

105

Karlsruher Schriftenreihe
 Fahrzeugsystemtechnik

Bernhard Schmiedel

**Indirekte Schätzung des
Fahrbahnässegrads zur
Detektion von gefährlichen
Fahrzuständen**



Scientific
Publishing

Bernhard Schmiedel

**Indirekte Schätzung des Fahrbahnässegrads zur
Detektion von gefährlichen Fahrzuständen**

**Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik
Band 105**

Herausgeber

FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

Prof. Dr.-Ing. Luise Kärger

Das Institut für Fahrzeugsystemtechnik besteht aus den Institutsteilen Bahnsystemtechnik, Fahrzeugtechnik, Leichtbau und Mobile Arbeitsmaschinen.

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

Indirekte Schätzung des Fahrbahnässegrads zur Detektion von gefährlichen Fahrzuständen

von
Bernhard Schmiedel

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Indirekte Schätzung des Fahrbahnässegrads zur
Detektion von gefährlichen Fahrzuständen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) genehmigte Dissertation
von Bernhard Schmiedel, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 27. September 2022
Erster Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin
Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Karl-Ludwig Haken

Impressum



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

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

www.ksp.kit.edu



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



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2023 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 1869-6058
ISBN 978-3-7315-1258-5
DOI 10.5445/KSP/1000152857

Indirekte Schätzung des Fahrbahn- nässegrads zur Detektion von gefähr- lichen Fahrzuständen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

bei der KIT-Fakultät für Maschinenbau
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Bernhard Schmiedel

Tag der mündlichen Prüfung: 27. September 2022

Erster Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Karl-Ludwig Haken

Kurzfassung

Durch Fahrbahnnässe reduziert sich das Kraftübertragungspotential zwischen Reifen und Fahrbahn gegenüber einer trockenen Fahrbahn. Daher kann eine Schätzung des Fahrbahnnässegrads Fahrer sowie Fahrzeug (für Fahrerassistenz und hochautomatisiertes Fahren) bei der Fahrzeugführung sinnvoll unterstützen. Die bisher auf dem Markt verfügbaren Systeme sind dazu, unter Berücksichtigung von massentauglichen Automobilbauanforderungen, nicht ausreichend geeignet.

In dieser Arbeit wird daher ein System entwickelt und untersucht, das den Fahrbahnnässegrad schätzen kann. Hierzu werden unterschiedliche Körperschallsensoren an bestimmten Karosserieteilen wie zum Beispiel der Radhausschale, Schweller und Unterboden befestigt.

Die Sensoren erfassen dabei die Wasseraufwirbelung der Reifen, welche in drei Hauptmechanismen unterteilt werden können: Tröpfchengischt, Schwallgisch und frontale sowie seitliche Verdrängung. Diese Mechanismen, welche am Prüfstand mittels Kamerasystem erfasst wurden, zeigen eine Abhängigkeit vom Fahrbahnnässegrad. Darüber hinaus gibt es überlagerte Einflüsse beispielsweise durch Fahrgeschwindigkeit und Reifenprofil.

Durch eine geeignete Signalverarbeitung mittels Bandpassfilter können die Rohdaten der Körperschallsensoren speziell zur Erfassung von Anregungen durch Wasserpartikel analysiert werden. Um aus den Anregungen auf eine absolute Wasserhöhe zu schließen, ist eine aufwendige Kalibrierung notwendig.

Abstract

Road wetness reduces the traction potential between tire and road. Hence, a road wetness quantification is useful for driver and vehicle (driver assistance and autonomous driving) to support a safe vehicle handling. Common systems that are available on the market by now are not sufficient in quality and/or large-scale automotive requirements.

Therefore, a system, which is capable of a road wetness quantification, is developed and investigated. The main components are different mechanical vibration sensors, which can be mounted on the wheel arch liner, side skirt or underbody.

The sensors detects splash and spray from the tires, which can be divided into three main effects: Circumferential spray, torrent spray and splash to the front and side of the tire. Camera-based investigations show that these effects are influenced by the level of road wetness. Furthermore, there are other influences overlaying such as vehicle speed and tire tread pattern.

By using a suitable signal processing like a band-pass filter it is possible to identify water particle excitation from the raw sensor signal. A complex calibration is required to measure an absolute water height.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	xv
Abkürzungsverzeichnis	xvii
Begriffsdefinitionen	xxi
Vorwort des Herausgebers	xxiii
Vorwort des Autors	xxv
1 Einleitung	1
2 Grundlagen des Reifen-Fahrbahn-Kontakts.....	3
2.1 Reibungsmechanismen	3
2.1.1 Adhäsion.....	4
2.1.2 Hysteresereibung	6
2.1.3 Viskose Reibung.....	7
2.2 Einflussparameter	8
2.2.1 Betriebsbedingungen	8
2.2.2 Zwischenmedium	13
2.2.3 Reifen	19
2.2.4 Fahrbahn.....	24
2.2.5 Fazit zum Reifen-Fahrbahn-Kontakt	28
3 Stand der Technik.....	29
3.1 Systeme zur effektbasierten Reibungsbeiwertschätzung	29
3.2 Systeme zur ursachenbasierten Reibungsbeiwertschätzung	41
3.3 Zusammenfassung der bekannten Systeme zur Reibungsbeiwertschätzung	49
4 Identifikation der Systemanforderungen	53

4.1	Unfallanalysen	53
4.2	Benötigte Auflösung der Fahrbahn­nässegrade	58
4.3	Berücksichtigung serienrelevanter Anforderungen	63
4.4	Zusammenfassung der Anforderungen und Ableitung eines geeigneten Systems.....	66
5	Wasseraufwirbelung des Reifens.....	69
5.1	Strömungsmechanische Betrachtung	69
5.2	Versuch.....	76
5.2.1	Bekannte Versuchsaufbauten	76
5.2.2	Bekannte Erkenntnisse und offene Fragen	79
5.2.3	Versuchsaufbau, Messplan und Messablauf.....	84
5.2.4	Auswertungsmethodik.....	91
5.3	Ergebnisse.....	96
5.3.1	Tröpfchengischt am Reifenumfang	96
5.3.2	Schwallgischt am Reifenlatschübergang	102
5.3.3	Frontale und seitliche Verdrängung	105
5.4	Zusammenfassung der Wasseraufwirbelungseffekte am Reifen ..	108
6	Sensorische Erfassung der Wasseraufwirbelung	111
6.1	Konzepte.....	111
6.2	Versuch.....	120
6.3	Signalanalyse.....	121
7	Validierung und Bewertung.....	137
7.1	Validierung	137
7.1.1	Validierung im Labor	137
7.1.2	Validierung auf dem Prüfgelände.....	145
7.1.3	Validierung auf öffentlicher Straße	155
7.2	Bewertung.....	157
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	161
	Literaturverzeichnis.....	163

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Adhäsion und Hysteresereibung nach [10].....	5
Abbildung 2.2:	Zusammenhang von Gleitschlupf und Deformationsschlupf nach [11].	10
Abbildung 2.3:	Reibungsbeiwert-Schlupf-Kurve nach [17]. Bis zum Reibungsbeiwertmaximum überwiegt Deformationsschlupf, nach dem Maximum überwiegt Gleitschlupf.	11
Abbildung 2.4:	μ -Schlupf-Kurve für unterschiedliche Zwischenmedien und Temperaturen [20].....	13
Abbildung 2.5:	Skizze unterschiedlicher Fahrbahnässegrade nach [22], jeweils links Ansicht von oben, rechts Ansicht im Profil. Trockene Fahrbahn (a), Fahrbahn mit geringen feuchten Stellen (b), Fahrbahn mit wenigen trockenen Stellen (c), durchgehend feuchte Fahrbahn (d), Fahrbahn mit Wasseransammlungen in den Vertiefungen der Oberfläche (e) und Fahrbahn mit geschlossenem Wasserfilm über den Rauigkeitsspitzen (f).	15
Abbildung 2.6:	Feuchteklassen nach [23].	16
Abbildung 2.7:	Horizontale Ansicht des aufschlagenden Reifenblocks und der seitlichen Wasserverdrängung [13].	17
Abbildung 2.8:	Schematische Wasserverdrängung durch den Reifen [13].	18
Abbildung 2.9:	Drei-Zonen-Modell nach [24].	19
Abbildung 2.10:	Druckverteilung im Latsch bei unterschiedlichen Reifenfüllluftdrücken [27].....	22
Abbildung 2.11:	Wasserführung im Latsch durch Profilierung nach [27, 28].	23
Abbildung 2.12:	Übersicht Fahrbahnstrukturen und Einflüsse [29].	25
Abbildung 2.13:	Einfluss der Fahrbahnstruktur auf den Reibungsbeiwert nach [32].	26

Abbildung 3.1:	Kamm'scher Kreis (schematisch).	32
Abbildung 3.2:	Normalisierte Längskraft über Schlupf Kurven bei unterschiedlichen Zustandsbedingungen [34].	34
Abbildung 3.3:	Darstellung der Seitenkraftübertragung F_y unter einem Schräglaufwinkel α mit dem Hebel dynamischer Reifennachlauf n_2 zur Seitenführungskraft F_α nach [36].	36
Abbildung 3.4:	Dynamischer Reifennachlauf n_2 über Schräglauf α bei verschiedenen Radlasten nach [37].	37
Abbildung 3.5:	Gough-Diagramm aus [39] nach [40].	38
Abbildung 3.6:	Zusammenhang von Seitenkraft F_y und Rückstellmoment MF_y entlang des Schräglaufwinkels α nach [38].	39
Abbildung 3.7:	Normalisierte Seitenkraft (links) und dynamischer Reifennachlauf (rechts) über Schräglauf bei verschiedenen Reibungsbeiwerten (vereinfachte Darstellung) [41].	40
Abbildung 3.8:	Übersicht über verschiedene Systeme zur Reibungsbeiwertschätzung	50
Abbildung 4.1:	83 Voraussichtliche Aquaplaninggefahrenstellen im Großraum Stuttgart aus [75]. Anhand der Einfärbung werden Abstände zu nächstgelegenen Gefahrenstellen markiert.	57
Abbildung 4.2:	Häufigkeitsverteilung gemessener Wasserhöhen durch Glättemeldeanlagen in Deutschland (ohne ganzzahlige Millimeter-Werte, Anmerkung im Fließtext).	59
Abbildung 4.3:	Schematische Darstellung Verbau MARWIS Sensor in Fahrzeugflotte. Die Längenangaben sind in cm angegeben.	60
Abbildung 4.4:	Häufigkeit von unterschiedlichen Wasserhöhen in Abhängigkeit vom Fahrbahnzustand in logarithmischer Darstellung. Unterschiedliche Schrittweiten bei den Wasserhöhen sind zu beachten!	61
Abbildung 4.5:	Globaler Reibungsbeiwert im Regeleingriff bei unterschiedlichen Wasserhöhen und Fahrbahnzuständen.	62

Abbildung 5.1:	Darstellung des Kontaktwinkels zwischen Gas, Flüssigkeit und Festkörper nach [84].	70
Abbildung 5.2:	Allgemeine Ablösemechanismen nach [19].	72
Abbildung 5.3:	Experimentell ermittelte Zusammenhänge zwischen Tropfenablösung, Zerstäubung und Lamellenablösung in Abhängigkeit verschiedener Kenngrößen nach [19].	73
Abbildung 5.4:	Aufprallmechanismen in Abhängigkeit von der Weber-Zahl nach [86].	74
Abbildung 5.5:	Lasermesstechnik Malvern [112] im Windkanal des FKFS [91].	77
Abbildung 5.6:	Reifenprüfstand mit zwei aufeinander abrollenden Reifen. Ausschnitt rechts oben: Reifen mit einer einzigen Profilirille nach [110].	78
Abbildung 5.7:	Ablöse-/Aufwirbelungsbereiche am Reifen nach [1 bis 3, 86, 103]. Blauer Bereich: Tröpfchengischt (vergleiche Kap. 5.3.1). Roter Bereich: Schwallgisch (vergleiche Kap. 5.3.2). Grüner Bereich: Totzone. Außerdem seitliche und frontale Verdrängung (vergleiche Kap. 5.3.3).	79
Abbildung 5.8:	Ablöseverhalten der Schwallgisch in Abhängigkeit von Geschwindigkeit (hier U) und Weber-Zahl (charakteristische Länge hier: Rillenbreite) nach [108], Prüfstand siehe Abbildung 5.6). Bewegung des Wassers von links nach rechts.	81
Abbildung 5.9:	Ablösung von Wasser aus einer Profilirille bei Abhebung des Reifens von der Fahrbahn nach [110] in der y - z -Ebene des Reifens.	82
Abbildung 5.10:	Innentrommelprüfstand mit Anbau für Kameras und Beleuchtung. Links: CAD-Zeichnung inklusive Sichtbereiche der einzelnen Kameras nach [1, 116]. Rechts: Bilder des realen Prüfstands. Kamerapositionen sind durch die farblichen Markierungen hervorgehoben (Action-Cams orange, gelb und violett, Hochgeschwindigkeitskamera hellblau).	86

Abbildung 5.11: Beispielaufnahmen der verschiedenen Kameras [1]. Die farblichen Umrandungen markieren die jeweilige Position, siehe Abbildung 5.10. 87

Abbildung 5.12: Messplan nach [116]. Mögliche Variationen von Wasserhöhe und Geschwindigkeit. Um die Variantenvielfalt einzugrenzen, werden nur grün hinterlegte Messpunkte untersucht..... 88

Abbildung 5.13: Genutzte Reifen [1]. Oben links: Michelin 20“ Winter neu (Mi20Wi_neu). Oben rechts: Michelin 20“ Winter verschlissen (Mi20Wi_worn). Unten links: Pirelli 20“ Sommer neu (Pi20So_neu). Unten rechts: Pirelli 20“ Sommer verschlissen (Pi20So_worn). 90

Abbildung 5.14: Tropfenerkennungsalgorithmus [1, 117]. Zwei lokale Extrema markieren die Zentren zweier naheliegender Tropfen (rote und blaue Quelle). Von dort werden schrittweise angrenzende Pixel überprüft und dem nächstgelegenen Zentrum zugeordnet 92

Abbildung 5.15: Ermittlung eines Skalierungsfaktors (sektorbezogen, rechts) zur Umrechnung von Pixelgröße zu realem Abstand mit Hilfe einer Messskala (links) [1, 116]. 93

Abbildung 5.16: Einteilung in Ablösewinkel im stabilisierten Bildbereich nach [1, 117]. 94

Abbildung 5.17: Tropfenerkennung mittels Bildverarbeitungsalgorithmik [1, 117]. Links: Rohbild. Rechts: Verarbeitetes Bild mit hervorgehobenen Tropfen. 95

Abbildung 5.18: Ablösepunkte entlang des (überspitzt dargestellten) Reifenprofils in y-Richtung [1]. Oben: Gesamtes Reifenprofil im Schnitt. Unten: Vergrößerter Ausschnitt. 97

Abbildung 5.19: Ablösepunkte entlang des Reifenprofils in y-Richtung am Prüfstand [1]. 98

Abbildung 5.20: Tropfengröße und –anzahl über Geschwindigkeit bei 2 mm Wasserhöhe und neuem Winterreifen unter 45° Abstrahlwinkel nach [1]. 99

- Abbildung 5.21: Auslösemechanismus der Schwallgischt bei kritischer Wassermenge [3]. Obere Zeile: Reifen noch auf der Fahrbahn. Untere Zeile: Reifen abgehoben. Links: Geringe Wassermenge, kein Einfluss auf Tröpfchengischt. Mitte: Mittlere Wassermenge, Steigerung der Tröpfchengischt. Rechts: Kritische Wassermenge, nach Ablösung verbleibt weniger Wasser am Reifen als im mittleren Fall und führt somit zur Verringerung der Tröpfchengischt. 103
- Abbildung 5.22: Turbulente Schwallgischt bei 1 mm Wasserhöhe und 80 km/h. Oben: Abgedrehter Winterreifen (interne Aufnahme erschöpft). Unten: Abgedrehter Sommerreifen (interne Aufnahme nicht erschöpft). 104
- Abbildung 5.23: Einfluss von Reifenluftdruck und Radlast auf die Schwallformation, neuer Sommerreifen bei 2 mm Wasserhöhe und 80 km/h [1]. Oben: 1,7 bar, 4800 N. Mitte: 2,2 bar, 4000 N. Unten: 2,7 bar, 3800 N. 105
- Abbildung 5.24: Frontale (rot) und seitliche (blau) Wasserverdrängung des Reifens. 106
- Abbildung 6.1: Verschiedene Sensortypen und Montagevarianten [2]. Oben (horizontale Linie): Beschleunigungssensoren Brüel & Kjær. Vertikale Linien (durchgezogen): Sensor auf Basis Piezo-Folie. Vertikale Linie (gestrichelt): Ultraschallsensor. 113
- Abbildung 6.2: Verdeckte (oben, ohne Loch) und offene (unten, mit Loch) Verbaue der Ultraschallsensoren auf der Radhausschale [49]. Die Sensormembran befindet sich jeweils zwischen den Befestigungsschrauben der Halterung. Es handelt hierbei nicht um die in Abbildung 6.1 gezeigte Radhausschale. 115
- Abbildung 6.3: Sensoranbindung und –positionierung am Schweller und Unterboden [2, 3]. Oben: Sensoranbindung mittels Kunststoffkleber an Schweller (links) und Unterboden (rechts). Unten: Schematische Darstellung der Positionen in

	Draufsicht. Sensoren: B&K Typ 4507 (rot) [120] und B&K Typ 4397 (blau) [119].	116
Abbildung 6.4:	Aufbauskizze des Kraftmesssystems [109].	118
Abbildung 6.5:	Sensorausgang des Kraftmesssystems. Lage der Pixel entspricht der Position auf der Messfolie, Höhe der Kraft ist über Farbe skaliert. Links: Messung mit zusätzlicher Radhausschalenverkleidung über Folie. Rechts: Messung mit direkter Wasserbeaufschlagung der Folie [109].	119
Abbildung 6.6:	Typischer Messtechnik-Aufbau im Kofferraum vorne (Porsche 911).	120
Abbildung 6.7:	Rohsignal der Beschleunigungssensoren auf der Radhausschale im Zeitbereich bei verschiedenen Geschwindigkeiten und abwechselnd nasser (gleicher Fahrbahnnässegrad) und trockener Fahrbahn.....	122
Abbildung 6.8:	Amplitudenspektrogramm der Beschleunigungssensoren auf der Radhausschale einer Messfahrt bei Übergang von trockener zu nasser Fahrbahn [2]. Horizontale Linien markieren den Bereich der optimalen Unterscheidbarkeit zwischen trocken und nass. Die Fahrgeschwindigkeit ist gestrichelt dargestellt.	124
Abbildung 6.9:	Mittels Überlappung kombinierte FFT mit verschiedenen Parametervariationen für Blocklänge und Überlappung.	129
Abbildung 6.10:	Normierte Differenz zwischen den FFT-Ergebnissen auf nasser und trockener Fahrbahn bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten (Michelin Winter neu) [2].....	131
Abbildung 6.11:	Mittelwerte der normierten Differenz über alle Geschwindigkeiten für verschiedene Reifen [2].	132
Abbildung 6.12:	Oben: Lage des optimalen Frequenzbands zur Unterscheidung zwischen trockener und nasser Fahrbahn bei Variation der Frequenzbandbreite des Filters. Unten: Normierte Differenz an der optimalen Frequenz bei Variation der Frequenzbandbreite des Filters.....	133

Abbildung 6.13: Exemplarische Filteraufbau für den Bandpass nach [125].	135
Abbildung 7.1: Innentrommelprüfstand mit Halterung der Radhausschale aus Aluminium-Profilen.	138
Abbildung 7.2: Einfluss der Wasserhöhe bei verschiedenen Geschwindigkeiten auf das Signal der Beschleunigungssensoren [2].	139
Abbildung 7.3: Einfluss der Fahrgeschwindigkeit bei verschiedenen Wasserhöhen auf das Signal eines Piezo-Folien-Sensors.	140
Abbildung 7.4: Einfluss der Geschwindigkeit bei verschiedenen Wasserhöhen und verschiedenen Reifen [2].	141
Abbildung 7.5: Einfluss der Sensorposition in y-Richtung über Geschwindigkeit [2, 3].	143
Abbildung 7.6: Einfluss der Sensorposition in z-Richtung über Geschwindigkeit [2, 3].	144
Abbildung 7.7: Einfluss von Sensorposition und Geschwindigkeit.	146
Abbildung 7.8: Umlenkung von Wasserströmungen im Radhaus unter Ausblendung der Wasseraufwirbelung des Reifens [129].	147
Abbildung 7.9: Wasserabscheider vor der Sensormembran.	148
Abbildung 7.10: Einfluss der Fahrgeschwindigkeit in linkem und rechtem Radhaus mit und ohne Anbau des Wasserabscheiders. ...	149
Abbildung 7.11: Einfluss von Wasserhöhe und Geschwindigkeit am Schweller (Position 7 in Abbildung 6.3) [3].	150
Abbildung 7.12: Einfluss der Geschwindigkeit an unterschiedlichen Sensorpositionen am Schweller bei nasser Fahrbahn [2, 3].	151
Abbildung 7.13: Einfluss des Lenkwinkels in Abhängigkeit der Position am Schweller.....	152
Abbildung 7.14: Einfluss von Fahrgeschwindigkeit und Fahrbahn­nässegrad am Unterboden Position 4 in der vorderen Reihe [3].	153

- Abbildung 7.15: Einfluss von Fahrgeschwindigkeit und Position bei nasser
Fahrbahn. Sensoren an Position 3 ohne Funktion [3]..... 154
- Abbildung 7.16: Vergleich bei normierten Signalwerten zwischen
Referenzsensor und neuem Sensor (Schweller Position 7,
nicht kalibriert) auf öffentlicher regennasser Straße [2].. 156

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1:	Auszug Unfallursachen mit Personenschaden außerorts [4].	54
Tabelle 5.1:	Restprofiltiefe der verschlissenen Reifen.	90
Tabelle 5.2:	Übersicht der Einflussparameter auf Tropfengröße und – anzahl (gültig unterhalb der maximalen Wasseraufnahmeschwelle) [1].	101
Tabelle 5.3:	Aufschwimgeschwindigkeiten verschiedener Reifen und Wasserhöhen sowie Beginn der seitlichen Wasserverdrängung [1].	107
Tabelle 6.1:	Beispielhafte Auflösungen im Zeit- und Frequenzbereich in Abhängigkeit der Abtastrate und Blocklänge.....	126

Abkürzungsverzeichnis

STFT	Short Time Fourier Transformation
FFT	Fast Fourier Transformation
F_R	Reibkraft
F_N	Normalkraft
μ	Reibungsbeiwert
$F_{Adhäsion}$	Adhäsionskraft
σ_{Schub}	Schubspannung
A	Kontaktfläche
s_B	Bremsschlupf
s_A	Antriebsschlupf
s_g	Gleitschlupf
s_d	Deformationsschlupf
v_{Fzg}	Fahrzeuggeschwindigkeit
v_R	Umfangsgeschwindigkeit des Rades
ω_R	Winkelgeschwindigkeit des Rads
R	Bezogen auf das Rad
R_{dyn}	Dynamischer Radhalbmesser

t	Zeit
K	Dimensionslose Kenngröße, die Geometrie und Oberfläche des Gummiblocks widerspiegelt
η	Dynamische Viskosität des Fluides
p	Druck
$A_{benetzt}$	Benetzungsfläche des Gummiblocks
h_{Anf}	Wasserhöhe auf Fahrbahn bei Beginn des Verdrängungsvorgangs
h_{End}	Wasserhöhe auf Fahrbahn bei Ende des Verdrängungsvorgangs
Q_R	Verdrängungsvolumen eines Reifens
v	Fahrgeschwindigkeit
b	Breite
h	Wasserhöhe
ρ	Dichte
t_v	Verweildauer eines Gummiblocks auf der Fahrbahnoberfläche
K_1	Längenverhältnis von Reifenlatsch zu Gummiblock
l_B	Länge eines Gummiblocks
v_{krit}	Kritische Aquaplaninggeschwindigkeit
p_R	Reifenfüllluftdruck
K_R	Reifenkennziffer

$Beta\ b$	Statistische Kenngröße der Rauigkeit
R_p	Profilkuppenhöhe
R_m	Profiltiefe
R_q	Quadratischer Mittenrauwert
R_t	Rautiefe
F_{xyR}	Übertragbare Kräfte in Längs- und Querrichtung am Reifen
F_{zR}	Radlast an einem Rad
F_{xR}	Längskraft an einem Rad
F_{yR}	Querkraft an einem Rad
F_x	Gesamte Längskraft am Fahrzeug
F_y	Gesamte Querkraft am Fahrzeug
F_z	Gesamte Radlast am Fahrzeug
a_x	Beschleunigung des Fahrzeugs in x-Richtung
a_y	Beschleunigung des Fahrzeugs in y-Richtung
g	Erdbeschleunigung
m	Masse des Fahrzeugs
μ_{glob}	Globaler Reibungsbeiwert
μ_v	Normalisierte Längskraft an der Vorderachse
μ_h	Normalisierte Längskraft an der Hinterachse

F_{x_v}	Längskräfte an der Vorderachse
F_{x_h}	Längskräfte an der Hinterachse
v	Bezogen auf die Vorderachse des Fahrzeugs
h	Bezogen auf die Hinterachse des Fahrzeugs
s	Schlupf
θ	Reibungs-Schätzwert-Parameter
M_{Rueck_R}	Rückstellmoment am Reifen
α	Schräglaufwinkel
n_1	Konstruktiver Reifennachlauf
n_2	Dynamischer Reifennachlauf
F_α	Seitenführungskraft
σ	Oberflächenspannung
We	Weberzahl
l	Charakteristische Länge
d_s	Scheibendurchmesser
Q_{zu}	Zugeführter Volumenstrom
E_{kin}	Kinetische Energie
β	Kontaktwinkel

Begriffsdefinitionen

Im Rahmen dieser Arbeit werden teilweise ähnliche Begriffe mit unterschiedlicher Bedeutung beziehungsweise unterschiedliche Begriffe mit ähnlicher oder gleicher Bedeutung benutzt. Daher werden folgende Begriffe für diese Arbeit definiert:

Fahrbahnnässe, Fahrbahnnässegrad und Wasserhöhe (auf der Fahrbahn):

Die Fahrbahnnässe wird allgemein für das Vorhandensein von Wasser auf einer Fahrbahn benutzt.

