze, K.-H.:** Untersuchungen über die Verkehrssicherheit bei Nässe. Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 185, BMV, 1975
- [108] **Schulze, K.-H.:** Griffigkeit und Rauheit. Handbuch des Straßenbaus, Band 1, Hrsg. Wehner, Schulze, Siedeck, Springer-Verlag, 1979
- [109] **Selcom:** User's Manual – Optocator Interface Module, Selcom AB, Partille Sweden, 1996
- [110] **Sluis, S.v.d.:** Abnahmewerte für die Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen. Schlussbericht Forschungsauftrag FE 04.182/1998/CGB i.A. Bundesministeriums für Verkehr, Institut für Straßenwesen der RWTH-Aachen, 1999
- [111] **Schniering, A.:** Messung und Bewertung der Griffigkeit. Haus der Technik Tagung Wechselwirkung zwischen Fahrzeug und Fahrbahn, 1996
- [112] **Spurk, J.H.:** Strömungslehre. Fachgebiet Technische Strömungslehre der TH Darmstadt, 2. Auflage, Springer-Verlag, 1989
- [113] **Statistische Bundesamt:** Verkehr. Fachserie 8, Reihe 7, Verkehrsunfälle, 1998
- [114] **Statistische Bundesamt:** Verkehr. Fachserie 8, Reihe 7, Verkehrsunfälle, 1999
- [115] **Staughton:** The effect of road tread pattern depth on skidding resistance. TRL-Report LR 332, 1970
- [116] **Strothjohann, Th., Breuer, B., Dollinger, F., Prenninger, M.:** Potentiale der Oberflächenwellen-Technologie für den Darmstädter Reifensensor. 3. Darmstädter Reifenkolloquium VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Nr. 437, 2000
- [117] **Stöcker, J.:** Untersuchung lokaler Vorgänge im Pkw-Reifen mittels integrierter Sensorik. Dissertation. Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TH Darmstadt, VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Nr. 343, 1997
- [118] **VERT Project Programme of Brite/EuRam Project BE-4306, Vehicle Road Tyre Interaction – Full Integrated and Physical Model for Handling Behaviour Prediction in Potentially Dangerous Situations, 1997**
- [119] **VTI:** RST Research Vehicle, Internet Seite www.vti.se/info/foresurs/edetalj.asp

Quellenverzeichnis

- [120] **Weber**, R.: Reifen auf Glatteis, eine experimentelle Untersuchung. Automobiltechnische Zeitung ATZ 74, Nr.1, 1972
- [121] **Wehner**, B.: Griffigkeitsmessungen auf Bundesbahnen im Land Hessen. TU Berlin, 1969
- [122] **Wiehler**, H.-G.: Straßenbau - Konstruktion und Ausführung. 3. Auflage, Verlag für Bauweisen Berlin, 1995
- [123] **Witte**, B., Zurbier, J.: Erfassung des Haftreibungswerts im fahrenden Fahrzeug und Messung von Reifenparametern bei verschiedenen Fahrbahnoberflächen. Reifen Fahrwerk Fahrbahn, VDI Berichte 1224, 1995
- [124] **Wohanka**, U.: Ermittlung von Reifenkennfeldern auf realen und definiert angenähten Fahrbahnen. Haus der Technik Tagung Wechselwirkung zwischen Fahrzeug und Fahrbahn, 1996
- [125] **Xie**, C.: Experimentelle Untersuchungen zur Interaktion zwischen Pkw-Reifen und Fahrbahn beim Bremsen. Dissertation, Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12, noch unveröffentlicht
- [126] **Zamow**, J.: Messung des Reifenverhaltens auf unterschiedlichen Prüfständen, Reifen Fahrwerk Fahrbahn, VDI Berichte 1224, 1995
- [127] **Zipkes**, E.: Leistungsvermögen von Belägen im Adhäsionsbereich. Straße und Verkehr, Heft 9/82, Zürich, 1982
- [128] **Zipkes**, E.: Über das Leistungsvermögen einer Straßenoberfläche und ihr Angebot im Adhäsionsbereich. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 2/83, 1983
- [129] **Zipkes**, E.: Griffigkeit-Bremsspur-Kraftübertragung, Institut für Straßen-, Eisenbahn- und Felsbau ETH Zürich, 1984
- [130] **Zipkes**, E.: Phänomen der wiederansteigenden Koeffizienten der Griffigkeit. Studie – Kraftübertragung bei hohen Geschwindigkeiten, Institut für Straßen-, Eisenbahn- und Felsbau ETH Zürich 1984