Der Fahrbahnnässegrad kann in Stufen oder Klassen (zum Beispiel: trocken, feucht, nass) angegeben sein und spiegelt besonders relative Unterschiede wider.

Die Wasserhöhe auf der Fahrbahn ist eine absolut messbare Größe. Die Definition variiert mit der verwendeten Messmethode.

Konzept, System:

Ein Konzept beschreibt für das Erreichen eines bestimmten Zwecks einen allgemeinen Lösungsweg, zum Beispiel die Nutzung eines bestimmten physikalischen Effekts. Das System ist eine konkrete Realisierung eines Konzepts und besteht aus mehreren Komponenten. Die Komponenten des Systems können Sensoren, aber auch Programmierlogiken und Weiteres sein.

Vorwort des Herausgebers

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

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

Nässe auf der Fahrbahn kann die Kraftübertragung zwischen Fahrzeug und Fahrbahn erheblich beeinträchtigen, was oftmals von Fahrern falsch eingeschätzt wird und jährlich zu einer erheblichen Anzahl von Unfällen mit Personenschaden führt. Es wäre daher wünschenswert, dem Fahrer eine zuverlässige Information über Nässe auf der Fahrbahn geben zu können. Ebenso wird diese Information von automatisierten Fahrzeugen zur Trajektorienplanung benötigt. Zwar gibt es viele Ansätze zur Schätzung des Reibbeiwerts von Reifen auf Fahrbahnen, allerdings nicht mit der nötigen Genauigkeit und Auflösung. Auch sind relevante Einflussgrößen nicht ausreichend gut bekannt.

Hier setzt die vorliegende Arbeit an, in der durch Spritzwasser verursachter Körperschall auf der Fahrzeugstruktur als Indikator für die Fahrbahnnässe genutzt wird. In umfangreichen experimentellen Untersuchungen werden die Einflüsse von Wasserhöhe, Fahrgeschwindigkeit, Reifenprofilgeometrie, Lenkwinkel und anderen Größen auf den Körperschall quantitativ ermittelt und Ansätze für ein großserientaugliches Nässedetektionssystem aufgezeigt.

Frank Gauterin

Karlsruhe, im Oktober 2022

Vorwort des Autors

Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit entstanden während meiner Zeit in der Fahrwerk Vorentwicklung der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG in Weissach bei Stuttgart. Der Stand der Technik bezieht sich auf den Zeitpunkt der Verfassung dieser Arbeit in ihrer Erstform.

Veröffentlichungen im Rahmen dieser Arbeit finden sich unter [1 bis 3].

Ich bedanke mich – in wertungsfreier Ordnung – bei allen Personen, Firmen und Institutionen, mit denen ich während der Erstellung dieser Arbeit in Kontakt stand.

Bei meinem Betreuer Professor Dr. rer. nat. Frank Gauterin und dem Gruppenleiter meiner Forschungsgruppe Herrn Dr.-Ing. Hans-Joachim Unrau bedanke ich mich für die Anleitung und Unterstützung der wissenschaftlichen Seite dieser Arbeit. Bei allen weiteren Mitarbeitern des Instituts, insbesondere bei Frau Rieke Kokege, bedanke ich mich für die freundliche Aufnahme und kollegiale Atmosphäre.

Bei Professor Dr.-Ing. Karl-Ludwig Haken bedanke ich mich für die gute Zusammenarbeit und Übernahme des Korreferats.

Bei meinem früheren Abteilungsleiter Herrn Martin Winkler und meinen Betreuern Herrn Stefan Jacobi und Herrn Dr.-Ing. Michael Unterreiner bedanke ich mich für die Gelegenheit der Verfassung und Inspiration während dieser Arbeit. Bei allen Mitarbeitern der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, insbesondere bei den Kollegen der Messtechnik und des Prüfgeländes, bedanke ich mich für einen intergalaktischen Zusammenhalt.

Meiner Familie danke ich für die nie endende, liebevolle und hingebungsvolle Unterstützung vor, während und nach der Erstellung dieser Arbeit.

Meinem Sohn und meiner Frau danke ich darüber hinaus für das Verständnis und den Freiraum, um diese Arbeit zu verfassen.

Ich widme diese Arbeit dem C-Kreis.

What a long, strange trip it's been.

Stuttgart, im Juli 2022

Bernhard Schmiedel

1 Einleitung

Fahrbahnässe ist und bleibt eine der wesentlichen Ursachen von witterungsbedingten Unfällen in Deutschland [4]. Das hauptsächliche Problem stellt hierbei die falsche Einschätzung des Fahrbahnzustands durch den Fahrer dar. Die Auswirkungen von Fahrbahnässe auf die Grenzen der Fahrstabilität sind abhängig von mehreren Faktoren und können deutlich streuen, was die Aufgabe für den Fahrer erschwert. So ist beispielsweise bei einer guten Bereifung, einer ausreichenden Fahrbahngriffigkeit und einem geringen Fahrbahnässegrad die Abnahme des Reibungsbeiwerts zwischen Reifen und Fahrbahn im alltäglichen Verkehr kaum spürbar. Die Gefahr entsteht dann, wenn sich entweder die witterungsbedingten Fahrbahn-Verhältnisse schlagartig ändern oder in einer Notsituation (zum Beispiel: Notbremsung oder Ausweichen) Fahrmanöver nicht wie erwartet umsetzen lassen. In diesen Fällen ist eine frühzeitige Sensibilisierung des Fahrers hilfreich. Da sich allgemeine Hinweise als nicht ausreichend erwiesen haben („The one thing that unites all human beings, regardless of age, gender, religion, economic status, or ethnic background, is that, deep down inside, we all believe that we are above-average drivers.“ [5] und [6]), bedarf es einer echtzeitfähigen Information des Fahrers, die ihm die Einschätzung des Fahrbahnzustands erleichtert.

Nicht nur der klassische, aktive Selbstfahrer bedarf dieser Information. Im Hinblick auf das autonome Fahren sind Fahrzeuge zukünftig in höchster Verantwortung für das Leben ihrer Insassen als auch aller anderen Verkehrsteilnehmer unterwegs. Sie benötigen damit zwangsläufig Kenntnisse über den witterungsbedingten Fahrbahnzustand, wobei der Fahrbahnässegrad eine zentrale Rolle einnehmen kann.

Diese Arbeit setzt sich daher mit der Entwicklung eines Systems zur Schätzung des Fahrbahnässegrads auseinander. Dafür werden zuerst die wichtigsten Grundlagen des Einflusses von Fahrbahnässe auf den Reibungsbeiwert zwischen Reifen und Fahrbahn (Kap. 2) erläutert sowie bekannte Lösungen zur

Fahrbahnzustandserkennung (Kap. 3) diskutiert. Da von den bekannten Konzepten bisher keins zu einer serienreifen Lösung entwickelt wurde, werden die Anforderungen an das zu entwickelnde System untersucht, um auf Basis dessen ein geeignetes Konzept abzuleiten (Kap. 4).

Dieses neue System basiert konzeptionell auf der sensorischen Erfassung von Wasseraufwirbelungen durch den Reifen. Daher werden Versuche zur Wasseraufwirbelung durchgeführt und ein Modell erstellt (Kap. 5). Im Folgenden wird die sensorische Erfassung, die durch Sensorwahl, Positionierung und Signalanalyse beeinflusst wird, diskutiert (Kap. 6). Abschließend werden die Erkenntnisse und Hypothesen aus diesen Kapiteln validiert und bewertet (Kap. 7).

Veröffentlichungen im Rahmen dieser Arbeit finden sich unter [1 bis 3].

2 Grundlagen des Reifen-Fahrbahn-Kontakts

Der Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn ist das zentrale Element zur Übertragung sämtlicher Kräfte zwischen Fahrzeug und Straße. Ohne ihn ist eine kontrollierte Fortbewegung für herkömmliche Landfahrzeuge ausgeschlossen. Der Reifen-Fahrbahn-Kontakt ist dabei durch eine Fülle von teils untereinander abhängigen Einflussparametern charakterisiert. Als Einstieg in dieses Thema werden daher die unterschiedlichen Grundlagen von Reibungsmechanismen zwischen Reifen und Fahrbahn diskutiert (Kapitel 2.1). Mit Hilfe dieser Reibungsmechanismen werden anschließend verschiedene Parameter erläutert, die Einfluss auf den Reifen-Fahrbahn-Kontakt haben (Kapitel 2.2). Da sich diese Arbeit mit der Erkennung und Auswirkung von Fahrbahnrisse beschäftigt, sollen hier ausschließlich damit im Zusammenhang stehende Parameter betrachtet werden. Eine umfanglichere Betrachtung zu allen Einflussparametern kann beispielsweise [7] entnommen werden.

2.1 Reibungsmechanismen

Grundsätzlich kann durch Reibung zwischen zwei Körpern eine Kraft parallel zur Kontaktfläche erzeugt werden. Diese Reibkraft F_R ist abhängig von zwei zentralen Größen, dem Reibungsbeiwert μ und der Anpresskraft beziehungsweise Normalkraft F_N . Im Falle zweier starrer Körper bezeichnet Gl. 2-1 die Coulomb'sche Reibung.

$$F_R = \mu * F_N \quad \text{Gl. 2-1}$$

Da es sich beim Reifen-Fahrbahn-Kontakt jedoch nicht um zwei starre Körper handelt, müssen für die Reibungsmechanismen zwischen Reifen und Fahrbahn andere Aspekte berücksichtigt werden. So ergeben sich oft nichtlineare Ab-

hängigkeiten von der genannten Normalkraft, der resultierenden Aufstandsfläche des Reifens und der Relativgeschwindigkeit zwischen den beiden Reibpartnern.

Die Normalkraft wird beim Reifen-Fahrbahn-Kontakt durch die Radlast erzeugt, mit der ein Reifen auf die Fahrbahn drückt. Die Radlast kann statisch und dynamisch variieren. Statische Radlaständerungen entstehen beispielsweise bei Beladung des Fahrzeugs (Personen und/oder Gepäck), dynamische Radlaständerungen hingegen beispielsweise bei Kurvenfahrt (Abstützung des Wankmoments in Richtung der kurvenäußeren Räder).

Der Reibungsbeiwert ist allgemein abhängig von den Materialien und Oberflächenstrukturen der beiden Reibpartner, der Relativgeschwindigkeit der Reibpartner zu einander sowie von gegebenenfalls vorhandenen Zwischenmedien. Typische maximale Reibungsbeiwerte bei PKW liegen im Bereich von 0,02 (sehr gering) bis 1,3 (sehr hoch). Auf trockener Straße wird in der Regel ein Wert nahe 1 erreicht.

Für den Reifen-Fahrbahn-Kontakt gibt es insgesamt fünf verschiedene Kraftübertragungsmechanismen, von denen im Folgenden die drei Hauptmechanismen Adhäsion, Hysteresereibung und viskose Reibung erläutert werden. Darüber hinaus existieren noch Kohäsion und Verzahnung. Bei der Kohäsion tritt die Kraftübertragung in Verbindung mit Verschleiß durch Herauslösen von Teilen aus dem Reifen auf. Dieser irreversible Prozess ist größentechnisch den Hauptmechanismen deutlich unterzuordnen [8]. Die Verzahnung beschreibt einen Formschluss zwischen Reifen und Fahrbahn, der an sich außerhalb der Coulomb'schen Reibung einzuordnen und ebenfalls den Hauptmechanismen unterzuordnen ist.

2.1.1 Adhäsion

Die Mechanismen der Adhäsion und Hysteresereibung gehen zurück auf ihre Entdeckung in den 60er Jahren durch [9 bis 11], siehe Abbildung 2.1. Die Adhäsion beschreibt hierbei eine Kraftübertragungskomponente durch Kräfte auf molekularer Ebene zwischen den Reibpartnern.

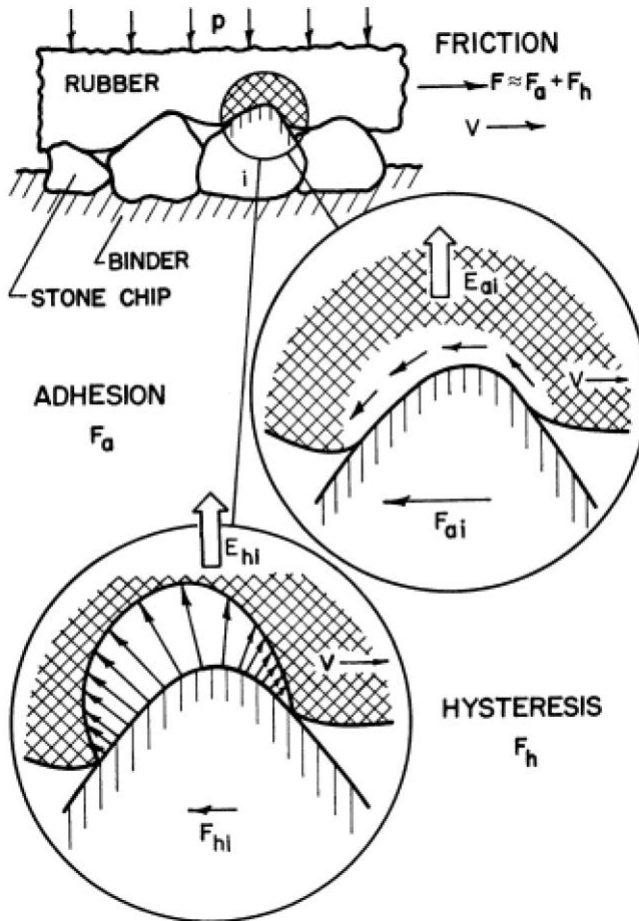


Abbildung 2.1: Adhäsion und Hysteresereibung nach [10].

Im Reifenlatsch verbinden sich Molekülketten beider Reibpartner. Beim Ablösen des Reifens von der Fahrbahn werden diese Molekülketten zuerst gedehnt und kehren nach Zerreißen der Verbindung wieder in ihre ursprüngliche

Lage zurück. Die Adhäsionskraft kann aus der Schubspannung σ_{Schub} zwischen den Reibpartnern und der Kontaktfläche A nach Gl. 2-2 berechnet werden (unter der vereinfachten Annahme, dass die Schubspannung σ_{Schub} in den einzelnen Kontaktflächen A_i identisch groß ist).

$$F_{Adhäsion} = \sigma_{Schub} * \sum_1^n A_i = \sigma_{Schub} * A \quad \text{Gl. 2-2 nach [11]}$$

Das Niveau der Adhäsionskraft ist dabei abhängig von der Anzahl und Stärke der Bindungen, sowie den Dämpfungseigenschaften des Laufstreifengummi [12]. Die Anzahl der Bindungen kann beispielsweise erhöht werden, indem die Berührungsfäche zwischen den Reibpartnern, in diesem Fall der Reifenlatsch, vergrößert wird. Dies wird zum Beispiel fahrbahnseitig durch eine höhere Rauheit der Fahrbahnoberfläche oder reifenseitig durch eine geringere Reifensteifigkeit, einen geringeren Reifenfüllluftdruck, eine höhere Radlast oder durch eine Reifenprofilierung mit höherem Positivanteil erreicht. Zwischenmedien wie Schmutz oder Wasser können die Adhäsion verringern, weshalb die maximale Adhäsionskraft auf saubereren Oberflächen erreicht wird. Bei trockener und sauberer Fahrbahn ist der Einfluss der Adhäsion gegenüber den anderen Mechanismen am stärksten ausgeprägt.

Die Haftung durch Adhäsion ist außerdem abhängig von der Lastfrequenz und am höchsten im Bereich zwischen 10^7 und 10^8 Hz [13].

2.1.2 Hysteresereibung

Die zweite Komponente, die Hysteresereibung, entsteht durch Verformungsarbeit des Reifengummi. Beim Kontakt des Reifens mit der Fahrbahn wird der Reifen durch die raue Oberfläche der Fahrbahn verformt. Dabei wird beim Ein- und Ausfedern ein Teil der Deformationsenergie als Dämpfungsverlust in Wärme umgewandelt und eine Kraft entgegen der Gleitbewegung erzeugt. Die Höhe der Deformationsleistung ist, entsprechend einer hysteresebefaheten Dämpfung, geschwindigkeitsabhängig. Mit steigender Gleitgeschwindigkeit erhöht sich auch die Deformationsleistung, da die Verformung des Reifens schneller stattfinden muss.

Hierbei ist auch die Druckverteilung in Längsrichtung der Kontaktfläche rollgeschwindigkeitsabhängig. Im Stillstand ist diese symmetrisch und bei zunehmenden Geschwindigkeiten wird sie asymmetrisch.

Neben der Geschwindigkeit gibt es weitere Einflüsse auf die Hysteresereibung. So nennt [11] die vertikale Belastung und die Rauigkeit der Oberfläche. Sofern die Rauigkeit der Oberfläche nicht zu stark kaschiert wird, haben Zwischenmedien einen untergeordneten Einfluss für die Hysteresereibung. Bei einer beispielsweise feuchten Fahrbahn nimmt somit die Hysteresereibung eine mindestens gleichbedeutende Rolle wie die Adhäsion ein.

Die Hysteresereibung ist ebenfalls wie die Adhäsion abhängig von der Lastfrequenz, jedoch in einem anderen Bereich (10^3 und 10^5 Hz) als die Adhäsion [13].

Weitere Details zu Adhäsion und Hysteresereibung können beispielsweise [14 bis 18] entnommen werden.

2.1.3 Viskose Reibung

Die viskose Reibung beschreibt die Kraftübertragung zwischen zwei Reibpartnern, die keinen direkten Kontakt zueinander haben, sondern lediglich über ein flüssiges Zwischenmedium verbunden sind. Die dabei übertragbaren Kräfte sind abhängig von der Scherspannung im Fluid. Bei einem Newton'schen Fluid wie Wasser ist die Scherspannung aufgrund der belastungsunabhängigen Viskosität proportional zur Schergeschwindigkeit [19]. Auch bei hohen Schergeschwindigkeiten werden im Vergleich zu Adhäsion und Hysteresereibung nur geringe Kräfte erreicht. Das Phänomen der reinen Kraftübertragung durch viskose Reibung ist im Automobilbereich auch unter dem Stichwort Aquaplaning bekannt, sofern es sich um Wasser als Zwischenmedium handelt.

2.2 Einflussparameter

Die Einflussparameter auf den Reifen-Fahrbahn-Kontakt können nach verschiedenen Kriterien unterteilt werden. Der hier gewählte Ansatz lässt sich durch eine Betrachtung des Systems Fahrzeug-Reifen-Fahrbahn veranschaulichen. An oberster Stelle ist das Fahrzeug mit seinen Betriebsbedingungen (Kap. 2.2.1). Auf der nächsten Ebene befindet sich der Reifen (Kap. 2.2.3), der sowohl mit dem Fahrzeug als auch der Fahrbahn (Kap. 2.2.4) in Verbindung steht. Diese Verbindung zwischen Reifen und Fahrbahn kann durch verschiedene Zwischenmedien (Kap. 2.2.2) beeinflusst werden.

2.2.1 Betriebsbedingungen

Die vorgestellten Betriebsbedingungen beschreiben den übergeordneten Einfluss des Fahrzeugs auf die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn.

Fahrzeuggeschwindigkeit

Die Fahrzeuggeschwindigkeit nimmt eine zentrale Rolle bei der Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn ein, da sie sowohl Reibungsmechanismen als auch Materialeigenschaften beeinflusst.

Beispielsweise beeinflusst die Fahrzeuggeschwindigkeit gemeinsam mit der Fahrbahnstruktur die Lastfrequenz. Bei einer hohen Geschwindigkeit kann der Reifengummi einer ausgeprägten Fahrbahnstruktur nicht mehr gänzlich folgen, weshalb die wirksame Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn und somit die Adhäsionskomponente abnimmt. Gleichzeitig steigt durch die erhöhte Geschwindigkeit die Aufprallenergie des Reifens, was zu einer Erhöhung der HystereseKomponente führt [18].

Im Allgemeinen überwiegt die Abnahme der Adhäsionskomponente, so dass eine Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit mit einer Abnahme des Reibungsbeiwerts verbunden ist. Auf trockener Fahrbahn ist dieser Effekt im Vergleich zu einer nassen Fahrbahn schwach ausgeprägt. Der Einfluss der Fahrzeuggeschwindigkeit auf nasser Fahrbahn wird in Kap. 2.2.2 aufgegriffen.

Schlupf

Schlupf bezeichnet die Relativbewegung zwischen Reifen und Fahrbahn und ist nach der Gummireibungstheorie von [9] notwendig, um überhaupt eine zur Oberfläche parallele Kraft zwischen den Reibpartnern zu ermöglichen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine Schlupfdefinition verwendet, die für die Fahrzustände Antreiben und Bremsen unterschiedliche Berechnungsformeln vorsieht. Bremschlupf s_B (Gl. 2-3) und Antriebsschlupf s_A (Gl. 2-4) unterscheiden sich hierbei nur in der Kombination der Variablen, welche ansonsten gleich bleiben. Die Umfangsgeschwindigkeit des Rades über Grund v_R wird hier durch den dynamische Radhalbmesser R_{dyn} und die Winkelgeschwindigkeit des Rades ω_R berechnet (Gl. 2-5).

$$s_B = \frac{v_{Fzg} - v_R}{v_{Fzg}} \quad \text{Gl. 2-3}$$

$$s_A = \frac{v_R - v_{Fzg}}{v_R} \quad \text{Gl. 2-4}$$

$$v_R = \omega_R * R_{dyn} \quad \text{Gl. 2-5}$$

Die Berechnung ist dabei so angepasst, dass der jeweilige Schlupf immer zwischen 0 % und 100 % liegen kann. Null Prozent bezeichnen ein freierrollendes Rad, das keine Längskräfte überträgt. Hundert Prozent können ein durchdrehendes Rad im Stillstand oder ein blockierendes Rad am bewegten Fahrzeug darstellen. In den beiden letztgenannten Fällen tritt reines Gleiten des Reifens auf.

Physikalisch setzt sich der Gesamtschlupf aus zwei verschiedenen Schlupfarten zusammen, dem Gleitschlupf s_g , welcher das Gleiten in der Kontaktfläche beschreibt, und dem Deformationsschlupf s_d , der durch eine Verformung des Reifens in der Kontaktfläche entsteht. Zwischen diesen beiden Schlupfarten existiert ein Zusammenhang, der Abbildung 2.2 entnommen werden kann.

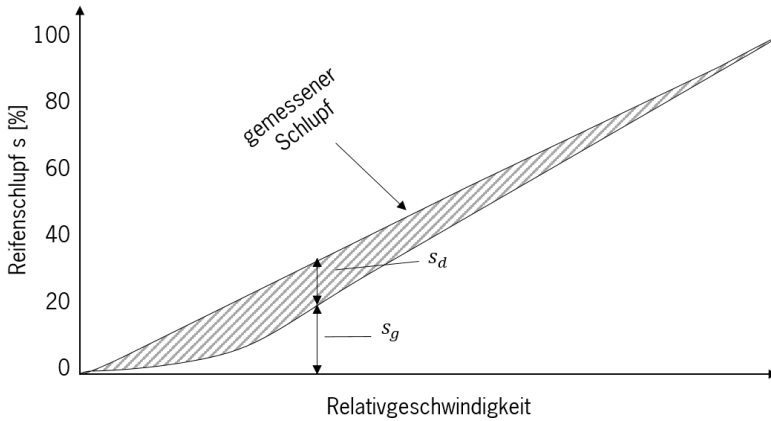


Abbildung 2.2: Zusammenhang von Gleitschlupf und Deformationsschlupf nach [11].

Erkennbar ist, dass bei geringen Relativgeschwindigkeiten der Anteil des Deformationsschlupfes überwiegt und mit zunehmenden Relativgeschwindigkeiten gegenüber dem ansteigenden Gleitschlupf abnimmt. Diese Abhängigkeit ist für den Zusammenhang zwischen dem Reibungsbeiwert und dem Schlupf hervorzuheben.

Abbildung 2.3 zeigt die Reibungsbeiwert-Schlupf-Kurve, auch bekannt als μ -Schlupf-Kurve.

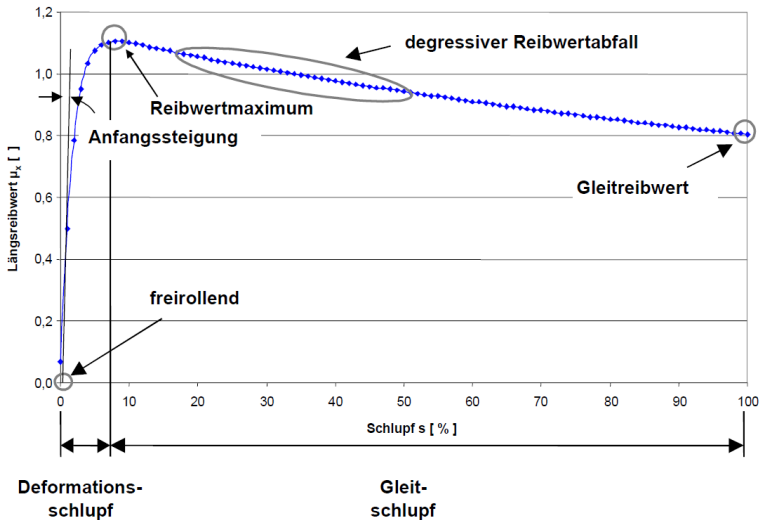


Abbildung 2.3: Reibungsbeiwert-Schlupf-Kurve nach [17]. Bis zum Reibungsbeiwertmaximum überwiegt Deformations-schlupf, nach dem Maximum überwiegt Gleit-schlupf.

Erkennbar ist der nahezu lineare Anstieg des Reibungsbeiwerts im unteren Schlupfsegment. Nach Erreichen des Reibungsbeiwertmaximums fällt der Reibungsbeiwert mit steigendem Schlupf wieder, bis er im Gleitreibungsbeiwert bei 100 % Schlupf mündet. μ -Schlupf-Kurven sind jeweils nur für einen bestimmten Systemzustand gültig. Anhand von μ -Schlupf-Kurven können die Einflüsse einzelner Einflussfaktoren (zum Beispiel: Zwischenmedium) auf den Reibungsbeiwert analysiert werden (siehe Abbildung 2.4).

Radlast

Die Radlast ist für die Anpresskraft des Reifens auf die Fahrbahn und somit für die absolut übertragbaren Reibungskräfte im Fahrzeug verantwortlich. Hieraus resultiert beispielsweise, dass Fahrzeuge mit sportlichem Charakter das Hauptantriebsmoment beim Beschleunigen an der Hinterachse absetzen. Bei einer Beschleunigung in Vorwärtsrichtung des Fahrzeugs kommt es zu einer

Radlastverschiebung Richtung Hinterachse, da die Antriebskräfte im Reifenlatsch übertragen werden und der höherliegende Fahrzeugschwerpunkt somit ein Moment um die y -Achse erfährt. Durch diese Radlasterhöhung an der Hinterachse können dort mehr Längskräfte für die weitere Beschleunigung des Fahrzeugs abgesetzt werden. Bei einer Verzögerung kehrt sich dieser Effekt um, was somit eine relative Radlastverschiebung Richtung Vorderachse hervorruft. Diese Effekte sind auch am Fahrzeugaufbau erkennbar, wenn dieser sich nach hinten (Beschleunigung nach vorne) oder vorne (Verzögerung, sogenanntes Bremsnicken) neigt. Durch die höheren Radlasten an der Vorderachse während eines Bremsvorgangs können dort mehr Kräfte abgesetzt werden, weshalb gängige Fahrzeuge mehr Bremskraftpotential an der Vorderachse als an der Hinterachse haben.

Entsprechend gibt es auch ein Verhalten bei Kurvenfahrt. Hierbei werden durch eine Radlastverschiebung die jeweils kurvenäußeren Räder stärker belastet. Dieser Effekt kann zur Agilisierung genutzt werden, indem beispielsweise über eine elektronische Quersperre das kurveninnere Rad abgebremst wird, umso mehr Moment an das kurvenäußere Rad zu verschieben.

Neben diesen grundlegenden Effekten gibt es durch eine Variation der Radlast auch einen Einfluss auf die Reifenaufstandsfläche. Steigt bei unverändertem Reifenfüllluftdruck die Radlast, wird der Reifen stärker auf die Fahrbahn geplättet und es entsteht eine größere Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn. Durch diese größere Kontaktfläche steigen ebenfalls der Anteil der Adhäsionskomponente und somit die übertragbaren Reibungskräfte.

Demgegenüber stehen jedoch reibungsbeiwertmindernde Effekte durch eine höhere lokale Flächenpressung, die durch eine inhomogene Flächenpressung mit vereinzelt Druckspitzen induziert wird [11]. Weitere Ausführungen zu diesem Phänomen finden sich in Kap. 2.2.3, bei Reifenprofilierung und Luftdruck.

Bei Fahrbahnnässe kann eine höhere Radlast zu einer besseren Durchdringung des Wasserfilms dienen, vergleiche Kap. 2.2.2.

2.2.2 Zwischenmedium

Befindet sich ein Zwischenmedium im Reifen-Fahrbahn-Kontakt, so kann dies die direkte Verbindung zwischen der Reifen- und Fahrbahnoberfläche einschränken. Ohne den direkten Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn wird die Adhäsionskomponente maßgeblich verringert.

Das am häufigsten auftretende Zwischenmedium Wasser ist in seinen beiden Aggregatzuständen flüssig und fest stark abhängig von der Witterung. Indirekt witterungsbedingt sind Verschmutzungen wie Sand oder Laub, die beispielsweise durch Wind auf die Fahrbahn geweht werden. Andere Zwischenmedien wie Öl sind hingegen witterungsunabhängig.

Im Falle von Eis und Schnee ist kein direkter Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn möglich, weshalb die übertragbaren Kräfte signifikant kleiner als auf trockener Straße sind, siehe Abbildung 2.4.

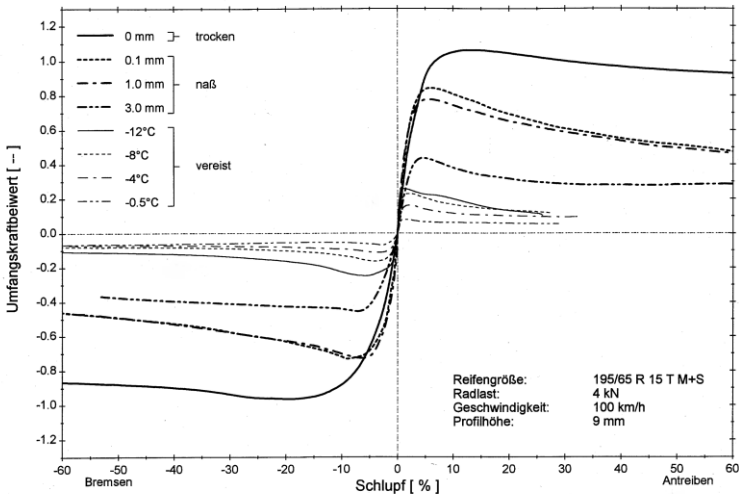


Abbildung 2.4: μ -Schlupf-Kurve für unterschiedliche Zwischenmedien und Temperaturen [20].

Des Weiteren ist zu erkennen, dass bei vereister Fahrbahn auch die Temperatur des Eisfilms einen Einfluss auf den Reibungsbeiwert hat. So werden absolute Tiefpunkte des Reibungsbeiwerts bei Temperaturen um den Gefrierpunkt erreicht, wohingegen bei niedrigeren Temperaturen der Reibungsbeiwert auf Eis wieder leicht zu steigen beginnt. Die Ursache hierfür ist, dass bei Temperaturen um die 0 °C durch die Reibungswärme (bedingt durch den Schlupf) ein Wasserfilm zwischen Eis und Reifen entsteht, der zu einem extremen Abfall des Reibungsbeiwerts führt, wohingegen bei tieferen Temperaturen dieses Anschmelzen der Eisoberfläche weniger ausgeprägt stattfindet. Im Falle von Schnee als Zwischenmedium (nicht dargestellt) ist bei höheren Bremsschlüpfen (größer 90 %) ein leichter Anstieg des Reibungsbeiwerts erkennbar. Dieses Phänomen ist auf die Ausbildung eines Schneeeisls zurückzuführen, an dem sich der Reifen abstützen kann.

Wie weiterhin aus Abbildung 2.4 zu entnehmen ist, ist bei flüssigem Wasser die Dicke der Wasserfilmschicht für den Reibungsbeiwert relevant. Die Ursache hierfür lässt sich mit Abbildung 2.5 veranschaulichen. Während bei trockener Fahrbahn alle oberen einzelnen Rauigkeitsspitzen im direkten Kontakt mit dem Laufstreifen des Reifens sind (a), wird mit zunehmender Wassermenge zuerst der Kontakt an einzelnen Punkten durch die Nässe unterbunden (b und c). Dort findet eine Abschwächung der Adhäsionskomponente statt. Ist die gesamte Fahrbahnoberfläche benetzt (d), ist - unter Vernachlässigung von Wischeffekten am Reifen, die in der Realität das Wasser von Rauigkeitsspitzen entfernen und so eine Adhäsion ermöglichen können - die Adhäsionskomponente gänzlich unterdrückt und es verbleibt nur die Hysterese Komponente. Die Hysterese Komponente kann noch so lange unverändert aufrechterhalten bleiben, wie der Reifen die Kontur der Rauigkeitsspitzen wahrnimmt (e). Steigt schließlich das Wasser so weit, dass alle Rauigkeitsspitzen verdeckt werden (f) und das überschüssige Wasser nicht im Reifenprofil aufgenommen werden kann, nimmt auch die Hysterese Komponente ab und es verbleibt nur noch die viskose Reibung. Nach einer früheren Schätzregel muss die Wasserhöhe dabei mindestens der Profiltiefe des Reifens entsprechen [21].

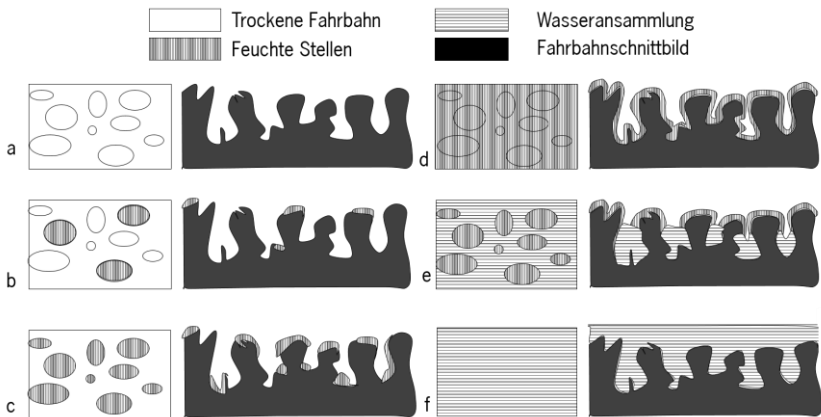


Abbildung 2.5: Skizze unterschiedlicher Fahrbahnnässegrade nach [22], jeweils links Ansicht von oben, rechts Ansicht im Profil. Trockene Fahrbahn (a), Fahrbahn mit geringen feuchten Stellen (b), Fahrbahn mit wenigen trockenen Stellen (c), durchgehend feuchte Fahrbahn (d), Fahrbahn mit Wasseransammlungen in den Vertiefungen der Oberfläche (e) und Fahrbahn mit geschlossenem Wasserfilm über den Rauigkeitsspitzen (f).

Die Wasserhöhe kann dabei in verschiedene Klassen eingeordnet werden, siehe Abbildung 2.6. Dabei ist zu beachten, dass es unterschiedliche Definitionen der Wasserhöhe gibt. Die Wasserhöhenmessung wird im Kap. 3.2 aufgegriffen, wenn Systeme zur Erkennung des Fahrbahnzustands erörtert werden.

Ausgelitertes Bezugsniveau

Eine fiktive Bezugsebene wird so über das Fahrbahnprofil gelegt, dass das Volumen durch Aussparungen unterhalb der Bezugsebene dem Volumen der Rauigkeitsspitzen oberhalb der Ebene entspricht.

Niederschlagsintensität und rechnerische Wasserhöhe

Diese Wasserhöhe wird in Anlehnung an den Niederschlag in mm angegeben und bezieht sich auf die Wassermenge auf einem Fahrbahnflächenabschnitt. Es handelt sich um einen fiktiven Wert, der die realen Bedingungen nur grob

wiederspiegelt, da beispielsweise Zu- und Abflüsse anderer Fahrbahnabschnitte oder der Abtransport durch Überrollung anderer Fahrzeuge nicht berücksichtigt wird.

Bezogene Wasserfilmdicke

Hierbei wird eine fiktive Platte auf die Rauigkeitsspitzen gelegt und deren Abstand zur Wasseroberfläche bestimmt. Somit können bei Feuchte auch negative Abstände auftreten, wenn nicht alle Rauigkeitsspitzen mit Wasser bedeckt sind.

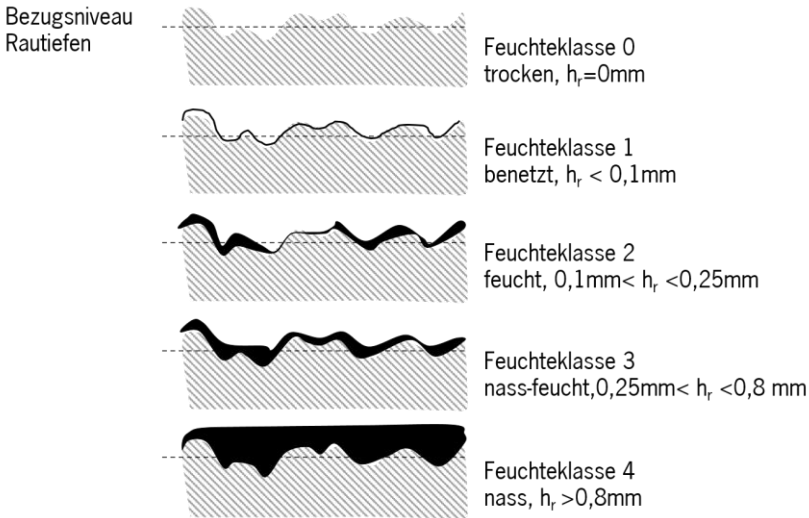


Abbildung 2.6: Feuchteklassen nach [23].

Die gezeigte Darstellung bezieht sich auf den Moment vor der Überrollung des Reifens. Während der Überrollung verdrängt der Reifen Wasser aus der Kontaktfläche. Dabei kann beim Aufprall des Reifens im Raum zwischen Reifen und Fahrbahn ein sehr dünner Wasserfilm bestehen bleiben, ähnlich zweier nasser Glasplatten, die aufeinander gedrückt werden, siehe Abbildung 2.7. Um diesen Restfilm von wenigen Mikrometern zu durchbrechen, nutzt der Reifen

hohe Druckspitzen an den Kanten der Profilblöcke sowie der Mikrorauigkeit des Straßenprofils, vergleiche Kap. 2.2.4. Dadurch kommt es zu einzelnen trockenen Kontaktstellen, an denen auch die Adhäsionskomponente wieder einen Beitrag zur Kraftübertragung liefern kann [13].

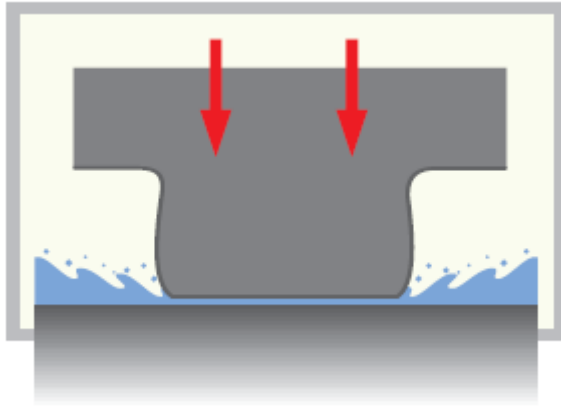


Abbildung 2.7: Horizontale Ansicht des aufschlagenden Reifenblocks und der seitlichen Wasserverdrängung [13].

Ist ein größerer Wasserfilm auf der Straße, muss dieser entsprechend anders vom Reifen verdrängt werden. Aus Abbildung 2.8 ist erkennbar, dass eine solche Wasserverdrängung sowohl zur Seite als auch in das Profil des Reifens hinein (Längs- und Querrillen sowie Lamellen) geschehen kann.

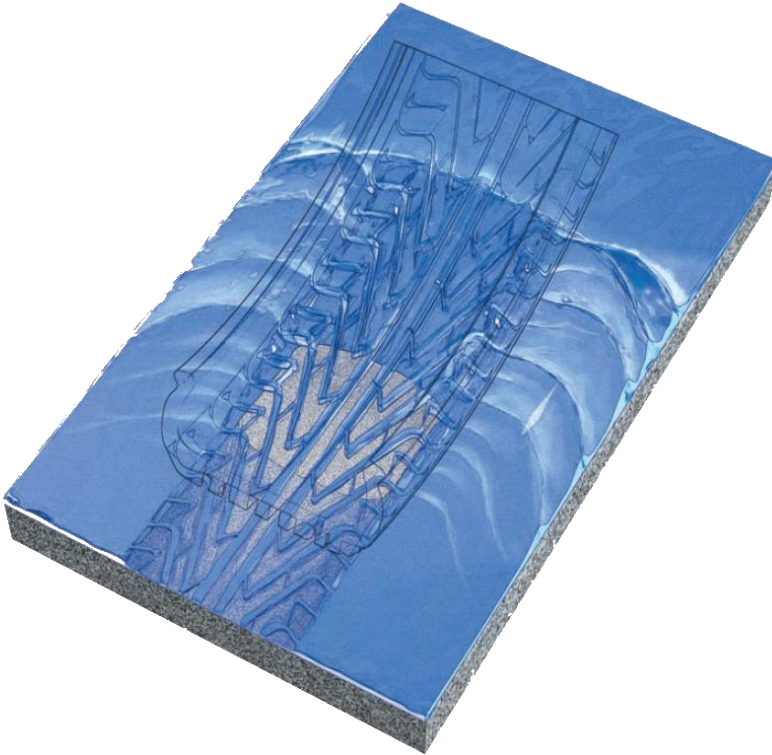


Abbildung 2.8: Schematische Wasserverdrängung durch den Reifen [13].

Der Reifen verdrängt in solchen Situationen das Wasser nicht beliebig schnell. Ob ein Reifen in Kontakt mit der Fahrbahn gelangt, hängt vom Gleichgewicht der zur Wasserverdrängung benötigten und verfügbaren Zeit ab. Dabei spielt neben Wasserhöhe und Fahrgeschwindigkeit der Reifen eine zentrale Rolle, vergleiche Kap. 2.2.3.

Für die Annäherung des Reifens an die Fahrbahnoberfläche kann das sogenannte Drei-Zonen-Modell nach [24] herangezogen werden, siehe Abbildung 2.9.

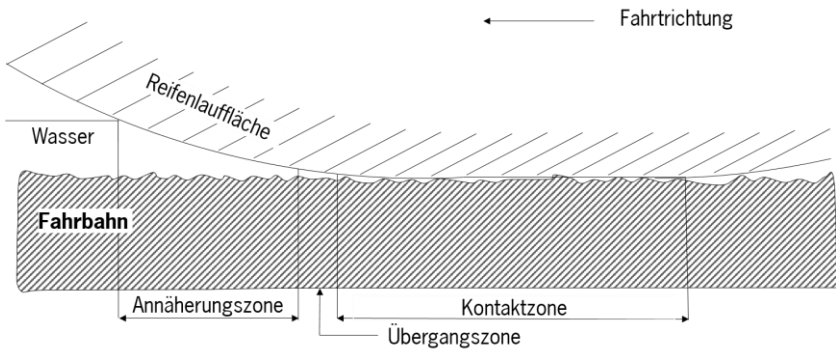


Abbildung 2.9: Drei-Zonen-Modell nach [24].

In der ersten Zone (Annäherungszone) beginnt die grobe Wasserverdrängung (Trägheit der Wassermasse entscheidend), jedoch gibt es noch keine Berührung zwischen Reifen und Fahrbahn. In der zweiten Zone (Übergangszone) wird der Restwasserfilm verdrängt (Viskosität des Wassers entscheidend) und in der dritten – optionalen – Zone (Kontaktzone) befindet sich der Reifen im Kontakt mit der Fahrbahn.

2.2.3 Reifen

Die verschiedenen Reifeneigenschaften werden im Folgenden primär in Bezug auf ihren Einfluss bei nasser Fahrbahn diskutiert.

Als grobe Annäherung für die Zeit, die ein Gummiblock zur Teilverdrängung eines Wasserfilms benötigt, findet sich Gl. 2-6 in der Literatur.

$$t_{\text{Verdrängung}} = K * \frac{\eta}{p} * \frac{A_{\text{benetzt}}}{h_{\text{End}}^2} * \left[1 - \left(\frac{h_{\text{End}}}{h_{\text{Anf}}} \right)^2 \right] \quad \text{Gl. 2-6 nach [13]}$$

K Dimensionslose Kenngröße, die Geometrie und Oberfläche des Gummiblocks widerspiegelt

η	Dynamische Viskosität des Fluides
p	Druck des Reifens auf den Wasserfilm
$A_{benetzt}$	Benetzungsfläche des Gummiblocks
h_{Anf}	Wasserhöhe auf Fahrbahn bei Beginn des Verdrängungsvorgangs
h_{End}	Wasserhöhe auf Fahrbahn bei Ende des Verdrängungsvorgangs

Diese Annäherung gilt offensichtlich nur, sofern eine Restwasserhöhe zwischen Gummiblock und Fahrbahn verbleibt. Der Einfluss der Anfangswasserhöhe ist so schwach, dass diese Annäherung nicht für beliebig hohe Anfangswasserhöhen gültig ist. Nichtsdestotrotz, lassen sich allgemeine Einflüsse auf die Wasserverdrängung ableiten. Neben der Wasserhöhe, die hier im Endwert quadratisch reziprok proportional eingeht, ist die zweite wichtige Variable die Fläche des Gummiblocks, welche sich in K und A wiederfindet. Je größer der Gummiblock, desto größer ist die Strecke, die ein Wasserpartikel vom Zentrum des Blocks bis an dessen Rand zurücklegen muss. Dies spiegelt sich auch im benötigten Verdrängungsvolumenstrom Q_R eines Reifens wider.

$$Q_R = v * b_R * h \quad \text{Gl. 2-7 nach [13]}$$

Die Breite des Reifens b_R geht, wie Fahrgeschwindigkeit v und Wasserhöhe h , linear ein. Breitere Reifen benötigen demnach einen höheren Verdrängungsvolumenstrom und haben somit ein schlechteres Aquaplaningverhalten.

Ebenfalls relevant für Gl. 2-6 ist der Druck des Reifens auf den Wasserfilm. Dieser kann mit dem Satz von Bernoulli für einen profillosen Reifen wie folgt angegeben werden:

$$p_{hydrodynamisch} = \frac{1}{2} * \rho_{Wasser} * v^2 \quad \text{Gl. 2-8 nach [13]}$$

Hierbei ist ρ_{Wasser} die Dichte des Wassers. Eine höhere Fahrgeschwindigkeit führt demnach zu einem größeren hydrodynamischen Druck, der die Verdrängung des Wassers unterstützt. Gleichzeitig verringert sich jedoch auch mit steigender Fahrgeschwindigkeit v die Verweildauer t_v eines Gummiblocks auf der Fahrbahnoberfläche.

$$t_v = K_1 * \frac{l_B}{v} \quad \text{Gl. 2-9 nach [13]}$$

t_v Verweildauer eines Gummiblocks auf der Fahrbahnoberfläche

K_1 Längenverhältnis von Reifenlatsch zu Gummiblock

l_B Länge eines Gummiblocks

Wird es während dieser Verweildauer nicht geschafft, den Wasserfilm nach Gl. 2-6 rechtzeitig zu verdrängen ($t_{Verdrängung} \geq t_v$), kann der Reifen nicht in Kontakt mit der Fahrbahnoberfläche kommen.

Durch einen Vergleich der Zeiten aus Gl. 2-6 und Gl. 2-9 kann für eine bestimmte Wasserverdrängung (z.B. von 10 μm auf 1 μm) und eine bestimmte Geschwindigkeit der sich im Eingriff befindliche Profilanteil prozentual in Abhängigkeit der Profilblockgröße bestimmt werden.

Experimentell wird nach [13] die kritische Aufschwimmgeschwindigkeit v_{krit} erreicht, wenn der hydrodynamische Wasserdruck $p_{hydrodynamisch}$ dem Reifenfüllluftdruck p_R entspricht:

$$v_{krit} = \sqrt{\frac{p_R}{K_R}} \quad \text{Gl. 2-10 nach [13]}$$

p_R Reifenfüllluftdruck

Auch dies ist als eine Annäherung zu betrachten, da die Wasserhöhe nicht berücksichtigt wird. Die hier neu verwendete Reifenkennziffer K_R lässt sich mit Gl. 2-8 und der Aussage, dass v_{krit} erreicht wird, wenn $p_{hydrodynamisch}$ und p_R identisch sind, für einen profillosen Reifen zu $0,5 * \rho_{Wasser}$ berechnen.

Laut Literatur können beispielsweise bei einem Hochleistungsreifen im Neuzustand Werte unterhalb 250 kg/m^3 erreicht werden, womit die kritische Aqua-planinggeschwindigkeit oberhalb von 100 km/h liegt [13].

Eine ähnliche Berechnung liefern Untersuchungen der NASA [25, 26], wo anstelle des variablen Parameters K_R ein fester Wert verwendet wird. Der Einfluss der Radlast wird dabei vermutlich nur unzureichend berücksichtigt.

Bei sehr niedrigen Reifenfüllluftdrücken entsteht ein zusätzliches, das Aqua-planing unterstützendes Phänomen. Aufgrund von zu geringem Reifenfüllluftdruck tragen die Reifenflanken durch ihre Steifigkeit einen Großteil der Last. Im Latsch kommt es zu einer Einwölbung des Reifens in Latschmitte. Dort vorhandenes Wasser kann deutlich schlechter abgeleitet werden, siehe Abbildung 2.10 rechts. Gleichzeitig können die damit überproportional stark belasteten Flanken den Wasserfilm lokal durchbrechen und somit teilweise einen Kontakt zur Fahrbahn gewährleisten.

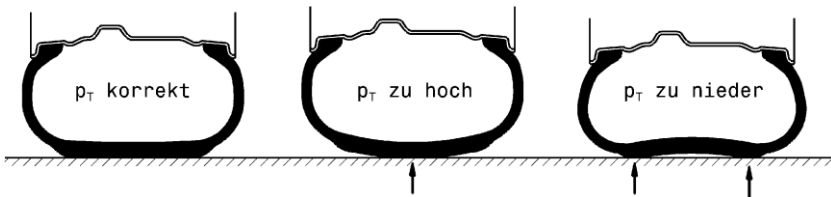


Abbildung 2.10: Druckverteilung im Latsch bei unterschiedlichen Reifenfüllluftdrücken [27].

Für die Wasserverdrängung des Reifens ist darüber hinaus die Gestaltung des Profils wichtig. Durch eine geschickte Kombination von Umfangsrillen (Breite 8-10 mm) und Querrillen (Breite 2-7 mm) [13] wird dabei das Wasser aus der Aufstandsfläche nicht nur quer bis zur Seite des Reifenlatsches geleitet, sondern kann auch in Längsrichtung direkt im Latsch zwischen einzelnen Profilblöcken hindurchgeleitet werden, siehe Abbildung 2.11. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Verdrängung von Wasser durch diese Kanäle als interne Aufnahme bezeichnet.

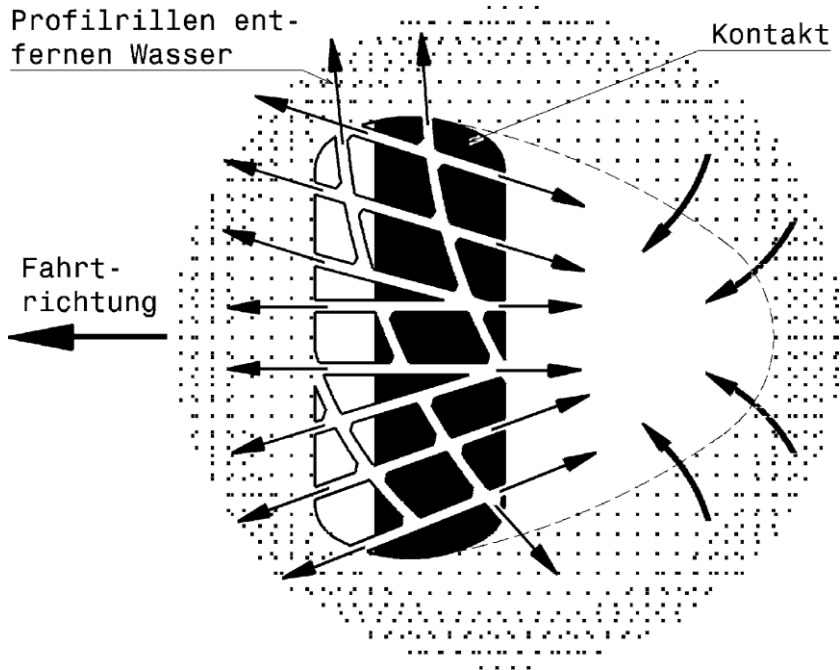


Abbildung 2.11: Wasserführung im Latsch durch Profilierung nach [27, 28].