9.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einfluss von Fahrzeug, Reifen und Fahrbahn auf das Gesamtfahrzeugverhalten [19]	1
Abbildung 2: Unfallursachen [1]	2
Abbildung 3: Top-Down Ansatz der vorliegenden Arbeit.....	3
Abbildung 4: Reifen – Fahrbahn – Interaktion	4
Abbildung 5: Verlustwinkel und Module eines viskoelastischen Materials in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz [48, 90]	6
Abbildung 6: Gummireibungsmechanismen [82].....	7
Abbildung 7: Zusammenwirken der Hauptreibungsmechanismen [82]	9
Abbildung 8: Reibung bei Variation von Gummielastizität und Oberflächenzustand [98].....	9
Abbildung 9: Meisterkurve einer Laufstreifenmischung (Verlustwinkel aufgetragen über der Temperatur)[66]	11
Abbildung 10: Zusammenhang von Deformations- und Gleitschlupf [82]	12
Abbildung 11: Reibwert-Schlupf-Kurve.....	13
Abbildung 12: Einteilung der Fahrbahn und deren Eigenschaften nach [91].....	14
Abbildung 13: Einfluss der Oberflächentextur auf den Maximalreibungswert [128].....	15
Abbildung 14: Einfluss verschiedener Fahrbahndecken auf den Reibwert	16
Abbildung 15: Einfluss des Zwischenmediums [65]	17
Abbildung 16: Einfluss von Fahrbahnnässe und -oberfläche auf das Reibwertmaximum [5]	18
Abbildung 17: Einfluss der Temperatur auf den Reibwert in Längsrichtung [102]	19
Abbildung 18: Einfluss von Geschwindigkeit und Profiltiefe auf maximalen Querreibungswert [87].....	21
Abbildung 19: 3 Zonen Modell [100]	22
Abbildung 20: Einfluss der Profiltiefe auf den Reibwert in Längsrichtung [124].....	23
Abbildung 21: Einfluss von Radlast und Reifeninnendruck auf die maximale Längskraft in der Reifenaufstandsfläche [35]	25
Abbildung 22: Korrelation von Nassreibungswert (Rating) und Verlustfaktor [63].....	27

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 23: Einfluss der Reifenbreite auf die maximale Längskraft [38]	29
Abbildung 24: Einteilung der Reibwerterkennungssysteme nach [33]	32
Abbildung 25: Funktionsschema des Systems [55].....	33
Abbildung 26: Ablauf der Reibwerterkennung [123].....	34
Abbildung 27: Mikroschlupfkennfeld [30]	35
Abbildung 28: Reifendeformation im freirollenden und gebremsten Zustand [14]	36
Abbildung 29: Darmstädter Reifensensor 2. Generation [41]	37
Abbildung 30: x-Signal des Reifensensor 2. Generation bei Variation der Umfangskraft [40].....	38
Abbildung 31: Reibwertprognosesystem [33].....	39
Abbildung 32: TU Darmstadt Testgelände Griesheim	41
Abbildung 33: Eingesetzte Fahrzeuge	42
Abbildung 34: Schematischer Aufbau des Messsystems PETRA [7]	43
Abbildung 35: PETRA Messsystem.....	45
Abbildung 36: Lasersensoren zur Bestimmung des Sturzwinkels	46
Abbildung 37: Messtechnik Kofferraum AUDI V8	48
Abbildung 38: Messtechnik Innenraum AUDI V8.....	48
Abbildung 39: Aufbau der Kraftmessfelge [10].....	49
Abbildung 40: Signalverarbeitung.....	51
Abbildung 41: Überprüfung der berechneten Reibwert-Schlupf-Kurve	53
Abbildung 42: Topometrische Charakterisierung der Fahrbahnoberfläche [78].....	56
Abbildung 43: Prinzipskizze Lasertriangulation	57
Abbildung 44: Laser-Texturerfassungssystem	59
Abbildung 45: Reproduzierbarkeit der Texturmessungen.....	60
Abbildung 46: Vergleich der Lasersensorsignale in Abhängigkeit vom Oberflächenzustand	61
Abbildung 47: Bestimmung der MPD	64
Abbildung 48: Vergleich von Ausflusszeit und MPD	65
Abbildung 49: Topometrisches Rasterbild der Mikrotextrur	67
Abbildung 50: Texturschnitt A-B.....	68