Die Wasserführung kann dabei noch durch Lamellen unterstützt werden. Diese deutlich schmalere Schlitz (Breite 0,3-1,5 mm) übernehmen dabei zusätzlich zur Drainage durch lokale Druckspitzen einen positiven Anteil zum Durchbrechen des Wasserfilms und somit zum Nassgriff des Reifens [13].

Beim Einsatz von Reifenprofilen muss dabei immer berücksichtigt werden, dass ein zu hoher Grad an Profilierung dem Reibungsbeiwertpotential auf trockener Fahrbahn entgegenwirken kann. So ist beispielsweise bei einem sehr großen Negativanteil die reale Aufstandsfläche deutlich kleiner als bei einem Reifen ohne Profil. Dies führt zu einer Schwächung der Adhäsionskomponente.

Durch eine feinadrigte Profilierung wird zudem auch die Umfangssteifigkeit verringert, was bei trockener Fahrbahn die übertragbaren Längskräfte einschränken kann. Dies kann auch durch eine zu große Profiltiefe geschehen, da hierbei die längeren Profilblöcke weiter verkippen können. Im Umkehrschluss kann auf trockener Fahrbahn ein abgefahrener Reifen an Längskraft gewinnen.

Allgemein sollte jedoch bei abgefahrenen beziehungsweise älteren Reifen darauf geachtet werden, dass neben einer gewissen Mindestprofiltiefe auch der Reifengummi durch Alterung nicht zu sehr versprödet ist.

Die Gummimischung eines Reifens deckt vornehmlich die Steifigkeit und Dämpfung bei verschiedenen Temperaturen ab, um optimale Griffigkeit zu ermöglichen.

2.2.4 Fahrbahn

Beim Reifen-Fahrbahn-Kontakt ist die Fahrbahn gleichwertiger Reibungspartner mit dem Reifen. Neben einer grundsätzlichen Klassifizierung wie beispielsweise Asphalt, Beton, Kopfsteinpflaster, Schotter oder Sand kann eine Fahrbahn durch ihre Struktur oder Referenzmesswerte charakterisiert werden. Dabei ist der Einfluss der Fahrbahnstruktur auf den Reibungsbeiwert in der Regel größer als der des Fahrbahnmaterials.

Die Struktur, in der Literatur oft auch als Textur bezeichnet, lässt sich in Mikro-, Makro- und Megastruktur unterteilen, siehe Abbildung 2.12. Diese Struktur bezieht sich auf die Deckschicht, die oberste Schicht der Fahrbahn, die direkt mit dem Reifen in Kontakt steht. Die verschiedenen Strukturanteile haben unterschiedliche Aufgaben. Hinweis: Die Mikrotextrur hat, gegensätzlich zur Darstellung, auch einen Einfluss auf das Geräusch.

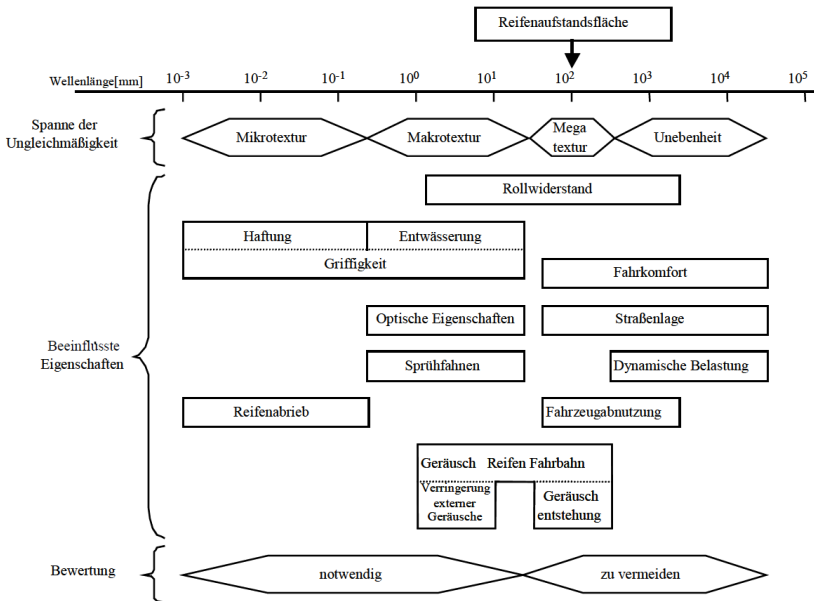


Abbildung 2.12: Übersicht Fahrbahnstrukturen und Einflüsse [29].

Die Mikrostruktur (Wellenlänge $< 0,5$ mm) ist maßgeblich für die Griffigkeit eines Reifens verantwortlich. Durch eine im Mikro- und Submikrometer-Bereich zerklüftete Oberfläche wird die Kontaktfläche und somit die Adhäsion vergrößert. Zusätzlich kann bei einer entsprechend kantigen Gestaltung dem Reifen Halt durch Formschluss gegeben werden (Abbildung 2.13, scharfe Mikrostruktur). Abgenutzte Fahrbahnen weisen hingegen häufig abgerundete Kuppen auf, bei denen der erreichbare Reibungsbeiwert geringer ausfällt (Abbildung 2.13, polierte Mikrostruktur). Durch die Rauigkeitsspitzen kann auf einer feuchten oder nassen Fahrbahn durch lokale Druckspitzen der Wasserfilm leichter vom Reifen durchbrochen werden und somit Kontakt mit der Fahrbahn hergestellt werden. Bei geringen Geschwindigkeiten ist die Mikrostruktur maßgeblich für die gesamte Kraftübertragung verantwortlich. Schwankende Mikrorauigkeiten sind ausschlaggebend für die stark streuenden Reibungsbeiwerte auf feuchten und leicht nassen Fahrbahnen [13, 24, 30, 31].

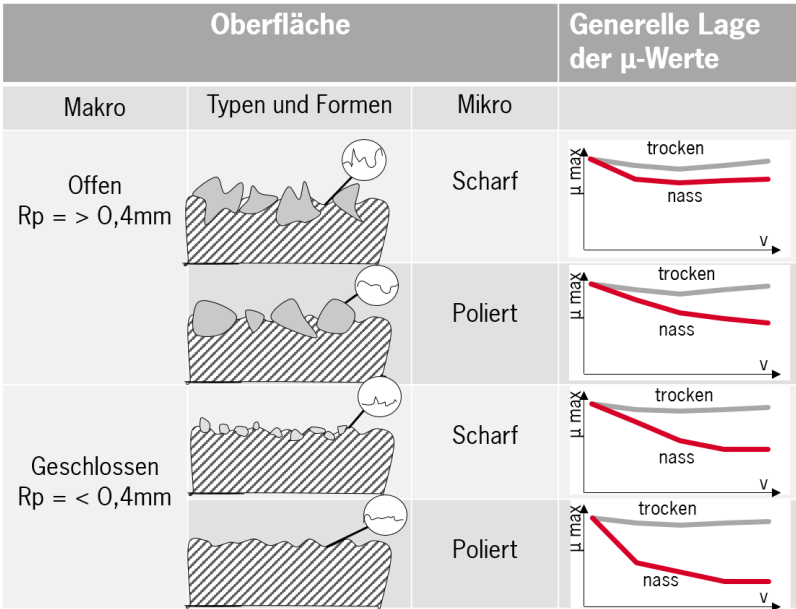


Abbildung 2.13: Einfluss der Fahrbahnstruktur auf den Reibungsbeiwert nach [32].

Die Makrostruktur (Wellenlänge 0,5 mm-50 mm) ist für die lokale Drainage der Fahrbahn sowie die Hysteresekomponente relevant. Offene Poren erlauben dem Wasser zu versickern. Gleichzeitig führt eine große Offenporigkeit zu einem deutlich höheren Verschleiß der Fahrbahn, da einzelne Stege einer höheren Belastung ausgesetzt sind. Die geschwindigkeitsabhängige Hysteresekomponente wird durch große Makrorauigkeiten begünstigt. So ist bei nassen und sehr nassen Fahrbahnen und insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten die Makrorauigkeit hauptverantwortlich für die Kraftübertragung [33].

Bei der Kombination von niedriger Mikro- und Makrorauigkeit (Abbildung 2.13, Zeile 4), wie beispielsweise bei Kopfsteinpflaster, sinkt der Reibungsbeiwert insbesondere bei Nässe signifikant, unabhängig von der Wasserhöhe.

Die aus Abbildung 2.12 verbleibenden Kategorien Megastruktur (50 mm-500 mm) und Unebenheiten beinhalten unter anderem die globale Drainage (Abführung des Wassers zum Fahrbahnrand), Neigungen, Senken und Straßenschäden wie Spurrillen oder Schlaglöcher [23]. Die häufigsten Aquaplaning-Unfälle in Verbindung mit Fahrbahnursachen passieren in dieser Kategorie. So ist bei einem Neigungswechsel der Fahrbahn, der häufig bei Kurvenübergängen zu finden ist, bei entsprechender Wetterlage mit einem die Fahrbahn kreuzenden Wasserstrom zu rechnen. In Senken kann es durch unterdimensionierte Kanalisationen zu stehendem Wasser kommen und in Schlaglöchern sowie Spurrillen kann sich Wasser lokal sammeln, ohne von dort aus abfließen zu können.

Neben den erwähnten Strukturkomponenten gibt es Referenzmesswerte, die eine Fahrbahn in ihren Eigenschaften für den Reifen-Fahrbahn-Kontakt beschreiben sollen. Auszugsweise hier zu nennen sind dazu SRT, SRM, Profilkuppendichte D, Profiltraganteil PT und die Kenngröße Beta b. Der Profiltraganteil PT beschreibt beispielsweise die effektive Berührfläche des Profils mit dem Reifen, die in der Regel deutlich kleiner als die von außen angenommene Latschfläche ist.

Bezeichnung	Bedeutung
SRT (Skid Resistance Tester)	Griffigkeit mit Fokus auf Mikrorauigkeit
SRM (Stuttgarter Reibungsmesser)	Griffigkeit mit Fokus auf Makrorauigkeit
Profilkuppendichte D (Oberflächenkenngröße nach DIN)	Anzahl Profilkuppen pro mm Messstrecke (Verbreitung der Rauigkeit)
PT (Profiltraganteil)	Effektive Berührfläche des Profils
Beta b	Statistische Kenngröße der Rauigkeit

$$Beta\ b = \frac{R_p * (R_m * R_p * R_q^2)}{R_t * R_q^2} \quad \text{Gl. 2-11}$$

 R_p

Profilkuppenhöhe

R_m	Profiltiefe
R_q	Quadratischer Mittenrauwert
R_t	Rautiefe

Nähere Informationen hierzu finden sich unter anderem in [8, 24, 30, 31, 33].

2.2.5 Fazit zum Reifen-Fahrbahn-Kontakt

Für die folgenden Betrachtungen in dieser Arbeit wird für den Reifen-Fahrbahn-Kontakt und den daraus resultierenden maximal verfügbaren Reibungsbeiwert festgehalten:

- Es gibt viele Einflussparameter der Fahrbahn, des Reifens und des Zwischenmediums, von denen nicht alle während der Fahrt messbar sind (beispielsweise Profiltiefe des Reifens).
- Es gibt für die meisten Einflussparameter, insbesondere Reifeneigenschaften, keinen monotonen Einfluss, sondern häufig lokale Optima in Abhängigkeit der anderen Parameter (beispielsweise Reifenbreite, Profil-Geometrie, Luftdruck).
- Im Allgemeinen gilt, dass eine Zunahme des Fahrbahnneigungsgrads oder eine Zunahme der Fahrgeschwindigkeit bei Fahrbahnneigung zu einer Abnahme des Reibungsbeiwerts führt.

3 Stand der Technik

Es sind nach heutigem Stand keine serienmäßig verbauten Systeme bekannt, die in der Lage sind, den Reibungsbeiwert zwischen Reifen und Fahrbahn oder den witterungsbedingten Fahrbahnzustand kontinuierlich zu messen oder mit hoher Genauigkeit zu schätzen. Die Forschung und Entwicklung solcher Systeme beschäftigt jedoch die Wissenschaft bereits seit mehreren Jahrzehnten. Häufig scheiterten neue Ansätze entweder an der Präzisionsgüte, der zeitlichen Verfügbarkeit oder an den Kosten. In diesem Kapitel findet sich eine Übersicht ausgewählter Systeme und Verfahren, sowie deren Vor- und Nachteile.

Eine zunehmend gängigere Einteilung kann in effektbasierte und ursachenbasierte Ansätze erfolgen. Effektbasierte Ansätze beschäftigen sich mit dem Schätzen oder Messen von Effekten (wie beispielsweise die erreichbare Beschleunigung), die aus dem Reifen-Fahrbahn-Kontakt entstehen und basieren meist auf physikalischen Modellen, vergleiche Kap. 3.1. Dem gegenüber gestellt sind ursachenbasierte Ansätze, die anstelle einer effektbasierten Reibungsbeiwertschätzung versuchen, indirekt die Ursachen für den vorhandenen Reibungsbeiwert zu schätzen, vergleiche Kap. 3.2. Ein Beispiel hierfür wäre die Schätzung des witterungsbedingten Fahrbahnzustands.

3.1 Systeme zur effektbasierten Reibungsbeiwertschätzung

Effektbasierte Ansätze zeichnen sich dadurch aus, dass sie auf physikalischen Modellen beruhen, die meist einen hohen Grad an Komplexität aufweisen. Vorteil ist häufig, dass mit einem vorhandenen Modell der Reibungsbeiwert wirklich gemessen oder zumindest mit hoher Präzisionsgüte geschätzt werden kann und nicht unbedingt alle Einflussparameter bekannt sein müssen. Hierfür kann es jedoch notwendig sein, dass zusätzliche Eingangsgrößen benötigt werden. Da effektbasierte Ansätze auf einer Kraftübertragung beruhen, wird die

Schätzung im (nahezu) kraftfreien Zustand erschwert, was die mögliche Verfügbarkeit verringern kann.

Erreichbare Beschleunigung

Der Reibungsbeiwert ist definiert als das Verhältnis aus Reibungskraft zu Normalkraft, siehe auch Gl. 2-1.

$$\mu = \frac{F_R}{F_N} \quad \text{Gl. 3-1}$$

Im Falle des Reifen-Fahrbahn-Kontakts sind die übertragbaren Kräfte in Längs- und Querrichtung F_{xyR} am Reifen die Reibungskräfte F_R und die Radlast F_{zR} die Normalkraft F_N .

$$\mu = \frac{F_{xyR}}{F_{zR}} \quad \text{Gl. 3-2}$$

$$F_{zR} \quad \text{Radlast an einem Rad}$$

$$F_{xyR} = \sqrt{F_{xR}^2 + F_{yR}^2} \quad \text{Gl. 3-3}$$

$$F_{xR} \quad \text{Längskraft an einem Rad}$$

$$F_{yR} \quad \text{Querkraft an einem Rad}$$

Diese radweise Betrachtung kann durch Aufsummieren auf das Gesamtfahrzeug übertragen werden.

$$F_x = a_x * m \quad \text{Gl. 3-4}$$

$$F_y = a_y * m \quad \text{Gl. 3-5}$$

$$F_z = g * m \quad \text{Gl. 3-6}$$

a_x	Beschleunigung des Fahrzeugs in x-Richtung
a_y	Beschleunigung des Fahrzeugs in y-Richtung
g	Erdbeschleunigung
m	Masse des Fahrzeugs

Bei anschließender Kürzung der Fahrzeugmasse aus der Gleichung entsteht der sogenannte globale Reibungsbeiwert μ_{glob} .

$$\mu_{glob} = \frac{\sqrt{(a_x^2 + a_y^2)}}{g} \quad \text{Gl. 3-7}$$

Zur weiteren Herleitung dient der Kamm'sche Kreis, siehe Abbildung 3.1. Dieser verdeutlicht die Zusammenhänge zwischen erreichbaren Längs- und Querbeschleunigungen.

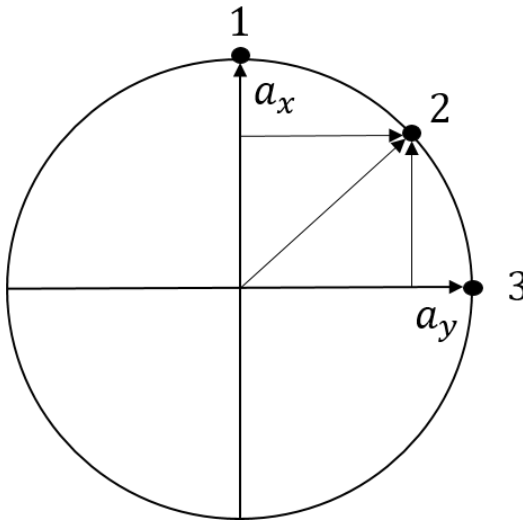


Abbildung 3.1: Kamm'scher Kreis (schematisch).

Um jeweils maximale Beschleunigungen in einer Richtung zu erreichen, muss dafür die entsprechend andere Beschleunigungskomponente Null sein (Zustände 1 und 3). Wird versucht, beide Komponenten gleichzeitig zu übertragen, verringern sich die jeweils maximal übertragbaren Beschleunigungen entlang einer Grenzkurve (zum Beispiel: Zustand 2). Für jede Zunahme der einen Komponente muss also die andere Komponente abnehmen. Die Grenzkurven müssen dabei nicht zwangsläufig perfekte Kreise sein, sondern können auch Ellipsen ähneln. Die Lage der Grenzkurven ist zudem nur gültig für einzelne Betriebszustände. So würde sich die Fläche innerhalb der Grenzkurve verkleinern, wenn beispielsweise der Fahrbahnzustand nicht mehr trocken, sondern vereist ist.

Werden nun die maximal erreichbaren Beschleunigungen in Längs- und Quer- richtung erfasst, kann in einer vereinfachten Näherung unter Vernachlässigung der elliptischen Form der Grenzkurven mit Gl. 3-7 der globale Reibungsbeiwert zwischen Reifen und Fahrbahn bestimmt werden. Zur Erfassung der Längs- (a_x) und Querbeschleunigung (a_y) dienen heute serienmäßig verbaute

Sensoren. Zudem kann mit heutigen Regelsystemen das Erreichen der maximal möglichen Beschleunigungen erkannt werden. Diese Methode bietet demnach eine sehr hohe Präzision. Da jedoch der maximal erreichbare Reibungsbeiwert nur selten ausgenutzt wird, ist diese Methode selten verfügbar.

Mikroschlupf

Eine ebenfalls verbreitete Möglichkeit zur Reibungsbeiwertschätzung stammt von [34]. Sie versucht, das Maximum des erreichbaren Reibungsbeiwerts in Längsrichtung deutlich vor dessen Erreichen zu schätzen.

Grundlage hierfür sind die Verläufe der μ -Schlupf-Kurve bei unterschiedlichen Reibungsbeiwerten, siehe Abbildung 2.4. Unter den Annahmen, dass im niederen Schlupfbereich ein linearer Zusammenhang zwischen übertragbarer Kraft und Schlupf herrscht und dies abhängig vom maximalen Reibungsbeiwert variiert, kann durch Approximation dieser Steigung der Reibungsbeiwert mit einer mittleren Genauigkeit (beispielsweise niedriger, mittlerer und hoher Reibungsbeiwert) geschätzt werden, siehe Abbildung 3.2.

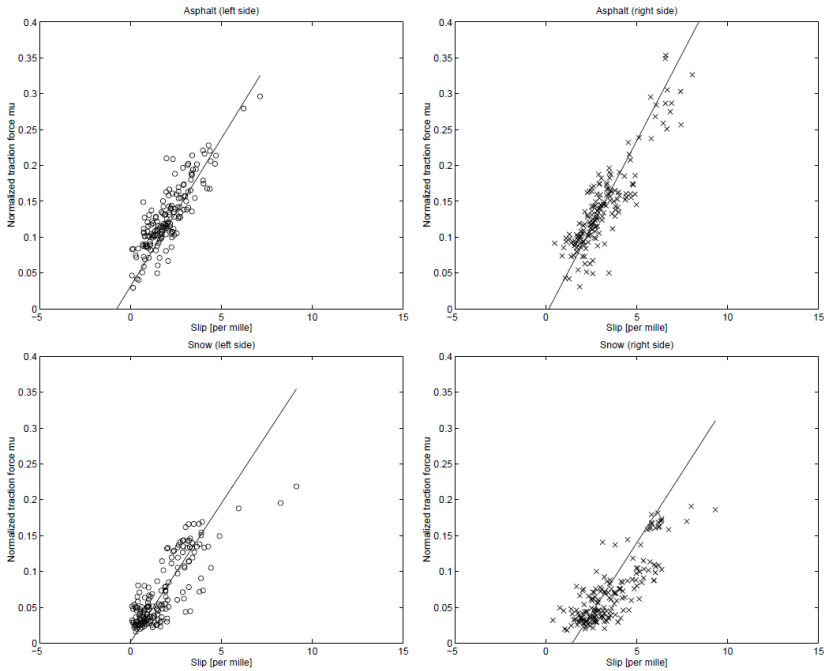


Abbildung 3.2: Normalisierte Längskraft über Schlupf Kurven bei unterschiedlichen Zustandsbedingungen [34].

Für ein Allrad-getriebenes Fahrzeug liegen dabei die Herausforderungen unter anderem in der Berechnung der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Schlupf-werte, da alle Räder angetrieben sind und somit kein Rad frei rollen kann.

Zuerst werden die normalisierten Längskräfte an Vorder- μ_v und Hinterachse μ_h berechnet:

$$\mu_v = \frac{F_{xv}}{F_{zv}} \quad \text{Gl. 3-8 nach [34]}$$

$$\mu_h = \frac{F_{xh}}{F_{zh}} \quad \text{Gl. 3-9 nach [34]}$$

Die Längskräfte vorne F_{x_v} und hinten F_{x_h} werden aus einem Antriebsstrangmodell gewonnen, das unter anderem Motor- und Getriebekennlinien berücksichtigt. Die Normalkräfte vorne F_{z_v} und hinten F_{z_h} werden ebenfalls über ein Modell gewonnen.

$$s_v = \mu_v * \theta_v \quad \text{Gl. 3-10 nach [34]}$$

$$s_h = \mu_h * \theta_h \quad \text{Gl. 3-11 nach [34]}$$

Gl. 3-10 und Gl. 3-11 verkörpern den Zusammenhang zwischen Schlupf, normalisierter Längskraft und einem Reibungs-Schätzwert-Parameter θ . Diese Schätzung wird durch ein Regressionsmodell, zum Beispiel einen Kalman-Filter, erarbeitet [35].

Porsche-interne Erfahrungen zeigen, dass diese Herangehensweise zur Reibungsbeiwertschätzung grundsätzlich funktioniert. Die benötigten Anregungen in Form von Antriebsmomenten sind im Vergleich zum globalen Reibungsbeiwert deutlich geringer, jedoch nicht beliebig klein. Ohne Veränderung der Eingangsgrößen lässt sich der Präzisionsgrad nur auf Kosten der Robustheit erhöhen, wofür unter anderem variierende Reifensteifigkeiten verantwortlich sind. Besonders gut funktioniert der Ansatz, um Sprünge des Reibungsbeiwerts von hoch auf niedrig zu detektieren, ohne dafür hohe Momente an den Rädern absetzen zu müssen.

Rückstellmomente und dynamischer Reifennachlauf

Gegenüber der Schätzung auf Basis von Mikroschlupf zielt der folgende Ansatz nicht auf eine Schätzung des Reibungsbeiwerts in Fahrzeuginnenrichtung, sondern in Fahrzeugquerrichtung ab. Dabei wird sich die Reibungsbeiwertabhängigkeit des Reifenrückstellmoments und des dynamischen Reifennachlaufs zu Nutze gemacht.

Um im rollenden Betrieb Querkräfte beziehungsweise Seitenkräfte zu übertragen, muss dem Reifen ein Schräglaufwinkel α aufgeprägt werden. Hierdurch verformt sich der Reifenlatsch, siehe Abbildung 3.3.

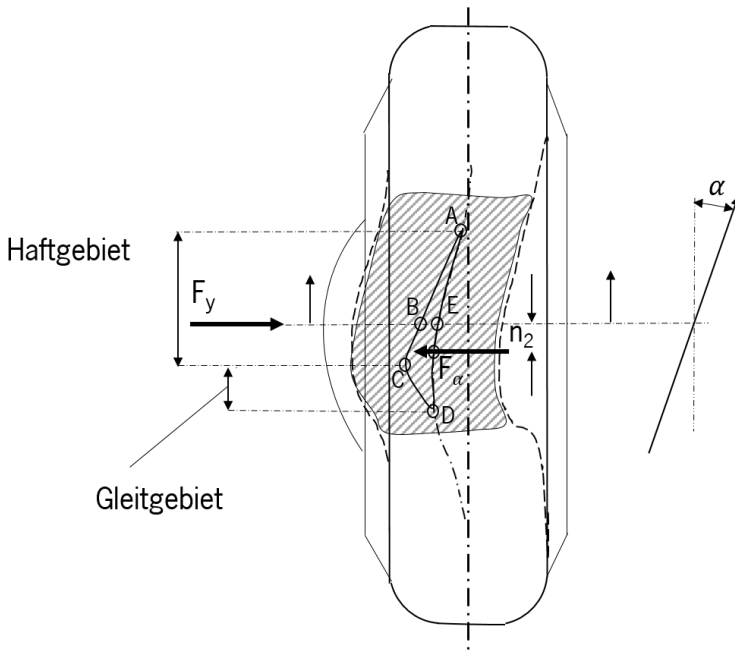


Abbildung 3.3: Darstellung der Seitenkraftübertragung F_y unter einem Schräglaufwinkel α mit dem Hebel dynamischer Reifennachlauf n_2 zur Seitenführungskraft F_α nach [36].

Die übertragbare Seitenkraft variiert hierbei unter anderem in Abhängigkeit der folgenden Faktoren: Schräglaufwinkel, Radlast, Reifenluftdruck und Reibungsbeiwert [36]. Analog zur Längskraft über Schlupf hat die Seitenkraft über Schräglaufwinkel ein reibungsbeiwertabhängiges Maximum und fällt bei weiterer Zunahme des Schräglaufwinkels zu niedrigeren Werten ab.

Die Übertragung der Seitenkraft auf die Radaufhängung erfolgt dabei über einen Hebelarm, der sich aus zwei Komponenten zusammensetzt, dem konstruktiven Nachlauf n_1 und dem dynamischen Reifennachlauf n_2 . Der konstruktive

Nachlauf ist durch die Radaufhängung charakterisiert, die beispielsweise darüber entscheidet, ob bei einem Ein- oder Ausfedern eine Änderung des konstruktiven Nachlaufs erfolgt.

Der dynamische Reifennachlauf hingegen wird durch die Beanspruchung des Reifens beeinflusst. So steigt der dynamische Reifennachlauf bei zunehmender Radlast und fällt mit Zunahme des Schräglaufwinkels, siehe Abbildung 3.4.

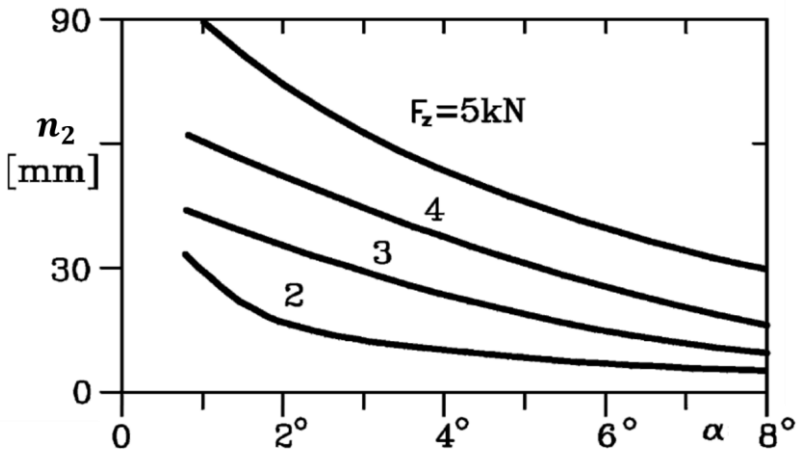


Abbildung 3.4: Dynamischer Reifennachlauf n_2 über Schräglauf α bei verschiedenen Radlasten nach [37].

Aus übertragener Seitenkraft und Hebelarm ergibt sich ein Moment um die Hochachse des Reifens, das eine Rückführung in den Geradeauslauf des Reifens begünstigt. Dieses Moment wird daher auch als Rückstellmoment bezeichnet und berechnet sich unter Vernachlässigung des Schräglaufwinkels und des Spreizungswinkels folgendermaßen:

$$M_{RueckR} = F_{yR} * (n_1 + n_2) \quad \text{Gl. 3-12}$$

Die Größenordnung für den dynamischen Reifennachlauf liegt üblicherweise im Bereich von -5 mm bis + 70 mm [38].

Das sogenannte Gough-Diagramm fasst die Einflussparameter zusammen, siehe Abbildung 3.5.

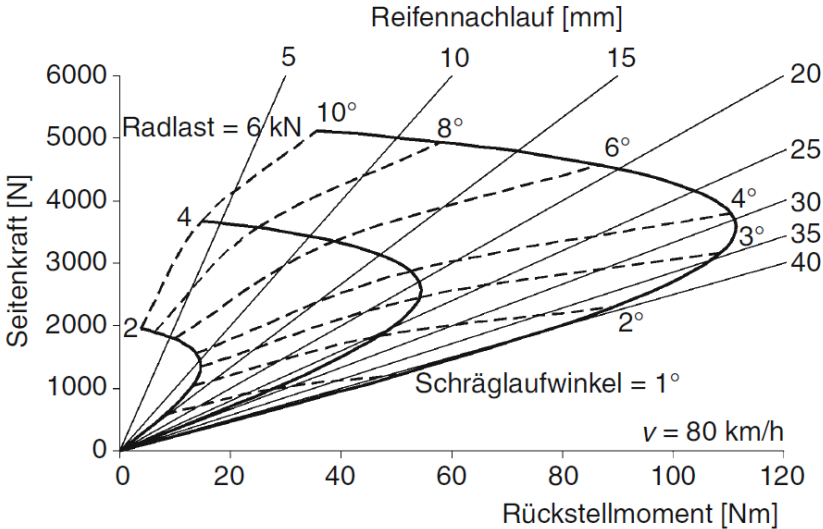


Abbildung 3.5: Gough-Diagramm aus [39] nach [40].

Gough-Diagramme sind nur gültig für konstante Randparameter wie beispielsweise Reifen, Fahrgeschwindigkeit oder Reifenfüllluftdruck und dürfen nur am freirollenden Rad angewendet werden.

Abbildung 3.6 bietet eine für Erklärungszwecke anschaulichere Darstellung zwischen Seitenkraft, Rückstellmoment und Schräglaufwinkel. Bei zunehmendem Schräglaufwinkel erhöht sich die übertragbare Seitenkraft. Gleichzeitig nimmt der dynamische Reifennachlauf ab. Daher hat das Rückstellmoment des Reifens, das sowohl von der Seitenkraft als auch dem dynamischen Reifennachlauf abhängt, ein Maximum bei geringerem Schräglaufwinkel als die Seitenkraft.

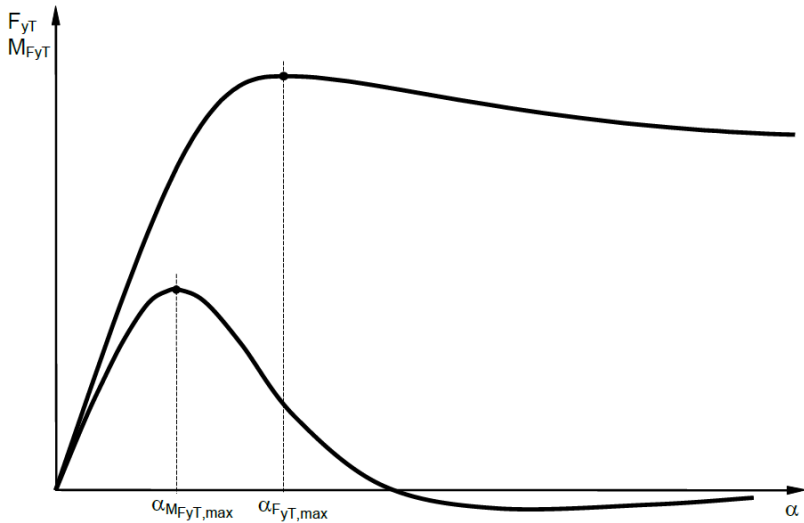


Abbildung 3.6: Zusammenhang von Seitenkraft F_y und Rückstellmoment M_{F_y} entlang des Schräglaufwinkels α nach [38].

Dies kann für die Schätzung des Reibungsbeiwerts genutzt werden. Durch eine Reibungsbeiwertabnahme erhalten die übertragenen Seitenkräfte einen degenerieren Verlauf. Außerdem läuft der dynamische Reifennachlauf noch schneller gegen Null, siehe Abbildung 3.7. Da beides einen direkten Einfluss auf das Rückstellmoment hat, ist der Einfluss der Reibungsbeiwertabnahme hier noch signifikanter.

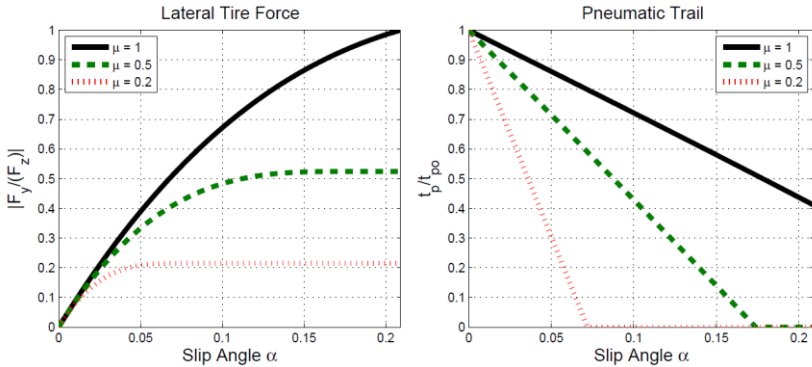


Abbildung 3.7: Normalisierte Seitenkraft (links) und dynamischer Reifennachlauf (rechts) über Schräglauf bei verschiedenen Reibungsbeiwerten (vereinfachte Darstellung) [41].

Was sich für einen erfahrenen Autofahrer bei einer Reibungsbeiwertabnahme als eine leichtgängigere Lenkung mit schnellerem Rückgang des Rückstellmoments darstellt, kann auch systemseitig geschätzt oder erfasst werden. Hierzu gibt es zahlreiche Patente, unter anderem [42].

Dort werden aus fahrdynamischen Größen (zum Beispiel: Gierrate $\dot{\gamma}$, Querbeschleunigung, Raddrehzahlen und dem Lenkwinkel δ_{LR}) mit Hilfe eines Modells die Kräfte am Reifen geschätzt. Die benötigten Größen werden im Fahrzeugsensorverbund serienmäßig erfasst. Bei diesem Schätz-Modell kann es sich beispielsweise um eine Überlagerung des Zweispur-Federungsmodells, des Einspur-Lenkmodells und des Einspur-Federungsmodells handeln.

Anhand der bekannten Radführung können durch Bestimmung der Zahnstangenkraft die Rückstellmomente bestimmt werden. Die hierfür benötigten Zahnstangenkräfte können beispielsweise mit Hilfe einer elektronischen Lenkunterstützung geschätzt oder mit Dehnmessstreifen auf den Spurstangen gemessen werden.

Aus dem Rückstellmoment kann unter Berücksichtigung der bereits ermittelten Größen und einem Reifenmodell dann ein Reibungsbeiwert abgeleitet werden.

Porsche-interne Erfahrungen zeigen, dass diese Ansätze zwar prinzipiell funktionieren können, jedoch von sehr vielen Parametern, wie beispielsweise Radlast und Reifenfüllluftdruck beeinflusst werden. Analytische Modelle stoßen schnell an Komplexitätsgrenzen. Die Verwendung von Kennfeldern kann sehr aufwendig sein, sofern viel-dimensionale Kennfelder erstellt werden müssen, um allen Einflussparametern gerecht zu werden. Reduziert man diese Komplexität durch Vernachlässigung verschiedener Einflussparameter, ergeben sich sowohl eine allgemeine Abnahme der Prädiktionsgüte (Beispiel: Vernachlässigung Sturzwinkel), als auch eine Abnahme der Verfügbarkeit (Beispiel: Aussetzen der Schätzung bei Längskräften). Durch die Tatsache, dass zudem eine sinnvolle Reibungsbeiwertschätzung erst ab einer Kraftschlussausnutzung größer 50 % möglich ist, sinkt die Verfügbarkeit dieser Methode weiterhin.

Neben den hier genannten Ansätzen gibt es zahlreiche weitere Modelle, um Reibungsbeiwerte in Längs- oder Querrichtung zu schätzen. Hierfür werden häufig (komplexe) Reifenmodelle benötigt. Das wohl bekannteste Modell ist das nach Pacejka [43], dessen Parameter auf die unterschiedlichsten Arten geschätzt werden.

3.2 Systeme zur ursachenbasierten Reibungsbeiwertschätzung

Während effektbasierte Systeme nicht immer alle Einflussparameter auf den Reifen-Fahrbahn-Kontakt kennen müssen (beispielsweise die Schätzung des globalen Reibungsbeiwerts durch erreichbare Beschleunigung), werden als ursachenbasierte Systeme solche verstanden, die durch Schätzung oder Messung von Einflussparametern den Fahrbahn-Reifen-Kontakt charakterisieren.

Dabei sind die Systeme zur ursachenbasierten Reibungsbeiwertschätzung deutlich näher an der Wahrnehmung des Menschen als effektbasierte Systeme.

Zum Beispiel reagiert der Fahrer häufiger auf nasse oder verschneite Fahrbahnen und nicht auf einen spezifischen Reibungsbeiwert, leichtgängigere Lenkung oder erhöhten Mikroschlupf.

Aus einer ursachenbasierten Beobachtung wie dem witterungsbedingten Fahrbahnzustand kann unter Berücksichtigung der bekannten oder geschätzten Einflussparameter in einem Folgeschritt unter Kenntnis der Grundlagen des Reifen-Fahrbahn-Kontakts ein Reibungsbeiwert abgeleitet werden. Dieser ist im Gegensatz zu effektbasierten Ansätzen in der Regel von einer geringeren Präzisionsgüte.

Beispiel: Das ursachenbasierte System erkennt eine nasse Fahrbahn. Es liegen keine weiteren Informationen vor. Somit läge der abgeleitete Reibungsbeiwert in einem Bereich zwischen 0,2 und 0,9. Unter Zuhilfenahme von weiteren Messgrößen, kann das Band weiter verschmälert werden. Bei einer Geschwindigkeit unterhalb von 30 km/h kann beispielsweise Aquaplaning konsequent ausgeschlossen und somit das Band nach oben angepasst werden.

Um jedoch daraus eine Reibungsbeiwertschätzung ableiten zu können, müssen weitere Einflussparameter bekannt sein oder geschätzt werden können. Betriebsbedingte Einflussparameter (vergleiche Kap. 2.2.1) werden üblicherweise durch Sensoren im Fahrzeug (zum Beispiel: Aufbaubeschleunigung, Fahrzeuggeschwindigkeit) gemessen oder mit validierten Modellen (zum Beispiel: dynamische Radlast) geschätzt. Sie können somit als bekannt vorausgesetzt werden.

Dynamische Reifenparameter können teilweise gemessen werden (Luftdruck). Es gibt jedoch auch Parameter, deren Ermittlung deutlich komplexer gestaltet ist. Die Profiltiefe eines Reifens kann beispielsweise über Modelle geschätzt werden [44], jedoch wurde bis heute mit keinem Modell eine serienreife Robustheit erreicht. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Profiltiefe durch Messgeräte diskontinuierlich ermittelt und als bekannt vorausgesetzt.

Fahrbahnbeschaffenheiten wie Mikro- oder Makrorauigkeit sind beispielsweise durch optische Messtechnik kategorisierbar [45]. Alternativ gibt es Methoden, um aus dem Reifenabrollgeräusch auf entsprechende Fahrbahnklassen

zu schließen [46]. Referenz-Verfahren wie SRT und SRM sind nicht für einen Einsatz im täglichen Fahrbetrieb geeignet.

Im Rahmen dieser Arbeit kann die Mikrorauigkeit punktuell und indirekt durch ABS-Bremsungen (ABS – Anti-Blockier-System) geschätzt werden. Die Makrorauigkeit wird visuell durch den Fahrer anhand der Drainagefähigkeit in die drei Klassen „sehr gute Drainage“ (neuer Flüsterasphalt, keine/minimale Gischtfahnen bei Nässe), „normal“ (durchschnittliche Gischtfahnen bei Nässe) und „schlechte Drainage“ (starke Gischtbildung, lokale Pfützenbildung) eingeteilt.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es sich hier ausschließlich um eine Beschreibung der möglichen Ableitung eines Reibungsbeiwerts handelt. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Konzept beschränkt sich hingegen ausschließlich auf die Erfassung, Qualifizierung und Quantifizierung eines witterungsbedingten Fahrbahnzustands, nämlich des Fahrbahnässegrads.

Optische Verfahren

Ein Großteil der Systeme zur Erkennung des witterungsbedingten Fahrbahnzustands sind optische Verfahren. Dabei werden unterschiedliche physikalische Effekte genutzt.

Polarisationskameras und Monokameras, die als Frontkameras für Assistenzsysteme im Oberklassensegment derzeit Einzug in Serienfahrzeuge finden, können Fahrbahnzustände wie trocken, nass, Eis und Schnee differenzieren [47, 48]. Eine Quantifizierung der Wasserhöhe ist hierbei nicht möglich. Zudem haben diese Systeme bei ungünstigen Licht- und Wetterbedingungen noch keine höhere Robustheit erreicht. Die Witterungserkennung kann als Software-Baustein in bestehende Hardware integriert werden.

Ebenfalls problematisch sind die Lichtverhältnisse bei einem Ansatz mit einer Rückfahrkamera [49]. Hier ist das Ziel, mittels Kamera entweder die Fahrspuren, die ein Fahrzeug bei nasser Fahrbahn auf der Straße hinterlässt, oder die Gischt, die hinter dem Fahrzeug aufgewirbelt wird, zu erkennen. Neben den

natürlichen Lichtverhältnissen kommen künstliche Lichtquellen durch nachfolgenden Verkehr erschwerend hinzu. Die Quantifizierung geringer Wassermengen auf der Fahrbahn entfällt, da sich bei feuchter Fahrbahn keine Fahrspuren ausprägen.

Lasersensoren stellen eine Alternative dar, die von den umgebenden Lichtverhältnissen unabhängig ist [50, 51]. Auch hier werden nur Fahrbahnzustandsklassen (trocken, nass, Eis, Schnee) unterschieden. Lasersensoren werden im Gegensatz zu Kameras heute bisher kaum in Serienfahrzeugen eingesetzt und haben darüber hinaus eine spezifischere Auslegung als Kameras. Dies zeigt sich zum Beispiel daran, dass bei der deutlich schmaleren Messbereichsauslegung eines Lasersensors entschieden werden muss, ob er sich horizontal vom Fahrzeug ausbreitet oder auf die Fahrbahn gerichtet sein soll. Durch diese mangelnde Synergie müsste ein Lasersensor, der den Fahrbahnzustand interpretieren soll, zusätzlich eingebaut werden. Zukünftige Laserscanner oder LIDAR-Sensoren könnten womöglich weitere Synergien heben, da diese Sensoren einen deutlich breiteren Arbeitswinkel abdecken können.

Eine sehr verbreitete und kostengünstige Sensorik ist der Regensensor [52]. Grundsätzlich sind Regensensoren in der Lage, den Benetzungsgrad der Windschutzscheibe zu messen. Daraus kann der Wetterzustand bedingt abgeleitet werden. Eine trockene Windschutzscheibe garantiert jedoch nicht automatisch eine trockene Fahrbahn. Zudem können aufgrund variierender Makrorauigkeit der Fahrbahn und Verkehrsdichte aus dem Benetzungsgrad der Windschutzscheibe nicht automatisch Rückschlüsse auf einen Fahrbahnnaßegrad gezogen werden, vergleiche Kap. 2.2.4. Darüber hinaus sind Regensensoren speziell auf die Entwässerung der Windschutzscheibe zur besseren Sicht des Fahrers ausgelegt und somit nicht unbedingt fähig, höhere Niederschläge beziehungsweise Benetzungen aufzulösen.

Witterungszustände der Fahrbahn können auch durch Infrarotlicht detektiert werden. Wasser absorbiert Licht in bestimmten Wellenlängenbereichen besonders stark. Ein Sensor, der Infrarotlicht auf verschiedenen Wellenlängen aussendet und die Reflexion misst, kann somit die Wassermenge bestimmen [23]. Dabei wird durch Wellenlängen, die nicht wasserspezifisch absorbiert werden, eine Referenz für die aktuellen Umgebungsbedingungen gebildet. Anwendung

findet diese Technologie zum Beispiel im Sensor „MARWIS“ der Firma Lufft [53]. Der Sensor gibt zwei Wasserhöhen aus – eine Gesamtwasserfilmhöhe und eine Wasserhöhe, bei der Wasser in den Poren des Straßenbelags vernachlässigt wird. Zweitere hat sich als deutlich robuster herausgestellt und wird im Verlauf der Arbeit benutzt. Neben der Wasserhöhe können weitere Größen wie Fahrbahntemperatur (über ein Pyrometer), Taupunkttemperatur (Luftfeuchtheitsmesser) oder Vereisungsgrad der Fahrbahn detektiert werden. Aufgrund von komplexen Montageanforderungen und hohen Kosten ist dieses System bisher nicht für einen Serieneinsatz tauglich. Eine Alternative bietet [54]. In [55] ist ein Vergleich verschiedener Sensorsysteme beschrieben.

Der Einsatz von Infrarotlicht ist dabei nicht neu. So wurde in [56] mittels Infrarotlicht im Bereich von 960 nm detektiert, ob die Laufflächen eines oder mehrerer Reifen nass sind. Hierüber kann eine Unterscheidung zwischen trockener und nasser Fahrbahn getroffen werden. Diese Klassifizierung ist zuverlässiger als beispielsweise ein Regensensor. Nichtsdestotrotz sind für den erhaltenen Mehrwert die zusätzlich benötigten Bauteilkosten nicht gerechtfertigt.

Eine weitere Anwendung von Infrarotlicht wird genutzt, um Reifendeformationen zu erkennen. Eine auf der Innenseite des Laufstreifens angebrachte IR-LED sendet Licht zu einer auf der Felge montierten Empfangseinheit [57].

Reifensensorik

Als Alternative zu optischen Methoden können Reifendeformationen auch mit anderen Messmitteln bestimmt werden. Besonderes Augenmerk ist hierbei auf den sogenannten „Darmstädter Reifensensor“ zu richten [58]. Über mehrere Generationen wurde ein Sensorsystem entwickelt, das in der zweiten Generation beispielsweise Deformationen des Laufstreifens über Hall-Generatoren und in den Laufstreifen eingebundene Magnete detektiert. Aus diesen Verformungen können dabei viele Aussagen über den Reifen-Fahrbahn-Kontakt getroffen werden. Neben der Messung von übertragenen Längs- und Querkräften sowie Radlasten können auch Reibungsbeiwerte bestimmt werden. Darüber hinaus kann durch die Bestimmung der Länge des Reifenlatsches auch ein Aufschwimmen des Reifens erkannt werden.

Alternativ zur Deformationsmessung des Laufstreifens können auch Beschleunigungen im Reifen ausgewertet werden. Die Sensorik hierzu besteht aus einem oder mehreren Beschleunigungssensoren [59]. Allgemein verfügen Reifensensoren über ein sehr hohes Potential in Anwendung und Nutzen. Derzeitige Herausforderungen liegen im Bereich der Montage, Hochgeschwindigkeit (250 km/h aufwärts) und Energieversorgung.

Als Montagemöglichkeiten bieten sich zum Beispiel das Einvulkanisieren sowie das Verkleben von Sensoren an. Findet diese Montage beim Reifenhersteller statt, so kann darüber hinaus auch sichergestellt werden, dass ein Reifen über die Sensorik eindeutig identifiziert werden kann. Die abgesicherte Kenntnis über den exakten Reifen(-typ) bietet große Vorteile für die Applikation von Fahrdynamikregelsystemen. Eine automatisierte Montage verringert darüber hinaus die Kalibrierumfänge bei der Inbetriebnahme. Da sich die Lebensdauer von Reifen sehr stark nach deren Nutzung richtet, birgt eine dauerhafte Montage jedoch das Risiko, die Lebensdauer der Sensorik über- oder unterauszulegen.

Neben der Lebensdauer eines Reifens muss außerdem in der Auslegung die erreichbare Höchstgeschwindigkeit des Reifens berücksichtigt werden. Sensoren, die auf dem Laufstreifen des Reifens montiert sind, erfahren Beschleunigungskräfte, die ein Vielfaches der Erdanziehungskraft ausmachen. Dieser Einfluss ist quadratisch von der Fahrgeschwindigkeit abhängig.

$$F_G = m * g \quad \text{Gl. 3-13}$$

$$F_{\text{Zentrifugal}} = m * \frac{v^2}{r} \quad \text{Gl. 3-14}$$

Aus Gl. 3-13 und Gl. 3-14 kann abgeleitet werden, dass auf ein Element im oder auf dem Reifenlaufstreifen bei einem dynamischen Radhalbmesser von 0,34 m (20“ Bereifung) und einer Fahrgeschwindigkeit von 250 km/h eine Zentrifugalbeschleunigung von über 1400 *g* wirkt. Bei einer Fahrgeschwindigkeit von 330 km/h wirken bereits über 2500 *g* auf das Element. Im Ein- und Auslauf entstehen durch kleinere Biegeradien noch größere Beschleunigungen.

Die Energieversorgung kann entweder kontaktlos durch Generatoren und die Drehbewegung des Reifens oder durch Batterien im Sensor realisiert werden. Vorteil der kontaktlosen Versorgung ist das geringere Fliehgewicht der Generatoren gegenüber den Batterien im Reifen. Nachteil ist eine benötigte Mindestdrehzahl des Reifens zur Aktivierung des Sensors.

Trotz der genannten Herausforderungen ist zukünftig mit einem Einsatz von Reifensensorik in größerem Maße zu rechnen. Es findet bereits Verwendung im Ferrari LaFerrari FXX K [60].

Akustische Verfahren

So wie manche optische Verfahren das menschliche Sehvermögen maschinell nachahmen (zum Beispiel: Kamera erkennt Straßenzustand), können mittels akustischer Messmethoden Effekte erkannt werden, die auch das menschliche Gehör wahrnimmt. Mikrofone im Fahrgastbereich [49] oder in Reifennähe [46, 61] können das Abrollgeräusch eines oder mehrerer Reifen bewerten. Grundsätzlich ist damit eine mehrstufige Unterscheidung von Fahrbahnässegraden zwischen trocken, feucht, nass und sehr nass denkbar.

Die Nutzung des Innenmikrofons, das beispielsweise auch für die Audiokommunikation im Fahrzeug genutzt wird, bietet eine kostenneutrale Lösung. Jedoch erschweren unkontrollierte Geräuschquellen im Innenraum (Infotainment und Fahrgäste) die Analyse. Motorengeräusche können durch eine entsprechende Applikation bei Kenntnis verschiedener Messgrößen (zum Beispiel: Drehzahl) herausgefiltert werden.