Abbildung 51: Skid Resistance Tester (British Pendulum)	69
Abbildung 52: Zustandsgrößen von Fahrbahnen mit SRT und SCRIM nach [45].....	72
Abbildung 53: Vergleich von min / max / mittel SRT- und BFC-Werten.....	73
Abbildung 54: Definition von Wasserfilmdicke WT und –tiefe WD.....	75
Abbildung 55: Transmissionsgrad von Wasser in Abhängigkeit von der Lichtwellenlänge [5].....	77
Abbildung 56: Aufteilung des Lichtstrahls [5]	78
Abbildung 57: Absorptions- und Fahrbahnzustandserkennungssensor	79
Abbildung 58: Einfluss verschiedener Oberflächen auf das Sensorsignal.....	80
Abbildung 59: Reproduzierbarkeit der Wassertiefenmessungen	81
Abbildung 60: Korrigierte Signale bei verschiedenen Oberflächen	82
Abbildung 61: Einfluss verschiedener Oberflächen auf das Signal des FbZS.....	85
Abbildung 62: Reproduzierbarkeit der Wassertiefenmessungen mit FbZS.....	86
Abbildung 63: Korrigierte Signal bei verschiedenen Oberflächen	87
Abbildung 64: Vermessung der Wasserfilmdicke einer Teststrecke	88
Abbildung 65: Vergleich der Messsysteme	92
Abbildung 66: Einfluss der Makrotextur auf den Maximalreibungswert in Längsrichtung...	93
Abbildung 67: Einfluss der Mikrotextur (BFC ₂₀) auf den Maximalreibungswert in Längsrichtung.....	94
Abbildung 68: Einfluss der Makrotextur auf den Maximalreibungswert in Längsrichtung...	96
Abbildung 69: Einfluss der Mikrotextur auf den Maximalreibungswert in Längsrichtung bei 3mm Wasserfilmdicke	97
Abbildung 70: Normierte Darstellung der mittleren Vollverzögerung bei verschiedenen Bremsausgangsgeschwindigkeiten.....	99
Abbildung 71: Einfluss von Nässe und Fahrbahntextur auf den Maximalreibungswert.....	101
Abbildung 72: Einfluss von Wasserfilmdicke und Geschwindigkeit auf den Maximalreibungswert in Längsrichtung.....	102
Abbildung 73: Einfluss der Geschwindigkeit und der Mikrotextur auf den Maximalreibungswert in Längsrichtung auf trockener Fahrbahn.....	104
Abbildung 74: Normalkräfte im Reifenlatsch aufgrund Schräglauf [87]	105

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 75: Einfluss von Wasserfilmdicke und Geschwindigkeit auf die maximale Seitenkraft.....	105
Abbildung 76: Einfluss von Profiltiefe und Radlast auf den Maximalreibungswert in Längsrichtung [79].....	107
Abbildung 77: Einfluss der Profiltiefe auf den Maximalreibungswert in Querrichtung.....	108
Abbildung 78: Einfluss von Radlast und Fahrbahnzustand auf den Längsreibungswert.....	110
Abbildung 79: Einfluss von Radlast und Wasserfilmtiefe auf die maximale Seitenkraft ...	110
Abbildung 80: Beschreibung der Reifen-Fahrbahn-Interaktion mittels verschiedener Modelle.....	113
Abbildung 81: Eingangs- und Ausgangsgrößen des FPM.....	115
Abbildung 82: Schematischer Ablauf der Modellbildung.....	117
Abbildung 83: Einfluss von Profiltiefe und Radlast auf den Maximalreibungswert in Längsrichtung bei einer Wasserfilmdicke von 1mm	120
Abbildung 84: Einfluss von Wasserfilmtiefe und Makrotextur auf den berechneten Maximalreibungswert in Längsrichtung	121
Abbildung 85: Einfluss von Wasserfilmdicke und Geschwindigkeit auf den berechneten Maximalreibungswert in Längsrichtung	122
Abbildung 86: Vergleich von gemessenen und berechneten Reibwerten	123
Abbildung 87: Vergleich von gemessenen und berechneten Reibwerten	124
Abbildung 88: Vergleich von gemessenen und berechneten Reibwerten	124
Abbildung 89: Vergleich von gemessenen und berechneten Reibwerten [79].....	125
Abbildung 90: Vergleich von gemessenen und berechneten Reibwerten	126
Abbildung 91: Einfluss der Profiltiefe auf den berechneten Maximalreibungswert in Querrichtung.....	127
Abbildung 92: Vergleich von gemessenen und berechneten Reibwerten in Querrichtung	128
Abbildung 93: Vergleich von gemessenen und berechneten Reibwerten in Querrichtung	129
Abbildung 94: Prinzipielle Darstellung des fzd – Kontakttiefenmodells [4].....	130
Abbildung 95: Speicher- und Verlustmodul einer Sommermischung	131
Abbildung 96: Sinusförmige Anregung	132

Abbildung 97: Versuchsaufbau Hydropulser	133
Abbildung 98: Kraft-Weg-Diagramm bei Variation der Anregungsfrequenz	134
Abbildung 99: Texturschnitt im Reifenlatsch	136
Abbildung 100: Darstellung des Eindringverhaltens	137
Abbildung 101 : MCD und Maximalreibungswert aufgetragen über Geschwindigkeit.....	139
Abbildung 102: Korrelation von Maximalreibungswert und mittlerer Kontakttiefe.....	139
Abbildung 103: Korrelation von Maximalreibungswert und mittlerer Kontaktfläche.....	141
Abbildung 104: Auswirkungen einer Reibwertveränderung auf Kurvenradius und Bremsweg	144
Abbildung 105: Informationsfluss des Reibwertvorhersagesystems	146
Abbildung 106: Auswirkung eines Texturwechsels auf das Kraftschlusspotential [70]	148
Abbildung 107: Navigationsoberfläche	150
Abbildung 108: System Architektur [79].....	151
Abbildung 109: Sensorplatzierung und Abschirmung.....	152
Abbildung 110: Berechnungsablauf.....	153
Abbildung 111: Erprobung des FPS	154
Abbildung 112: Saisonale Unfallrate nach [113] und [114] und Verlauf des Reibwertepotentials	157

9.3 Betreute Studien- und Diplomarbeiten

- J. M. Nadal Lorenzo Einfluss verschiedener Parameter auf den Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn. Diplomarbeit am Fachgebiet Fahrzeugtechnik fzd, Nr. 300/98
- R. Compas Entwicklung eines Messsystems zur Charakterisierung der Fahrbahntextur. Studienarbeit am Fachgebiet Fahrzeugtechnik fzd, Nr. 741/98
- J. Tüting Entwicklung eines Messsystems zur Bestimmung der Wasserfilmhöhe. Studienarbeit am Fachgebiet Fahrzeugtechnik fzd, Nr. 745/98
- J. Listner Aufbau der Bremsmomentenregelung des Messanhängers PETRA II. Diplomarbeit am Fachgebiet Fahrzeugtechnik fzd, Nr. 306/98
- P. Strauß Aufbau der Bremsmomenten- und Schräglaufregelung des Messanhängers PETRA II. Diplomarbeit am Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik SLA, 1998
- A. Kämpel Ausrüstung eines Messfahrzeuges zur Charakterisierung des Fahrer-Fahrzeug-Verhaltens. Diplomarbeit am Fachgebiet Fahrzeugtechnik fzd, Nr. 307/98
- C. Landgraf Konstruktion einer Vorrichtung zur Variation des Schräglaufwinkels am Reifenmessanhänger PETRA. Konstruktive Studienarbeit am Fachgebiet Fahrzeugtechnik fzd, Nr. 753/98
- D. Agic Entwicklung eines semi-empirischen Reifenmodells zur Reibwertvorhersage. Diplomarbeit am Fachgebiet Fahrzeugtechnik fzd, Nr. 319/98
- M. Moskwa Konstruktive Neugestaltung des PETRA – Messsystems. Konstruktive Studienarbeit am Fachgebiet Fahrzeugtechnik fzd, Nr. 769/98
- M. Marks Konstruktion einer Vorrichtung zur Variation des Sturzwinkels an dem Reifenmessanhänger PETRA. Konstruktive Studienarbeit am Fachgebiet Fahrzeugtechnik fzd, Nr. 772/99