Neben den Verfahren im hörbaren Bereich des Menschen gibt es weitere akustische Messmittel, wie zum Beispiel Ultraschall-Sensorik. Hierbei kann eine Parksensorik im Fahrzeugheck dafür genutzt werden, Aufwirbelungen hinter dem Fahrzeug zu detektieren [49, 62]. Damit die Rückstrahlung des Ultraschalls vom Sensor erfasst werden kann, bedarf es neben einer Anpassung der Sensorik auch einer nicht unerheblichen Gischtfahne im Heckbereich. Somit können also lediglich größere Wassermengen auf der Fahrbahn identifiziert werden. Die Gischtfahne hängt darüber hinaus stark von der Bauform des

Fahrzeughecks und der hinteren Radkästen ab. Zudem können durch heiße Abgase ebenfalls Störquellen entstehen.

Gegenüber den bisher genannten Verfahren, die auf Luftschall basieren, können Beschleunigungssensoren zur Detektion von Körperschall genutzt werden. Körperschall entsteht dabei unter anderem durch das Auftreffen der Wasseraufwirbelung des Reifens auf einem Karosserieteil. Eine mögliche Anwendung zeigt [63]. Hier wurde prototypisch durch einen im Radhaus installierten Sensor nachgewiesen, dass der Fahrbahnneigegrad mit einem verarbeiteten Sensorsignal korreliert. Dieser Ansatz bedarf ebenfalls einer Korrektur der Motorschwingungen. Aufgrund der geringen Sensorkosten und der hohen Verfügbarkeit des Signals (im Vergleich zur Kamera auch nachts verfügbar) ist dieser Ansatz sehr vielversprechend. Weitere Konkretisierungen hiervon sind [64]: Ergänzung einer Prallplatte vor dem Sensor; [65]: Ergänzung der Information aus Reifenschlupf zur Ableitung eines Reibungsbeiwerts und Installation eines Temperatursensors zur Erkennung von Eis und Schnee; [66]: Ergänzung eines zweiten Beschleunigungssensors neben dem Reifen zur Erfassung von seitlicher Wasserverdrängung und daraus Ableitung einer besseren Auflösung bei höheren Wasserhöhen; und [67]: Schwingungstechnische Entkopplung der Prallplatte hinter dem Reifen, dadurch robuster gegenüber Motor- und Karosserieschwingungen.

Diese Ansätze erscheinen für die Bestimmung eines Fahrbahnneigegrads zielführend, weshalb ihr Potential in dieser Arbeit detailliert beleuchtet wird.

Zur Bestimmung des Körperschalls können neben allgemeinen Beschleunigungssensoren auch passive Ultraschallsensoren im Radhaus eingesetzt werden [49, 68, 69].

Weitere Verfahren

Neben den auf Körperschall basierenden Ansätzen beschäftigen sich [70, 71] ebenfalls mit den Wasseraufwirbelungen des Reifens. Hier wird jedoch mit einem neu entworfenen Sensor gearbeitet, der anstelle von Körperschall auf der Änderung eines elektrischen Widerstands beruht. So können geringe Was-

sermengen detektiert, jedoch keine breitbandige Bestimmung des Fahrbahn-
nässegrads realisiert werden. Dank einer elektrischen Heizung ist das System
dafür jedoch in der Lage, auch Schnee und Eis zu erkennen (woher sich der
Sensorname WSE – Wasser Schnee Eis ableitet). Der Sensoraufbau ist dabei
relativ komplex und darüber hinaus im Vergleich zu anderen Sensoren sperrig
(ähnliche Maße wie MARWIS).

Der Vollständigkeit halber seien drei weitere Sensoren beziehungsweise Ver-
fahren genannt, die sich jedoch nicht mehr mit der Aufwirbelung von Wasser
beschäftigen. So wird in [72] ein stationäres System beschrieben, das auf Basis
von Radartechnologie den Fahrbahnzustand schätzt. Inwiefern diese Methodik
auch für den mobilen Einsatz nutzbar ist, ist nicht bekannt.

Eine weitere Sensorik stellen Temperatursensoren dar. Diese werden in vielen
Fahrzeugen bereits serienmäßig zur Steuerung von Klimatisierung und Ver-
brennungs-Motor genutzt. Für sich alleine genommen ist der Außentempera-
tursensor dabei nur sehr begrenzt nützlich, jedoch bietet er eine hervorragende,
kostenneutrale Möglichkeit, in einem Sensorverbund zur Plausibilisierung an-
derer Signale genutzt zu werden.

Ähnlich dem Temperatursensor halten außerdem Luftfeuchtesensoren Einzug
in den Premiumsektor der Klimatisierung und Verbrennungs-Motoren. Mit
Hilfe von Außentemperatur und Luftfeuchte kann beispielsweise auf die Tau-
punkttemperatur geschlossen werden [73]. Auf Basis dieser Taupunkttempe-
ratur kann bereits eine Aussage über den erwarteten Fahrbahnzustand getrof-
fen werden.

3.3 Zusammenfassung der bekannten Systeme zur Reibungsbeiwertschätzung

Zusammenfassend ist für die Systeme zur Reibungsbeiwertschätzung festzu-
halten, dass sich trotz einer Vielzahl möglicher Lösungsansätze bis heute kein
einzelnes System im Automobilbau etabliert hat. Hauptsächlich, weil dabei die
Ansprüche an Genauigkeit und Verfügbarkeit nicht erreicht wurden. Zukünftig

ist davon auszugehen, dass eine Reibungsbeiwertschätzung mittels einer intelligenten Vernetzung verschiedener Ansätze eine integrative Lösung entstehen wird. Abbildung 3.8 zeigt hierfür eine Auswahl der möglichen Bausteine.

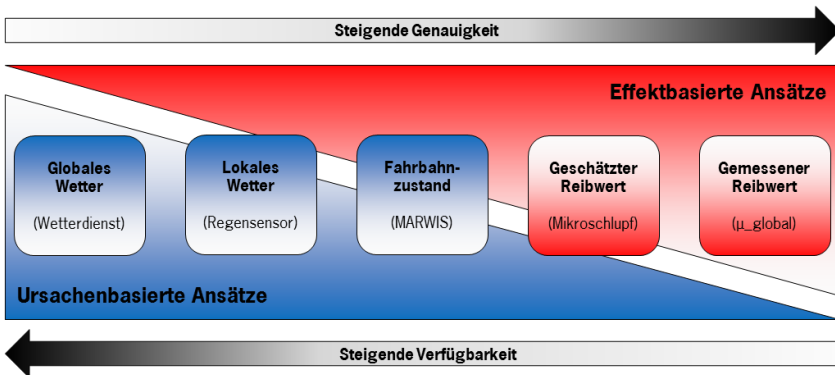


Abbildung 3.8: Übersicht über verschiedene Systeme zur Reibungsbeiwertschätzung.

Außerdem lassen sich anhand von Abbildung 3.8 die vorgestellten Ansätze noch einmal in Bezug auf Genauigkeit und Verfügbarkeit einordnen. Hierbei zeichnen sich die ursachenbasierten Ansätze durch eine hohe Verfügbarkeit aus, wohingegen die effektbasierten Ansätze ihren Vorteil in einer hohen Genauigkeit haben. Zu beiden Ansatzgruppen sind im Folgenden verschiedene Einzelansätze inklusive eines konkreten Beispiels aufgeführt.

So ist für den Einzelansatz „Globales Wetter“ davon auszugehen, dass durch online verfügbare Daten von Wetterdiensten (konkretes System) eine flächige Abdeckung von groben Fahrbahnzustandsbedingungen ableitbar sein wird.

Diese Schätzung kann punktuell durch höherwertigere Informationen angereichert werden, zum Beispiel durch das lokale Wetter am Fahrzeug. Die dabei gewonnene Präzisionsgüte der Informationen wird durch eine abnehmende Verfügbarkeit erkauft.

Die abnehmende Verfügbarkeit setzt sich im weiteren Verlauf der Abbildung 3.8 entweder aus Systemaufwänden oder der Situationsgebundenheit der Informationen zusammen. Beispielsweise ist ein Fahrbahnzustandssensor wie MARWIS teurer und benötigt mehr Bauraum als ein Regensensor und ist somit seltener verbaut/verfügbar. Die Situationsgebundenheit bezieht sich auf fahrdynamische Begebenheiten. So ist der maximal verfügbare Reibungsbeiwert während eines Regelsystemeingriffs zwar hochgenau messbar, jedoch entsteht diese Situation vergleichsweise selten.

Bei der Zusammenführung all dieser Informationen in einer online-vernetzten Fahrzeugarchitektur wird es somit zukünftig möglich sein, präzise Vorhersagen über aktuelle Reibungsbeiwerte zu liefern.

Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz kann hierbei ebenfalls als ein Baustein verwendet werden. In Abbildung 3.8 lässt er sich im Bereich zwischen der lokalen Schätzung des Wetters am Fahrzeug und der Fahrbahnzustandsschätzung einordnen. Es handelt sich damit um ein kontinuierlich arbeitendes, ursachenbasiertes System. Ziel des Ansatzes ist die Schätzung des Fahrbahnwasserfilms. Die Ableitung eines allgemeingültigen Reibungsbeiwerts ist nicht Teil dieser Arbeit.

4 Identifikation der Systemanforderungen

Ziel der Arbeit ist die Erarbeitung und Validierung eines Systems, das in der Lage ist, verschiedene Fahrbahn­n­segrade zu identifizieren. Gleichzeitig ist zu gewährleisten, dass es massentauglich im Automobilbau einsetzbar ist. Im folgenden Kap. 4 sollen daher nun die Anforderungen an das Gesamtsystem identifiziert werden. Hierfür wird in Kap. 4.1 eine detaillierte Unfallanalyse betrieben, die sich auf Unfälle bei Fahrbahn­n­se bezieht. Mit einem Flottenversuch wird anschließend in Kap. 4.2 analysiert, mit welchen Fahrbahn­n­segraden durchschnittlich auf dem deutschen Straßennetz zu rechnen ist. Kap. 4.3 berücksichtigt des Weiteren ausgewählte Anforderungen aus der Massenproduktion im Automobilbau.

4.1 Unfallanalysen

Es existieren aktuelle Unfalldaten, die durch das statistische Bundesamt DESTATIS bereitgestellt werden [4]. Grundlage dieser Daten sind Unfallberichte der Polizei, die für jeden Unfall mit Polizeieinsatz angefertigt werden. Neben diversen Statistiken über Unfallbeteiligte, -ort und -zeit finden sich dort auch Angaben zu den Unfallursachen.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass trotz entsprechend einheitlich gestalteter Berichtsvorlagen die einzelne Beurteilung durch Unfallbeteiligte und Beamte keinen Anspruch auf vollständige Richtigkeit hat. Diese Daten sind daher wissenschaftlich anfechtbar, jedoch geben sie erste Anhaltspunkte für den Einstieg in die Thematik. Dem gegenüber stehen Daten, die durch besondere Unfallexperten erfasst werden (GIDAS – German In-Depth Accident Study [74]). Dabei fahren Spezialisten zu ausgewählten Unfällen, um diese mittels spezieller Messtechniken und Methoden detaillierter aufzunehmen. Diese Analyse findet jedoch derzeit nur im Raum Hannover und Dresden Anwendung.

Aus dem Bericht des DESTATIS von Oktober 2016 geht hervor, dass im Zeitraum von Januar bis Oktober 2016 insgesamt 258.936 Verkehrsunfälle mit Personenschaden in Deutschland durch die Polizei erfasst wurden. 81.197 Unfälle (31,4 %) fanden dabei außerorts statt, wovon sich wiederum 17.613 Unfälle (6,8 % aller Unfälle) auf Autobahnen ereigneten.

Nach Analyse der möglichen Unfallursachen, ergeben sich für die außerorts geschehenen Unfälle folgende Ergebnisse:

Tabelle 4.1: Auszug Unfallursachen mit Personenschaden außerorts [4].

Unfallursache	Anzahl
Technischer Mangel an Bereifung	681
Schnee oder Eis	2.479
Regen	2.934
Sichtbehinderung durch starken Regen, Hagel oder Schneegestöber	240
Spurrillen in Zusammenhang mit Regen, Schnee oder Eis	57

Das bedeutet, dass rund 6,7 % aller Unfälle außerorts durch witterungsbedingte Schwankungen des Reibungsbeiwerts entstanden sind (Anzahl der Unfälle mit Personenschaden außerorts bei Schnee oder Eis, Regen oder Spurrillen bezogen auf alle Unfälle mit Personenschaden außerorts).

Da die angegebene Statistik Mehrfachnennungen ermöglicht (bis zu acht Unfallursachen gleichzeitig), muss für eine detaillierte Betrachtung eine andere Quelle herangezogen werden. Hierfür können dank der Unterstützung des Innenministeriums und der Polizei in Baden-Württemberg zusätzliche Unfalldaten [75] analysiert werden.

Die vorliegenden Daten aus [75] befassen sich mit Unfällen im Großraum Stuttgart, die im Zeitraum 2014 bis 2015 (24 Monate) auf nasser Fahrbahn stattfanden. Der Datensatz umfasst 13.019 Einträge. Um die Unfallursache Aquaplaning präziser zu identifizieren, werden diese Einträge in mehreren Schritten eingegrenzt.

Als erster Analyseschritt werden nur Unfälle berücksichtigt, deren Ursache mindestens eine der folgenden beinhaltet: „Nicht angepasste Geschwindigkeit mit Überschreiten der zulässigen Höchstgeschwindigkeit“, „Nicht angepasste Geschwindigkeit ohne Überschreiten der zulässigen Höchstgeschwindigkeit“ sowie „Technische Mängel an Bereifung“. Damit verringern sich die relevanten Daten auf 1.973 Sätze.

Mit dem Wissen, dass insbesondere bei Nässe der Reibungsbeiwert zwischen Reifen und Fahrbahn eine geschwindigkeitsabhängige Komponente besitzt und des Weiteren mit der Annahme, dass die durchschnittlich erreichten Fahrgeschwindigkeiten innerorts deutlich geringer als außerorts und auf Autobahnen sind, kann in einem zweiten Schritt pauschal auf innerorts erfasste Unfälle verzichtet werden. Es verbleiben 1.329 Datensätze.

Da der Fokus dieser Arbeit im Pkw-Bereich liegt, werden im nächsten Schritt ausschließlich Unfälle mit Pkw-Beteiligung berücksichtigt. Es verbleiben 1.199 Datensätze.

Ab dem nächsten Schritt präzisiert sich die Analyse noch stärker in Richtung Aquaplaning-Unfälle. Hierfür werden nur noch Unfallarten mit einem Abkommen von der Fahrbahn nach links oder rechts berücksichtigt. Somit können fremdverschuldete Unfälle (zum Beispiel: durch ein ausscherendes Fahrzeug) soweit möglich ausgeschlossen werden. Es verbleiben 774 Datensätze.

Um besonders höhere Fahrgeschwindigkeiten zu berücksichtigen wird des Weiteren die Aquaplaninggefahr auf Autobahnen bewertet, indem andere Straßentypen (zum Beispiel: Landstraße) vernachlässigt werden. Außerdem wird durch eine reine Betrachtung von Unfällen bei Tag Dunkelheit als Unfallursache ausgeschlossen. Es verbleiben 214 Datensätze.

Zuletzt werden mittels GPS-Daten alle Unfälle auf Auf- und Abfahrten der Autobahn vernachlässigt, da hier nicht sinnvoll zwischen vollständigem Aquaplaning und einem leicht verringerten Reibungsbeiwert durch Nässe (ohne Aquaplaning) unterschieden werden kann.

Daraus ergeben sich insgesamt 83 Unfälle, bei denen – soweit es diese Methode zulässt – die Unfallursache vollständiges Aquaplaning gewesen ist, siehe Abbildung 4.1.

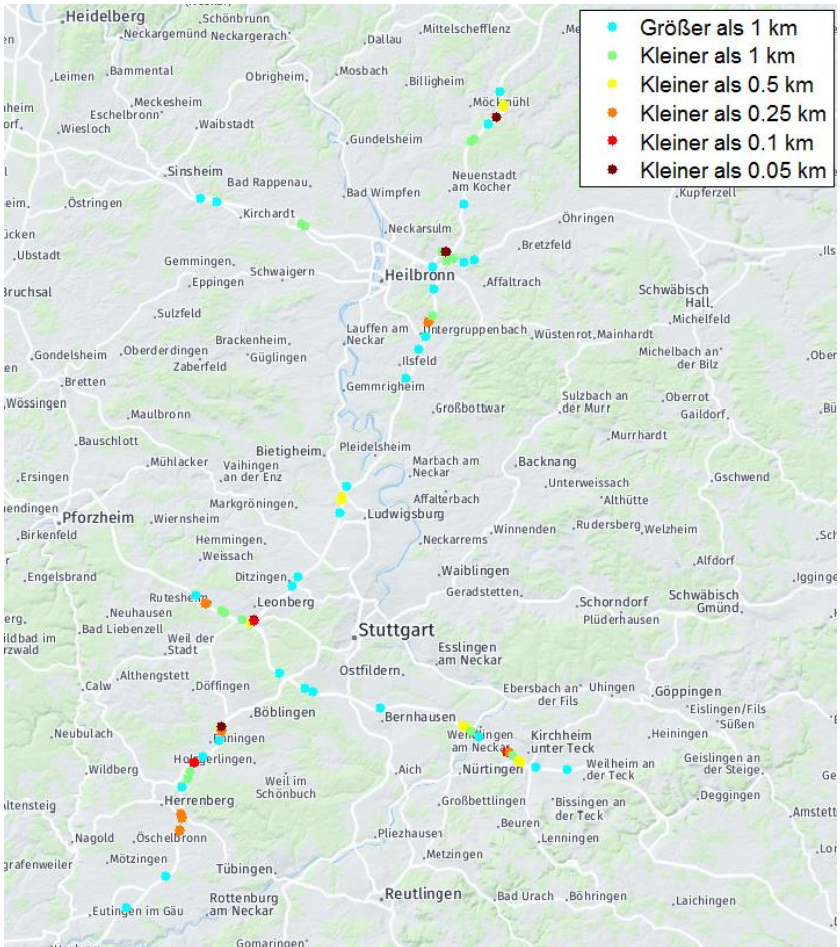


Abbildung 4.1: 83 Voraussichtliche Aquaplaninggefahrenstellen im Großraum Stuttgart aus [75]. Anhand der Einfärbung werden Abstände zu nächstgelegenen Gefahrenstellen markiert.

Um wiederkehrende Gefahrenstellen und gefährliche Straßenabschnitte zu identifizieren, wird eine Einfärbung nach Abstand zur nächstgelegenen Gefahrenstelle gewählt. Der Abstand zwischen zwei Gefahrenstellen wird hierbei als

Luftlinienabstand angegeben und aus den GPS-Positionen berechnet. Bei einer Betrachtung der gehäuften Gefahrenabschnitte kann festgestellt werden, dass diese entweder durch besonders schlechte Drainage beziehungsweise stark abgenutzte Fahrbahnoberflächen oder durch eine Topologie, die eine Pfützenbildung begünstigt, geprägt sind. An einem Großteil dieser Stellen wurde bereits durch die Behörden auf die Gefahr mittels einer Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit bei Nässe reagiert.

Werden im Vergleich zu diesen Daten der Polizei Baden-Württemberg die Quellen der GIDAS Datenbank von 1999 bis 2015 ausgewertet, ergeben sich insgesamt 7.720 Unfälle bei nasser Fahrbahn. Unter Anwendung vergleichbarer Filterkriterien verbleiben 35 Unfälle, deren Ursache – im Rahmen der Methodik – auf Aquaplaning zurückzuführen ist.

Somit lässt sich ableiten, dass im Falle von nassen Fahrbahnen rund 0,5 % der Unfälle (0,64 % Polizei BW und 0,45 % GIDAS) rein aquaplaningbedingt sind. Diese Unfälle sind durch rechtzeitige Information des Fahrers über den Fahrbahnnässegrad vermeidbar.

4.2 Benötigte Auflösung der Fahrbahnnässegrade

Wie Kap. 4.1 zeigt, ist die Erkennung von Aquaplaning-relevanten Wasserhöhen nicht irrelevant. Der Anteil an Unfällen, bei denen zwar eine nasse Fahrbahn, jedoch nicht zwangsläufig Aquaplaning die Unfallursache gewesen ist, überwiegt jedoch deutlich. Daher müssen auch nicht-Aquaplaning-relevante Fahrbahnnässegrade erfasst werden können, welche im Folgenden weiter detailliert werden.

Grundsätzlich bieten bereits Abbildung 2.5 und Abbildung 2.6 aus Kap. 2.2.2 eine Einordnung der möglichen Fahrbahnnässegrade. Um jedoch eine präzisere Aussage über absolute Zahlenwerte (Wasserhöhe in mm) sowie deren Häufigkeitsverteilung zu treffen, wird eine eigene Analyse durchgeführt.

Für Deutschland können hierzu Daten aus sogenannten Glätte-Melde-Anlagen (GMA) erhoben werden. Bei den GMA handelt es sich um ein Netz statischer, über oder in der Fahrbahn montierter Sensoren, die unter anderem die Wasserhöhe auf der Fahrbahn sensieren können [76, 77]. Diese Sensoren werden hauptsächlich auf größeren Verkehrsstraßen (BAB) eingesetzt. Bei Sensoren der Firma Lufft wird die Wasserhöhe für eine glatte Fahrbahn (Vernachlässigung von Poren) angegeben, analog zum mobilen Sensor MARWIS.

Entsprechende Daten können über den Deutschen Wetterdienst abgerufen werden [78]. Hierbei muss beachtet werden, dass sich die eingesetzten Sensoren in ihrer Auflösungsgüte unterscheiden (0,1 mm oder 1 mm) und diese Daten miteinander vermischt werden. Daher wird im Folgenden (Abbildung 4.2) auf die Darstellung ganzzahliger Millimeter-Werte verzichtet.

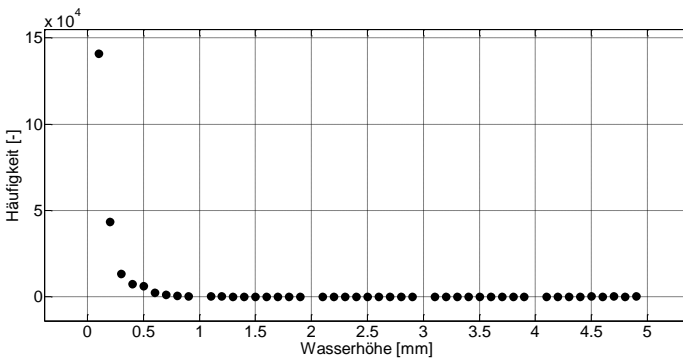


Abbildung 4.2: Häufigkeitsverteilung gemessener Wasserhöhen durch Glättemeldeanlagen in Deutschland (ohne ganzzahlige Millimeter-Werte, Anmerkung im Fließtext).

Wie aus Abbildung 4.2 zu erkennen ist, sind insbesondere kleine Wasserhöhen bis 0,5 mm häufiger vertreten. Höhere Wasserhöhen (größer 1 mm) sind im Bereich der GMA selten vertreten. Mögliche Ursachen hierfür sind die Fahrbahnbedingungen in Sensorumgebung (funktionierende Drainage, keine Spurrillen).

Um ein präziseres Bild vom gesamten Fahrbahnspektrum, zum Beispiel auch auf Landstraßen oder innerorts zu erhalten, wird ein eigener Versuch durchgeführt. Hierfür werden fünf Fahrzeuge für ein halbes Jahr (Winter, Zeitraum Oktober bis April) mit MARWIS Sensoren (vergleiche Kap. 3.2) ausgerüstet und im Berufsverkehr bewegt.

Bei den fünf Fahrzeugen handelt es sich um verschiedene Derivate des Porsche 911 (Typ 991 I). Die Montage des Sensors muss aufgrund des Platzangebots im Kofferraum der Fahrzeuge umgesetzt werden (Abbildung 4.3 und Abbildung 6.6), da eine Platzierung außerhalb der Fahrzeughülle für einen Einsatz auf öffentlichen Straßen in Deutschland nicht zulässig ist.

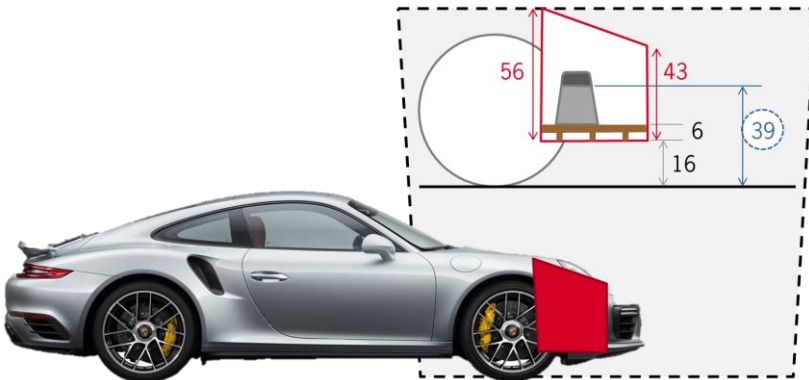


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung Verbau MARWIS Sensor in Fahrzeugflotte. Die Längenangaben sind in cm angegeben.

Der Sensor blickt durch eine geschaffene Öffnung im Kofferraumboden auf einen Fahrbahnabschnitt zwischen linker und rechter Spur kurz vor der Vorderachse. Damit wird vermieden, dass durch die Reifen der Vorderachse der Fahrbahnneigungsgrad beeinflusst wird.

Die folgende Auswertung bezieht sich nur auf Fahrbahnen, die feucht oder nass sind. Hierzu wird als grundlegende Voraussetzung gefordert, dass durch den Sensor eine Wasserhöhe von mindestens 0,02 mm für einen Zeitraum von

5 s oder länger gemessen wird. Damit ergeben sich insgesamt rund 64 Stunden Datenmaterial. Des Weiteren kann eine Unterteilung in die Fahrbahnzustände „Feucht & Nass“ und „Chemisch Nass“ vorgenommen werden. Dabei ist „Chemisch Nass“ wie folgt definiert:

„Chemisch Nass“ – „Die Eisbildung wird durch den Einsatz von Taumitteln verhindert. Die Wasserfilmhöhe liegt auf oder über der Feuchte-Schwelle von 0,02 mm und die Fahrbahntemperatur ist unter 1,5°C“ [53].

Abbildung 4.4 zeigt die Häufigkeit von unterschiedlichen Wasserhöhen in Abhängigkeit vom Fahrbahnzustand. Zu beachten sind die unterschiedlichen Schrittgrößen oberhalb und unterhalb von 1 mm Wasserhöhe. So spiegelt die Häufigkeit bei 2 mm alle Wasserhöhen zwischen 1,5 mm bis 2,5 mm wider.

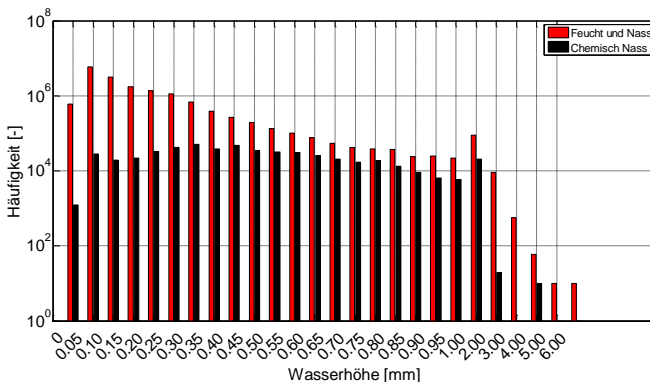


Abbildung 4.4: Häufigkeit von unterschiedlichen Wasserhöhen in Abhängigkeit vom Fahrbahnzustand in logarithmischer Darstellung. Unterschiedliche Schrittweiten bei den Wasserhöhen sind zu beachten!

Wie aus Abbildung 4.4 zu erkennen ist, treten insbesondere Wasserhöhen oberhalb von 1 mm deutlich seltener auf. Des Weiteren ist auch unterhalb von 1 mm eine Abnahme der Auftretishäufigkeiten mit steigender Wasserhöhe zu erkennen. Dieser Trend ist für „Feucht und Nasse“ Fahrbahnen besonders ausgeprägt.

Insgesamt werden während dieser Fahrten 611 Regeleingriffe provoziert, davon 547 ABS-Eingriffe (Anti-Blockier-System), 44 ASR-Eingriffe (Antriebs-Schlupf-Regelung) und 25 ESP-Eingriffe (Elektronisches-Stabilitäts-Programm) mit teilweisen Überlagerungen (weshalb die beiden folgenden Zahlenwerte sich nicht zur Gesamtsumme der Regeleingriffe aufsummieren). 372 Eingriffe finden auf „Feucht und Nasser“ Fahrbahn und 199 auf „Chemisch Nasser“ Fahrbahn statt.

Abbildung 4.5 zeigt die bei diesen Regeleingriffen erreichten globalen Reibungsbeiwerte zwischen Reifen und Fahrbahn, die nach Gl. 3-7 auf den erreichbaren Beschleunigungen beruhen.

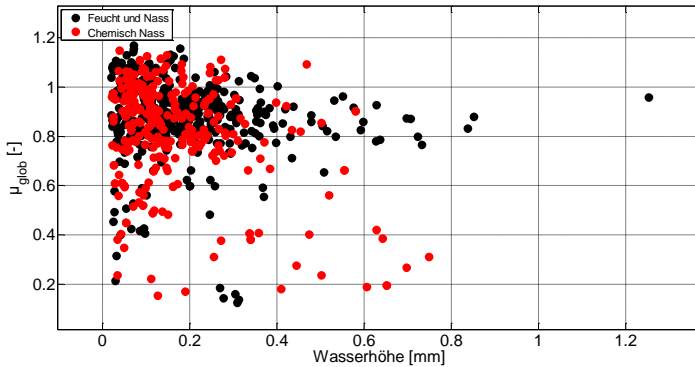


Abbildung 4.5: Globaler Reibungsbeiwert im Regeleingriff bei unterschiedlichen Wasserhöhen und Fahrbahnzuständen.

Zu erkennen ist eine sehr breite Verteilung der Werte um den Bereich 0,7 bis 1,1 sowie der Einfluss des Fahrbahnzustands. Besonders niedrige Werte des Reibungsbeiwerts bei niedrigen Wasserhöhen sind als Ausreißer zu deklarieren. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch [79]. Ein Einfluss der Fahrgeschwindigkeit (nicht dargestellt) auf die hier gezeigten Werte wird im Hauptbereich zwischen 50 km/h bis 150 km/h aufgrund der allgemein breiten Streuung nicht sichtbar.

Trotz einzelner Ausreißer und der angesprochenen Streuung liegen die Mediane der erreichten Beschleunigung bei unterschiedlichen Fahrbahnzuständen jedoch sehr eng beieinander mit 0,886 für „Feuchte und Nasse“ Fahrbahnen und 0,825 bei „Chemisch Nasser“ Fahrbahn.

Aus diesen Untersuchungen ist daher abzuleiten, dass ein System zur Schätzung des Fahrbahnässegrads vor allem in der Lage sein sollte, niedrige (unterhalb von 0,5 mm) Wasserhöhen aufgrund ihrer Häufigkeit und mittlere Wasserhöhen (unterhalb von 1,5 mm) aufgrund ihres starken Einflusses auf den Reibungsbeiwert abgrenzen zu können.

4.3 Berücksichtigung serienrelevanter Anforderungen

Um Technik in serienreifer Massenproduktion entwickeln zu können, müssen zahlreiche Anforderungen berücksichtigt werden. Diese können dabei in einem Zielkonflikt stehen. Bei der konzeptionellen Auslegung eines neuen Systems sollten daher Vorhalte geschaffen werden, die die Erfüllung von Serienanforderungen nach Bestätigung der Konzeptphase ermöglichen.

Es werden hierzu folgende Anforderungen als serienrelevant deklariert und in den Anforderungskatalog für das neue System aufgenommen (die Reihenfolge enthält keine Gewichtung):

1. Größe und Gewicht
2. Style/Sichtbarkeit vor Kunde
3. Kosten (Herstellung und Wartung)
4. Verfügbarkeit und Robustheit
5. Datenverarbeitung (Komplexität und Rechenaufwand)

Einige dieser Punkte sind nicht quantifizierbar.

Größe und Gewicht

Auch wenn Größe und Gewicht quantifizierbar sind, existieren jedoch keine festen Grenzwerte. Generell sollten kompakte Komponenten bevorzugt werden. Die spezifischen Anforderungen richten sich stark nach dem Einbauort, zum Beispiel sollte eine Erhöhung der ungefederten Masse möglichst vermieden werden. Vorhandener Bauraum sollte genutzt werden, bevor zusätzlicher Bauraum geschaffen werden muss.

Style/Sichtbarkeit vor Kunde

Der Einbauort ist auch im Hinblick auf Style und Sichtbarkeit vor Kunde zu bewerten. Hierbei ist zu unterscheiden, wie die jeweilige Technik empfunden wird. Ein variabler Heckspoiler wird von einem Großteil der Kunden als bewusst erlebbare Technik gewünscht und mit dem Style des Fahrzeugs abgestimmt („Form follows Function“). Weniger emotionale Technik, wie zum Beispiel der Stellmotor eines solchen Heckspoilers, ist hingegen verdeckt zu halten

Kosten

Im Bereich der Fahrzeugsicherheit sind Kosten schwer auf den Kunden übertragbar, da sicherheitsrelevante Komponenten nicht optional gegen Aufpreis angeboten werden sollten (im Gegensatz zu einem Navigationssystem oder besonderen Sitzbezügen). Entsprechende Komponenten sollten demnach serienmäßig integriert sein, was den Grundpreis des Fahrzeugs erhöht und damit aus wirtschaftlicher Sicht genau zu prüfen ist. Sicherheit rentiert sich wirtschaftlich durch Ruf und Einfluss auf anerkannte Prüfungen (zum Beispiel: EURO NCAP [80]).

Bei den Wartungskosten ist darauf zu achten, dass Verschleiß und Alterung möglichst gering sind (zum Beispiel: Haltbarkeit über Fahrzeuglebensdauer). Für Wartungsarbeiten sollte außerdem auf die Zugänglichkeit des Systems geachtet werden.

Verfügbarkeit und Robustheit

Um den Nutzen eines Systems im Sicherheitsbereich zu steigern, bedarf es einer entsprechenden Absicherung [81]. Bewertet werden hierbei unter anderem die Güte, Verfügbarkeit und Robustheit einer Funktion beziehungsweise eines Ausgangssignals. Die zu erreichende Güte ist in Kap. 4.2 beschrieben.

Im Falle einer Sicherheitsfunktion richtet sich die Verfügbarkeit darauf, wie häufig und lange die Funktion korrekt arbeiten kann (zum Beispiel: Ausgabe eines Fahrbahnneigungsgrads). Damit ist die Verfügbarkeit von zwei wesentlichen Merkmalen abhängig. Erstens wird die Verfügbarkeit durch das Wirkprinzip in der Auslegung charakterisiert. Zweitens kann die eigene Verfügbarkeit einer Funktion an die Verfügbarkeit anderer Funktionen gebunden sein (benötigte Eingangsgrößen). Als Beispiel für ersteres kann die Reibungsbeiwertschätzung durch ausgenutzte Beschleunigung genannt werden, vergleiche Kap. 3.2. Da bei normaler Fahrweise selten ein Zustand erreicht wird, bei dem die Methode arbeitsfähig ist (nur bei einem Regelsystemeingriff), ist die Verfügbarkeit der Funktion gering.

Funktionen, deren Ausgänge in vielen anderen Funktionen genutzt werden (zum Beispiel: Fahrzeugreferenzgeschwindigkeit), haben daher besondere Anforderungen an ihre Verfügbarkeit. In Bezug auf die eigene Abhängigkeit zu anderen Funktionen sind sie häufig autark gestaltet.

Um die Robustheit einer Funktion zu gewährleisten, müssen alle Einflüsse, insbesondere die Störeinflüsse, auf die Funktion bekannt sein. Im Optimalfall können die Störeinflüsse durch entsprechende Maßnahmen gezielt verringert werden (zum Beispiel: Ausblendung störender Schwingungen durch Entkopplung). Alternativ müssen die Störeinflüsse ebenfalls erfasst und systemseitig ausgeglichen werden (zum Beispiel: Filtern eines geschwindigkeitsabhängigen Rauschens mittels Ausgleichskurven).

Datenverarbeitung

Die Anforderungen an die Datenverarbeitung beziehen sich auf Rechendauer und -kapazität. Dank neuer Technologien steigt zwar die Rechenkapazität auf

modernen Steuergeräten immer weiter, gleichzeitig muss diese Kapazität auf immer mehr neue Funktionen verteilt werden. Es gilt daher eine Funktion nur so präzise wie nötig und so einfach wie möglich zu gestalten. Aufwendige Rechenmethoden können auf Kosten der Genauigkeit durch Vereinfachungen beziehungsweise Approximationen ersetzt werden.

Der Einsatzzweck der Funktion ist ebenfalls bei der Auslegung zu berücksichtigen. Während die Funktionskomponente zum Auslösen eines Airbags in Sekundenbruchteilen arbeiten muss, kann eine Funktion, die auf langsam verändernde Größen reagiert (zum Beispiel: Fahrbahnässegrad), ebenfalls deutlich langsamer arbeiten.

4.4 Zusammenfassung der Anforderungen und Ableitung eines geeigneten Systems

Zusammenfassend werden folgende Anforderungen an das System identifiziert:

1. Kontinuierliche Schätzung des Fahrbahnässegrads
2. Mehrstufiger Auflösungsbereich des Fahrbahnässegrads mit einer Unterscheidung von mindestens vier Klassen:
 - a. Stufe 1: Wasserhöhe 0 mm (trocken)
 - b. Stufe 2: Wasserhöhe 0 – 0,5 mm
 - c. Stufe 3: Wasserhöhe 0,5 – 1,5 mm
 - d. Stufe 4: Wasserhöhe > 1,5 mm
3. Geringe Größe und geringes Gewicht
4. Sensorik unsichtbar verbaut
5. Günstige und einfache Sensorik, gut zugänglich verbaut

6. Hohe Verfügbarkeit und Robustheit

7. Geringe Rechenkapazität ohne spezielle Anforderung an Rechendauer

Aus diesen Anforderungen wird folgendes Konzept abgeleitet: Mittels Körperschallsensorik soll die Wasseraufwirbelung des Reifens an der Vorderachse erfasst und daraus der Fahrbahnneigegrad abgeleitet werden. Es handelt sich damit um ein indirektes Schätzverfahren, das kontinuierlich arbeitet. Die Sensorik wird dabei entweder verdeckt auf der radabgewandten Seite der Radhausschale, an Schweller oder Unterboden verbaut. Dort ist die Sensorik vor Kunde nicht sichtbar. Sie trägt aufgrund von geringem Gewicht vernachlässigbar wenig zu der gefederten Masse des Fahrzeugs bei und nutzt den verfügbaren Bau- raum. Gleichzeitig ist sie wartungsfreundlich zugänglich.

Grundsätzlich ist Körperschallsensorik günstig verfügbar. Verschiedene Sensoren und Anbringensorte werden in Kap. 6 näher beleuchtet.

Eine Diskussion der erreichbaren Güte, Verfügbarkeit und Robustheit in Bezug auf das untersuchte System findet sich in Kap. 7.2.

Die für das untersuchte System gewählte Datenverarbeitung wird in Kap. 6.3 unter Berücksichtigung der hier gestellten Anforderungen diskutiert.

5 Wasseraufwirbelung des Reifens

Rollt ein Reifen über eine nasse Fahrbahn, so wirbelt er Wasser hinter sich auf. Dieser Prozess scheint trivial. Wie sich jedoch bei genauerer Betrachtung zeigt, handelt es sich hierbei um einen komplexen Vorgang, der von diversen Parametern beeinflusst wird.

Innerhalb dieses Kapitels soll daher gezeigt werden, wie eine Untersuchung der Einflussparameter gestaltet werden kann. Dazu werden in einem ersten Schritt die bekannten Grundlagen und Quellen aufgearbeitet (vergleiche Kap. 5.1), auf deren Basis eine Versuchsumgebung geschaffen wird (vergleiche Kap. 5.2). Aus diesen Versuchen können drei Modellvorstellungen abgeleitet werden (vergleiche Kap. 5.3).

Diskussionen und Erkenntnisse aus diesem Kapitel wurden teilweise bereits in [1] veröffentlicht.

5.1 Strömungsmechanische Betrachtung

Für die Ablösung von Wassertröpfchen am Reifen sind zwei physikalische Effekte von zentraler Bedeutung: Oberflächenspannung und Zentrifugalkräfte. Aus dem Zusammenspiel dieser Effekte bestimmt sich die Anzahl und Größe von gelösten Wassertröpfchen.

Bei der Oberflächenspannung σ handelt es sich um eine längenbezogene Kraft.

$$\sigma = \frac{\text{Arbeit}}{\text{neu gebildete Fläche}} = \frac{F * dl}{b * dl} \quad \text{Gl. 5-1 nach [82]}$$

Für Wasser liegt ein typischer Wert der Oberflächenspannung bei 73 mN/m (20° C). Fluidkörper entwickeln das Bestreben, eine möglichst kleine Oberfläche zu besitzen. Im Extremfall ist dies die Kugelform [83].

Aus der statischen Betrachtung der Oberflächenkräfte würden sich rein theoretisch unendlich große Tropfen ergeben. Da sich jedoch Tropfen in endlichen Größen bilden, muss neben der statischen Betrachtung auch ein dynamischer Aspekt berücksichtigt werden. Bei einem nassen, rotierenden Reifen lösen sich Tropfen, wenn die Zentrifugalkräfte nicht mehr von der Oberflächenspannung ausgeglichen werden können. Dies kann durch eine Zunahme der Masse (mehr Wasser sammelt sich im Tropfen) oder Zunahme der Beschleunigung (Reifen dreht sich schneller) geschehen. Daraus ergeben sich je nach Randbedingungen optimale Tropfengrößen.

Im Zusammenspiel mit Festkörpern sind zusätzliche Effekte zu berücksichtigen. Ist die Oberfläche eines Festkörpers mit einem Flüssigkeitsfilm (in diesem Falle Wasser) benetzt, so haftet dieser Film vorerst an der Oberfläche. Dies ist den Adhäsionskräften zwischen Festkörper und Flüssigkeit geschuldet, die in dieser Konstellation die Kohäsionskräfte der Flüssigkeit übersteigen. Im stationären Fall, bei dem sich das Wasser nicht relativ zur Oberfläche bewegt, ist die Adhäsionskraft auch über den sogenannten Kontaktwinkel β beschreibbar [84], siehe Abbildung 5.1.

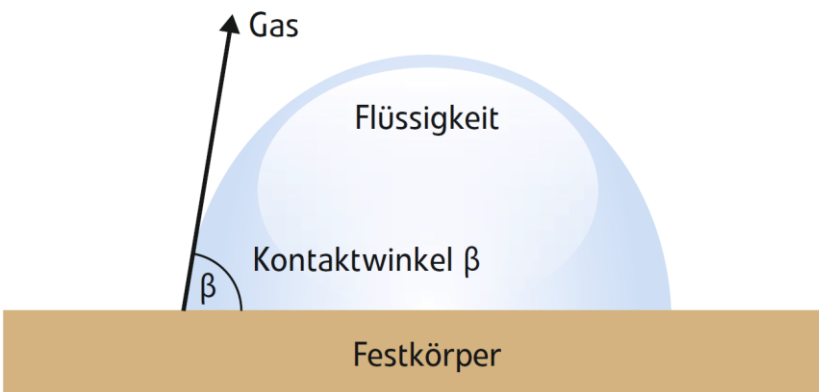


Abbildung 5.1: Darstellung des Kontaktwinkels zwischen Gas, Flüssigkeit und Festkörper nach [84].

Bei sehr großen Kontaktwinkeln ($> 90^\circ$) zieht sich die Flüssigkeit in Richtung Kugelform, welche sich mit größerer Leichtigkeit über die Oberfläche des Festkörpers verschieben lässt. Es wird daher von einer schlechten Benetzung beziehungsweise Benetzbarkeit gesprochen. Mittels Oberflächenbehandlungen kann dieser Effekt gezielt beeinflusst werden, wenn zum Beispiel das rückstandsfreie Abperlen von Flüssigkeiten gewünscht ist (Lotus-Effekt). Die Kohäsion ist in diesem Fall größer als die Adhäsion. Ist der Kontaktwinkel hingegen sehr klein, im Extremfall gegen Null gehend, so handelt es sich um eine sogenannte vollständige Benetzung. In diesem Fall ist die Flüssigkeit zerlaufen [84] und die Kraft durch Kohäsion ist kleiner als die durch Adhäsion. Liegt der Kontaktwinkel zwischen diesen Grenzbereichen, entsteht eine partielle Benetzung.

Wird die Oberfläche des Festkörpers gekippt, läuft das Wasser durch die Schwerkraft zum niedrigsten Punkt des Festkörpers, wo sich das Wasser sammelt. Ist die Ansammlung groß genug, kommt es zu Ablösungen der Flüssigkeit.

Existiert beispielsweise eine kontinuierliche Wasserzufuhr, so kann sich bei entsprechender Menge der Zufuhr auch eine kontinuierliche Ablösung in Form eines zusammenhängenden Stroms ergeben. Wird die Zufuhr verringert, bricht zuerst der ablösende Strom ein und es bilden sich einzelne Bänder (sogenannte Lamellen). Bei weiterer Verringerung der Zufuhr lösen sich diese Bänder auf und es entstehen Tropfen.

Bei der Beschreibung dieses Prozesses kann unter anderem auch die sogenannte Weber-Zahl We behilflich sein. Diese dimensionslose Zahl gibt einen Zusammenhang zwischen der Dichte der Flüssigkeit ρ , der relativen Geschwindigkeit v_{rel} zwischen Tropfen und Umgebung, der charakteristischen Länge l und der Oberflächenspannung σ [85]. Die charakteristische Länge wird in der Fluidmechanik zur Beschreibung einer dreidimensionalen Geometrie verwendet und wird für die Berechnung dimensionsloser Kennzahlen als Länge angegeben. Bei einer Durchströmung eines Rohrs würde beispielsweise

der Innendurchmesser des Rohrs als charakteristische Länge genutzt. Im vorliegenden Anwendungsfall beschreibt die charakteristische Länge den Durchmesser eines Tropfens.

$$We = \frac{\rho * v_{rel}^2 * l}{\sigma} \qquad \text{Gl. 5-2 nach [85]}$$

Anhand der Weber-Zahl und weiterer dimensionsloser Kennzahlen kann beispielsweise bestimmt werden, ob sich die Ablösung der Flüssigkeit als Tropfen, Faden oder Lamelle ergibt oder ob sie zerstäubt, siehe Abbildung 5.2.

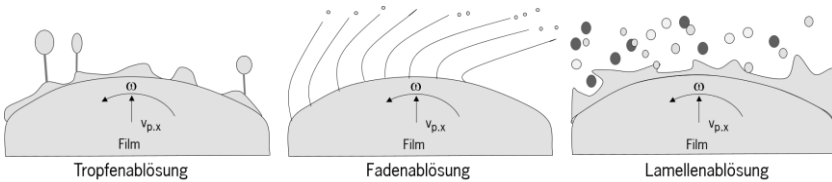


Abbildung 5.2: Allgemeine Ablösemechanismen nach [19].

Experimentell wurden dazu in [19] mit unterschiedlichen Flüssigkeiten die Ablösungen auf einer sich drehenden, horizontal ausgerichteten Scheibe beobachtet und verschiedene Zusammenhänge abgeleitet, siehe Abbildung 5.3

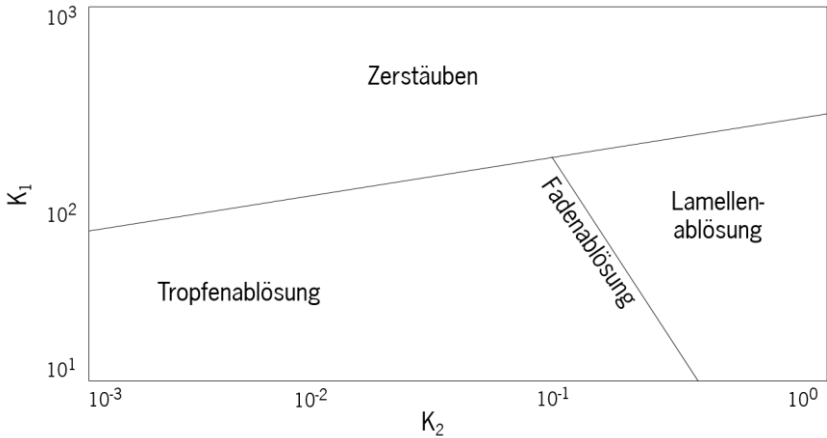


Abbildung 5.3: Experimentell ermittelte Zusammenhänge zwischen Tropfenablösung, Zerstäubung und Lamellenablösung in Abhängigkeit verschiedener Kenngrößen nach [19].

Die Kennzahlen K_1 und K_2 setzen sich dabei wie folgt zusammen:

$$K_1 = \frac{\omega * \rho^{0,069} * d_s^{0,578} * \sigma^{0,053}}{g^{0,491} * \eta^{0,12}} \quad \text{Gl. 5-3 nach [19]}$$

$$K_2 = \frac{Q_{zu} * \rho^{0,675} * \eta^{0,501} * g^{0,295}}{\sigma^{0,915} * d_s^{1,03}} \quad \text{Gl. 5-4 nach [19]}$$

η

Dynamische Viskosität des Fluides

d_s

Scheibendurchmesser

Q_{zu}

Zugeführter Volumenstrom

Dynamisch gesehen ist damit K_1 maßgeblich von der Drehgeschwindigkeit der Scheibe und K_2 maßgeblich vom zugeführten Volumenstrom abhängig. Damit lässt sich aus Abbildung 5.3 schließen, dass eine Veränderung der Drehgeschwindigkeit und somit der Ablösegeschwindigkeit ausschließlich eine Veränderung entlang der y -Achse und eine Veränderung des Volumenstroms ausschließlich eine Veränderung entlang der x -Achse hervorrufen.

Hat sich die Flüssigkeit gelöst und befindet sich im Flug, so kommt es zum weiteren Zerfall der Struktur. Dabei werden je nach Ausgangssituation (Lamelle, Tropfen oder Faden) unterschiedliche Zerfallmechanismen aktiv, die ebenfalls durch die Weber-Zahl beschrieben werden können [86]. Im Falle von Tropfen kann es zu einem Blasenzerfall (niedrige Weber-Zahlen), Keulenzfall (mittlere Weber-Zahlen) oder Scheibenzerfall kommen (hohe Weber-Zahlen, Oberflächenspannung untergeordnet) [86]. Das Ergebnis aller Zerfallsvorgänge sind kleinere Tropfen (Sekundärtropfen). Der Zerfall kann so häufig auftreten, bis eine finale Tropfengröße erreicht wird, ab der kein weiterer Zerfall mehr möglich ist. Diese Größe ist abhängig von den Startbedingungen der Ablösung [87, 88].

Treffen Tropfen auf eine feste Oberfläche, so kann auch hier mit Hilfe der Weber-Zahl die Reaktion beschrieben werden. Neben der Weber-Zahl spielen weitere Randbedingungen wie Tropfengeschwindigkeit und –größe, Winkel des Aufpralls, Eigenschaften der Flüssigkeit (zum Beispiel: Oberflächenspannung) und womöglich vorhandene Benetzung der getroffenen Oberfläche ebenfalls eine Rolle [86], siehe Abbildung 5.4.

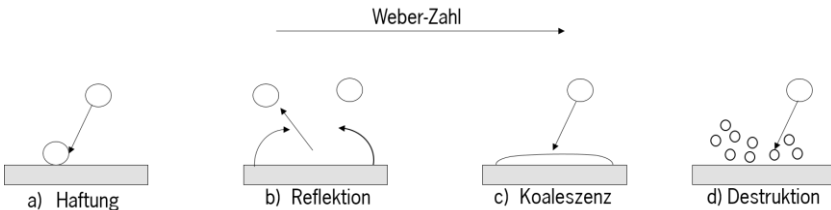


Abbildung 5.4: Aufprallmechanismen in Abhängigkeit von der Weber-Zahl nach [86].

Bei geringer Aufprall-Energie verbleibt der Tropfen in seiner Form und haftet auf der Oberfläche. Ist bereits ein Wasserfilm auf dem Festkörper, kann es auch zu einer Reflektion kommen, bei der der Tropfen mit geringem Energie- und Masseverlust wieder von der Oberfläche abprallt. Mit steigender Aufprall-Energie kommt es zu einer Koaleszenz, der Tropfen benetzt die Oberfläche dabei unter einem flachen Kontaktwinkel und zerläuft. Dieser Mechanismus ist nur in einem bestimmten Weber-Zahl-Bereich möglich. Bei größeren Weber-Zahlen zerplatzt der Tropfen hingegen in mehrere kleinere Tropfen (Destruction). Ist ein Wasserfilm auf dem Festkörper, können sich durch den Einschlag auch Partikel daraus lösen [89, 90].