- J. Desfait Weiterentwicklung eines physikalischen Modells zur Beschreibung des Reifen – Fahrbahn – Kontakts. Praktikumsarbeit am Fachgebiet Fahrzeugtechnik fzd, 1999
- C. Popp Installation der Messsoftware am Messanhänger PETRA II. Diplomarbeit am Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik SLA, 1999
- M. Weber Aufbau einer GPS-gestützten Datenbank zur Archivierung von koordinatenbezogenen Fahrbahnkennwerten. Studienarbeit am Fachgebiet Fahrzeugtechnik fzd, Nr. 773/99
- F. Hofmann Konstruktion einer Vorrichtung zum Einsatz einer Radmessfelge an den Reifenmessanhängern PETRA I und PETRA II. Konstruktive Studienarbeit am Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik SLA, 1999
- V. Lepercq Entwicklung eines Modells für die Berücksichtigung verschiedener Reifenparameter in der Fahrdynamiksimulation auf nasser Fahrbahn. Diplomarbeit am Institut für Mechanik, 1999
- K. -F. Wong Konstruktion und Aufbau einer Kalibriereinrichtung zur Kalibrierung einer Radmessnabe. Konstruktive Studienarbeit am Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik SLA, 2000
- J. Tüting Aufbau eines Systems zur Reibwerterkennung zwischen Reifen und Fahrbahn in einem Pkw. Diplomarbeit am Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik SLA, 2000
- F. Rumpel Erprobung von Sensorik zur Messung der Wasserfilmdicke auf realen Fahrbahnen. Studienarbeit am Fachgebiet Fahrzeugtechnik fzd, Nr. 785/00
- K. Fraiss Charakterisierung von Fahrbahnoberflächen hinsichtlich ihres Einflusses auf den Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn. Studienarbeit am Fachgebiet Fahrzeugtechnik fzd, Nr. 786/00
- S. Huhn Weiterentwicklung und Erprobung des Reibwertvorhersagemodells. Studienarbeit am Fachgebiet Fahrzeugtechnik fzd, Nr. 787/00

Lebenslauf

- Frank Klempau
- Geboren am 19. Februar 1970 in Frankfurt / Main
- Verheiratet, eine Tochter

Ausbildung / Berufliche Tätigkeit

- 1979 – 1982 Grund- und Förderstufe der Ernst-Reuter-Schule in Groß Umstadt
- 1982 – 1986 Max-Planck-Gymnasium in Groß Umstadt
- 1986 – 1989 Berufliches Gymnasium der Landrat-Gruber-Schule in Dieburg mit dem Schwerpunkt Maschinenbau, Abschluss: Allgemeines Abitur
- 1989 – 1990 Grundwehrdienst in der Instandsetzung des 1. Panzer Artillerie Bataillon 55 in Homberg / Efze
- 1990 – 1997 Studium des Allgemeinen Maschinenbaus an der Technischen Hochschule Darmstadt, Abschluss: Diplom Ingenieur
- 1997 – 2001 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik *fzd* der TU Darmstadt bei Prof. Dr.-Ing. B. Breuer auf dem Gebiet der Reifen – Fahrbahn - Interaktion
- 2001 – 2002 Mitarbeiter der DaimlerChrysler AG in der Austauschgruppe / Wissenstransfer
- seit 2002 Mitarbeiter im Mercedes Technology Center MTC in Sindelfingen