Übertragung auf den Reifen

Werden die bis hierhin erläuterten Mechanismen auf die Wasserabschleuderung eines Reifens übertragen, lassen sich Parallelen finden. Ein Reifen mit glatter Oberfläche (zum Beispiel: Slick Reifen) sei mit einem Wasserfilm benetzt. Dann fließt bei einem ruhenden Reifen ein Großteil des Wassers zu dem am tiefsten gelegenen Punkt, während ein dünner Film auf der restlichen Oberfläche verbleiben kann. Der Kontaktwinkel zwischen Gummi und Wasser liegt demnach im Bereich zwischen 0° und 90° . Je nach verfügbarer Wassermenge am Ablösepunkt bildet sich die Ablösung als zusammenhängender Strom oder in einzelnen Tropfen aus. Das bedeutet, dass die Wassermenge, die entlang des gesamten Reifens verfügbar ist, eine Rolle für die Abschleuderung spielt.

Dreht sich zusätzlich der Reifen, entstehen neben der Schwerkraft weitere Kräfte, die an dem Flüssigkeitsfilm zerren. Die dabei wichtigste Kraft ist die Zentrifugalkraft, siehe Gl. 3-14. Bei einem dynamischen Radhalbmesser von 0,34 m (20“ Bereifung) ist bereits bei einer Rollgeschwindigkeit von 6,6 km/h die Fliehkraft größer als die Schwerkraft. Mit einer steigenden Fliehkraft werden zwei zentrale Effekte bedient. Zum einen wird der Wasserfluss im Film entlang der Reifenoberfläche gefördert, so dass das Wasser schneller zu den Sammelpunkten fließen kann und sich ablöst. Darüber hinaus kann durch die erhöhte kinetische Energie mehr Arbeit zur Überwindung der Oberflächenspannung aufgebracht und somit kleinere Tröpfchen gebildet werden.

Für eine detailliertere Darstellung der strömungsmechanischen Zusammenhänge sei an dieser Stelle auf [91] verwiesen.

5.2 Versuch

Die bekannten Versuche zur Wasseraufwirbelung des Reifens beziehen sich vornehmlich auf zwei Themenbereiche, erstens Verringerung der Sichtbehinderung durch Wasseraufwirbelung mittels Schmutzfänger bei LKW [92 bis 101] oder PKW [102 bis 104] und zweitens bezüglich Eigenverschmutzung von Fahrzeugen [91, 105, 106]. Darüber hinaus gibt es Arbeiten, die sich außerhalb der genannten Themenbereiche mit der Wasseraufwirbelung beschäftigen [66, 70, 107 bis 110].

5.2.1 Bekannte Versuchsaufbauten

Die großen Herausforderungen bei Versuchen zur Wasseraufwirbelung sind konstante, einstellbare Randbedingungen und die verwendete Messtechnik. Die jeweiligen Umsetzungen orientieren sich an Anwendungsfall und Stand der Technik zum jeweiligen Zeitpunkt der Versuche.

Für die Randbedingungen wird zwischen Versuchen auf der Straße und auf dem Prüfstand unterschieden. Die Versuche auf der Straße können dabei wiederum in die Bereiche öffentlich und privat getrennt werden. Auf öffentlichen Straßen herrschen die „realen“ Bedingungen, wohingegen auf privaten Straßen (Prüfgebieten) auch künstliche Bedingungen eingestellt werden können. Daraus ergeben sich die jeweiligen Vor- und Nachteile. Eine private Straße ist in der Regel ein Nachbau einer öffentlichen Straße, die jedoch nicht denselben Einflüssen ausgesetzt ist (zum Beispiel: Verkehrslast und daraus entstehender Verschleiß). Vorteil gegenüber der öffentlichen Straße ist die teilweise Einstellmöglichkeit von Randbedingungen. Als konkretes Beispiel kann ein Prüfgebiet (in Teilen) bewässert werden, wohingegen bei einer öffentlichen Straße auf Niederschlag gewartet werden muss.

Dem gegenüber stehen Prüfstandsversuche, die als eine weitere Spezialisierung eines Prüfgeländes gesehen werden können. Zum Einsatz kommen beispielsweise Windkanäle oder verschiedene Reifenprüfstände.

Als Messtechnik finden die unterschiedlichsten Methoden und Systeme Verwendung. So nutzt [104] bei Versuchen auf der Straße einen Kastenaufbau hinter dem Reifen. Nach Beendigung einer Messfahrt wird der Inhalt der jeweiligen Kästen durch Wiegen analysiert. Bei anderen Straßenversuchen, insbesondere auf Prüfgeländen für LKW-Versuche, kommen stationäre Laser und Kameras zum Einsatz, die die seitliche Gischausprägung der LKW analysieren (zum Beispiel: [98, 101]). Hierfür existiert eine Richtlinie der SAE (J2245) [111].

(Hochgeschwindigkeits-) Kameras werden auch im mitbewegten System auf der Straße (zum Beispiel: [70]) oder am Prüfstand (zum Beispiel: [110]) eingesetzt, wohingegen Laser ausschließlich am Prüfstand zum Einsatz kommen (zum Beispiel: [91], siehe Abbildung 5.5).

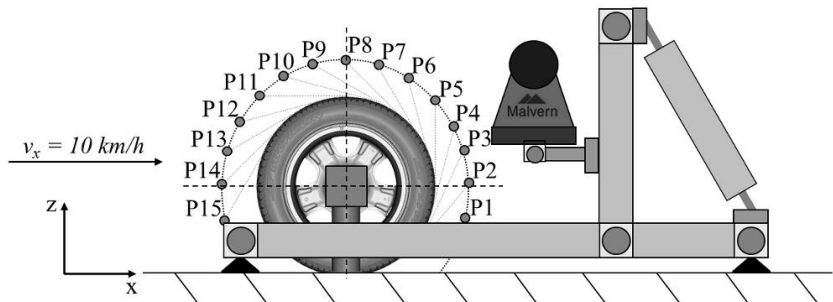


Abbildung 5.5: Lasermesstechnik Malvern [112] im Windkanal des FKFS [91].

Mit Hilfe dieses Aufbaus können die abgeworfenen Wassermengen an den 15 markierten Stellen erfasst werden. Aufgrund der sperrigen Montagevorrichtung kann diese Messtechnik nur bei Außentrommeln oder Flachbändern wie zum Beispiel im Windkanal zum Einsatz kommen.

Einen weiteren Sonderaufbau zur Untersuchung von Wasseraufwirbelungen zeigt Abbildung 5.6, bei dem zwei Reifen aufeinander abrollen und von oben eine Wasserzufuhr eingerichtet ist. Einer der beiden Reifen ist ein Slick, der andere besitzt nur eine einzige Profilirille. Der Fokus dieses Aufbaus richtet sich auf die Ablösemeechanismen innerhalb einer Rille, in die Wasser von oben herabfällt.

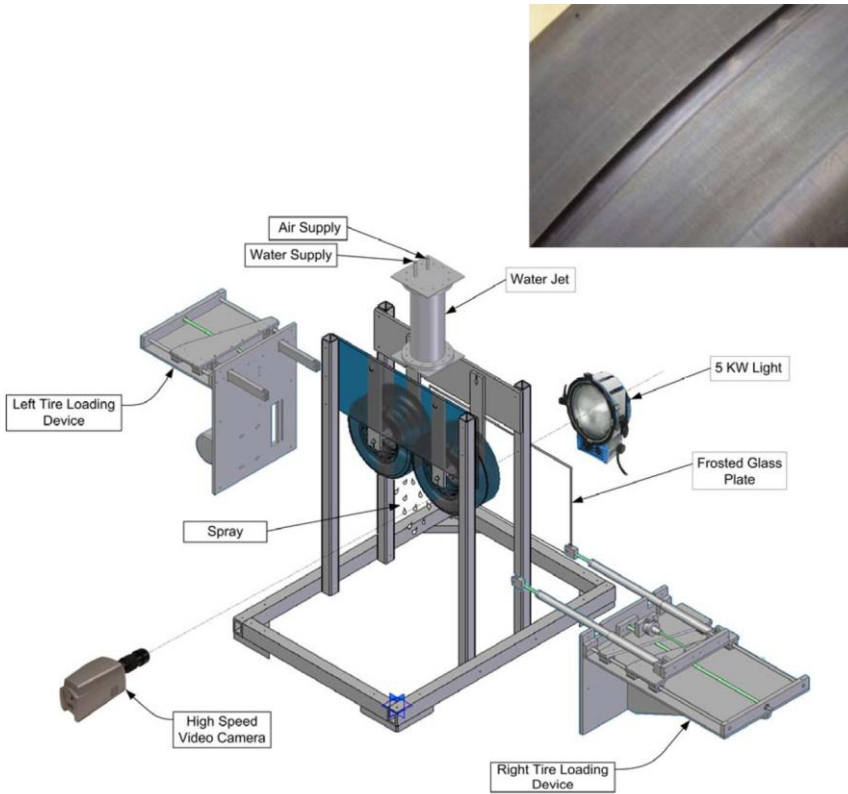


Abbildung 5.6: Reifenprüfstand mit zwei aufeinander abrollenden Reifen. Ausschnitt rechts oben: Reifen mit einer einzigen Profilirille nach [110].

5.2.2 Bekannte Erkenntnisse und offene Fragen

Im Folgenden werden die bekannten Erkenntnisse der Versuche aus Kap. 5.2.1 zusammengefasst und anschließend die noch offenen Fragen hervorgehoben.

Zusammenfassung der bekannten Erkenntnisse zur Wasseraufwirbelung

Aus den vorgestellten Versuchsaufbauten sind verschiedene Erkenntnisse zur Wasseraufwirbelung eines Reifens bereits bekannt, die jeweils von mehreren Quellen (siehe oben) bestätigt wurden und im Folgenden auszugsweise und stichpunktartig aufgelistet werden sollen.

- Es gibt verschiedene Ablösebereiche/Aufwirbelungen am Reifen, siehe Abbildung 5.7. Anmerkung: Die Benennungen „Tröpfchengischt“ und „Schwallgisch“ werden mangels vorheriger eindeutiger Benennung im Rahmen dieser Arbeit erstmals eingeführt.

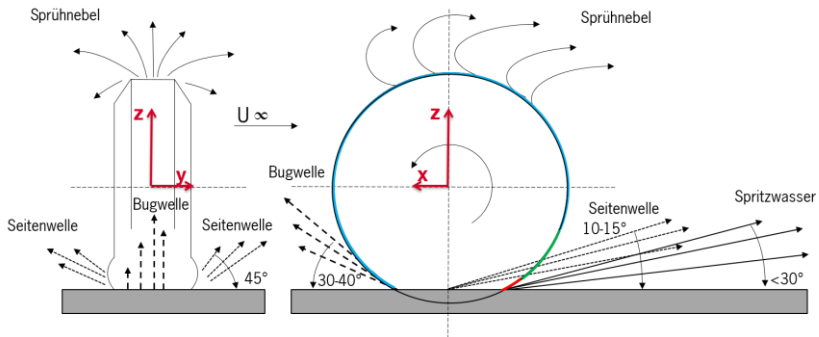


Abbildung 5.7: Ablöse-/Aufwirbelungsbereiche am Reifen nach [1 bis 3, 86, 103]. Blauer Bereich: Tröpfchengischt (vergleiche Kap. 5.3.1). Roter Bereich: Schwallgisch (vergleiche Kap. 5.3.2). Grüner Bereich: Totzone. Außerdem seitliche und frontale Verdrängung (vergleiche Kap. 5.3.3).

Ein Großteil des Wasserfilms auf dem Reifen löst sich bereits als Band unter einem sehr flachen Winkel (Schwallgisch, vergleiche Kap. 5.3.2). Entlang des

restlichen Reifenumfangs kommt es zu tropfenförmigen Ablösungen (Tröpfchengischt, vergleiche Kap. 5.3.1). Dazwischen kann es in einem Übergangsbereich zu einem Einbruch der Ablösungen kommen (Totzone). Außerdem kann es zu seitlichen und frontalen Verdrängungen kommen (vergleiche Kap. 5.3.3).

- Entlang des Reifenumfangs (Tröpfchengischt) verringert sich die Größe der Tropfen.
- Mit zunehmender Geschwindigkeit nimmt die Größe der Tropfen in der Tröpfchengischt ab.
- Mit zunehmender Geschwindigkeit ändert sich das Ablöseverhalten der Schwallgischt, siehe Abbildung 5.8.

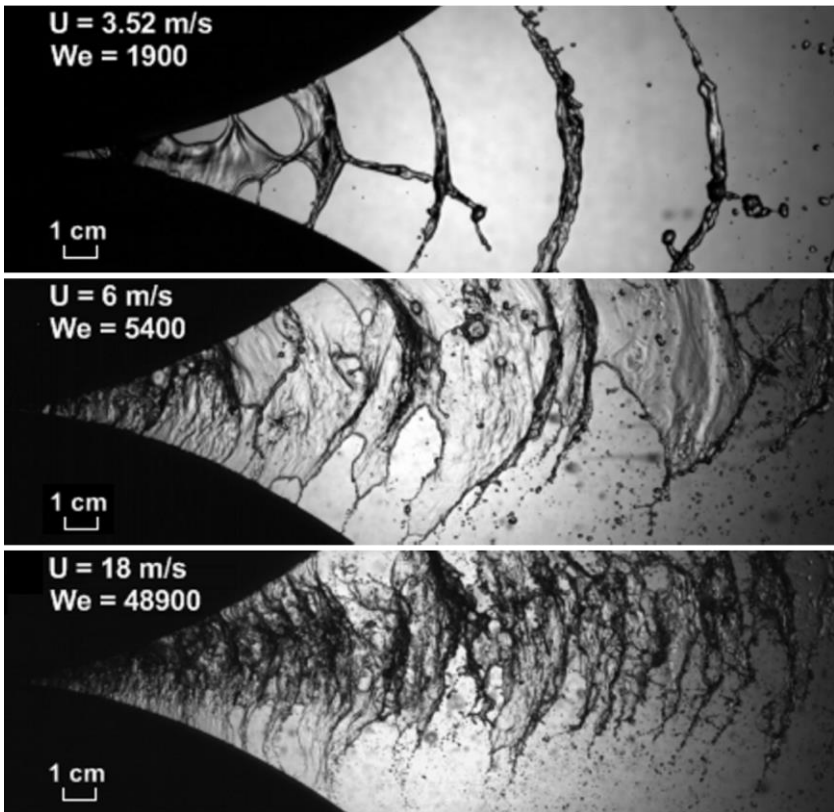


Abbildung 5.8: Ablöseverhalten der Schwallgicht in Abhängigkeit von Geschwindigkeit (hier U) und Weber-Zahl (charakteristische Länge hier: Rillenbreite) nach [108], Prüfstand siehe Abbildung 5.6). Bewegung des Wassers von links nach rechts.

Abbildung 5.8 zeigt Aufnahmen des Prüfstands aus Abbildung 5.6. In Abhängigkeit von der Drehgeschwindigkeit des Reifens (hier U) ändert sich das Ablöseverhalten. Bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten (Abbildung 5.8 oben) ist zu erkennen, dass sich das Wasser periodisch in Fäden löst, die möglichst lange an den Aufspannpunkten (Oberfläche des oberen und unteren Reifens) haften. Bei dieser niedrigen Geschwindigkeit überwiegt der Einfluss der Oberflächenspannung. Dieser Effekt ist auch in Abbildung 5.9 zu erkennen.

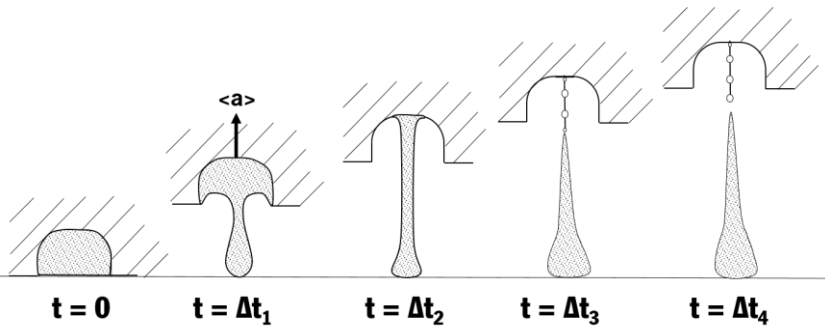


Abbildung 5.9: Ablösung von Wasser aus einer Profilirille bei Abhebung des Reifens von der Fahrbahn nach [110] in der y-z-Ebene des Reifens.

Im weiteren Verlauf der Ablösung (Abbildung 5.8 oben, rechts) ist das Aufbrechen der Fäden in Tropfen zu erkennen.

Bei höheren Geschwindigkeiten (Abbildung 5.8 mittig und unten) erhöht sich der Einfluss der Trägheitskräfte. Dies führt dazu, dass die Fadenstruktur in der Mitte aufbricht und in eine Netzstruktur übergeht. Durch die höheren Geschwindigkeiten steigt auch die periodische Anzahl der Fäden (erkennbar im Bereich der Reifenoberflächen). Die bei höheren Geschwindigkeiten später aus der Netzstruktur entstehenden Tropfen sind deutlich kleiner als die aus Fäden entstehenden Tropfen bei der niedrigen Geschwindigkeit. Außerdem gilt:

- Der Winkel, unter dem sich die Schwallgisch löst, ändert sich nicht mit der Geschwindigkeit und ist in der Regel $< 30^\circ$.
- Der Winkel, unter dem sich die Schwallgisch löst, ist abhängig vom Übergang des eingefederten Reifenlatsches in die Ausgangslage des Reifens und ist somit unter anderem abhängig von Luftdruck und Radlast.
- Die Tropfen in der Tröpfchengisch verlassen den Reifen tangential.

- Es gibt eine Mindestgeschwindigkeit, unterhalb derer sich keine Tropfen vom Reifenumfang lösen. Diese liegt ungefähr bei 25 km/h.
- Die Größe der benetzten Reifenoberfläche hat Einfluss auf die Menge der Aufwirbelung (beispielsweise erhöhen Rillen die benetzbare Reifenoberfläche).
- Die Wassermenge, die hinter dem Reifen aufgewirbelt wird (beide Gischttypen), ist durch das interne Aufnahmevolumen des Reifens (Wasseraufnahme in Rillen, siehe 2.2.3 und 5.3.3) begrenzt.
- Die seitliche und frontale Verdrängung setzt erst ein, wenn ein geschlossener Wasserfilm auf der Fahrbahn vorhanden ist.
- Steigt der Fahrbahnneigungsgrad weiter, nachdem bereits die interne Aufnahme erschöpft ist, nehmen seitliche und frontale Verdrängung schlagartig zu.
- Die Geschwindigkeit der Wasserpartikel in der seitlichen Verdrängung hängt vom Druck im Reifenlatsch und der Fahrgeschwindigkeit ab.

Offene Fragen zur Wasseraufwirbelung

Die vorangegangenen Untersuchungen bieten eine sehr gute Grundlage, aus eigenen Vorversuchen bleiben jedoch einige Fragen offen. Diese sollen im Folgenden aufgeführt werden.

Einfluss der Wasserhöhe auf der Fahrbahn

Die Wasserhöhe auf der Fahrbahn beziehungsweise der Fahrbahnneigungsgrad wird in den genannten Quellen nicht ausreichend für den Anwendungsfall dieser Arbeit beschrieben. Es werden zwar teilweise unterschiedliche Wasserhöhen betrachtet, jedoch liegen diese nicht in dem in Kap. 4.2 identifizierten relevanten Auflösungsbereich.

Einfluss Reifenparameter

Insbesondere die Reifenprofilgeometrie (zum Beispiel: Sommer-/Winterreifen) kann stark variieren und muss nach den Grundlagen aus Kap. 5.1 einen nicht vernachlässigbaren Einfluss haben. Darüber hinaus sollen auch Variationen der Radlast und des Luftdrucks betrachtet werden.

Einfluss Geschwindigkeit

Auch wenn die Einflüsse der Geschwindigkeit grundsätzlich bekannt sind, wird die Geschwindigkeit ebenfalls variiert, um mögliche Querverbindungen zu anderen oben genannten Einflüssen zu identifizieren.

5.2.3 Versuchsaufbau, Messplan und Messablauf

Aus den offenen Fragen aus Kap. 5.2.2 und den bekannten Versuchsaufbauten aus Kap. 5.2.1 wird nun ein geeigneter Aufbau sowie die Versuchsdurchführung in Form von Messplan und Messablauf abgeleitet [1].

Versuchsaufbau

Zur Beantwortung der oben genannten offenen Punkte wird eine Versuchsumgebung benötigt, die insbesondere unterschiedliche Wasserhöhen auf der Fahrbahn reproduzierbar abbilden kann. Da keine freizugänglichen Prüfgelände über die Möglichkeit verfügen, dieser Anforderung gerecht zu werden, fällt die Wahl auf einen Laboraufbau, genauer gesagt einen Innentrommelprüfstand [113]. Auch wenn die Bewässerung auf einem Innentrommelprüfstand nicht vollumfänglich den Gegebenheiten auf einer realen Fahrbahn entspricht [22], bietet ein solcher Prüfstand doch die am besten geeignete Versuchsumgebung. Im Gegensatz zu einer Außentrommel erlaubt die Innentrommel die Ausbildung eines stabilen Wasserfilms bei höheren Wasserhöhen (bis zu 4 mm).

Im Vergleich zu realen Fahrbahnen auf öffentlichen Straßen müssen zwei Abstriche hingenommen werden. Erstens kommt es durch die Innentrommel, auf der sich der Wasserfilm bewegt, zu einer Anpresskraft des Wasserfilms auf die

Trommel. Während also ein Wasserfilm auf der Straße nur die Erdbeschleunigung erfährt, wird der Wasserfilm in der Trommel mit einer geschwindigkeitsabhängigen Fliehkraft-Komponente beaufschlagt. Durch die großen Unterschiede der Radien von Trommel und Reifen (1,9 m zu 0,3 m) entsteht ein dynamisch konstanter Proportionalitätsfaktor von ungefähr 6,3. Es wäre somit denkbar, dass Wasserablösungen tendenziell geringer (allgemein) oder flacher (nur bei Schwallgisch) ausfallen könnten.

Zweitens wird für diese Versuchsreihe auf der Innentrommel ein spezieller Belag (Safety Walk) verwendet, der sich in Bezug auf Drainage und Makrorauigkeit nicht unbedingt mit einem gängigen Asphaltbelag auf öffentlicher Straße vergleichen lässt. Dieser spezielle Belag wird jedoch benötigt, um Geschwindigkeiten oberhalb von 150 km/h mit der Trommel zu erreichen. Die Wechselwirkungen zwischen Reifen, Fahrbahn und Zwischenmedium könnten somit abweichen (zum Beispiel: Wasser wird bei Überrollung von normalem Asphalt in dessen Poren gedrückt und/oder kann nach Überrollen aus Poren gesogen werden, bei Safety Walk gibt es deutlich weniger Poren).

Aufgrund dieser Gegebenheiten haben die erarbeiteten Prüfstandsergebnisse nur vergleichenden Charakter zwischen unterschiedlichen Randbedingungen, was jedoch zur Beantwortung der im Rahmen dieser Arbeit zu untersuchenden Fragestellungen ausreichend ist.

Die zum Einsatz kommende Messtechnik besteht aus Prüfstandsmesstechnik und Kameras. Die Prüfstandsmesstechnik erlaubt unter anderem eine Bestimmung der Wasserhöhe (kapazitiv), der Trommelgeschwindigkeit, der Umfangsgeschwindigkeit des Rades (falls das Rad angetrieben oder gebremst wird) sowie der Kräfte und Momente in der Radaufhängung.

Drei der vier verwendeten Kameras sind sogenannte „Action-Cams“ [114], die insbesondere im Freizeitsektor Anwendung finden. Diese werden mit einer Bildaufnahmerate von 120 FPS (Frames per Second) betrieben und liefern hier Farbaufnahmen in einer Auflösung von 720p. Die vierte Kamera, eine Hochgeschwindigkeitskamera, liefert schwarz-weiß Aufnahmen mit einer Auflösung von 1280x1024 Pixeln bei 500 FPS [115].

Abbildung 5.10 zeigt den Prüfstands Aufbau in CAD und Bild mit den jeweiligen Kamerapositionen. Durch die hohe Bildaufnahme rate der Hochgeschwindigkeitskamera wird eine sehr helle Umgebung benötigt, die mittels einer diffusen LED-Hintergrundbeleuchtung realisiert wird.

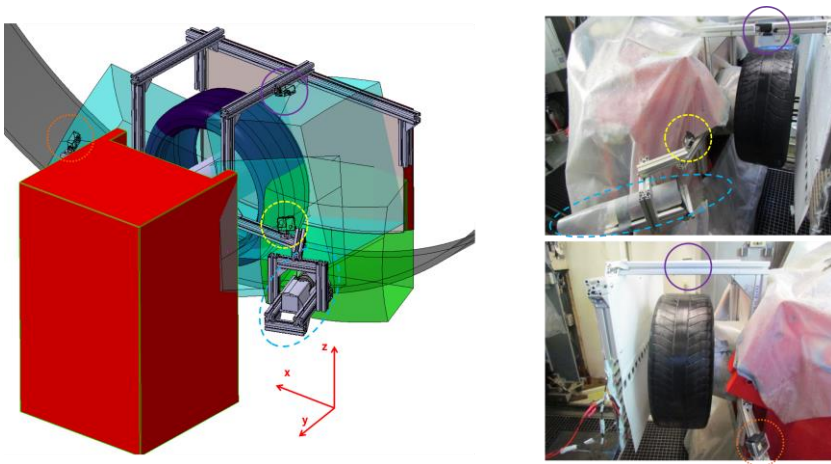


Abbildung 5.10: Innentrommelprüfstand mit Anbau für Kameras und Beleuchtung. Links: CAD-Zeichnung inklusive Sichtbereiche der einzelnen Kameras nach [1, 116]. Rechts: Bilder des realen Prüfstands. Kamerapositionen sind durch die farblichen Markierungen hervorgehoben (Action-Cams orange, gelb und violett, Hochgeschwindigkeitskamera hellblau).

Die Positionen der Kameras sind so gewählt, dass eine Kamera das Ablöseverhalten in y-Richtung über der Reifenbreite (violett), eine Kamera Effekte der frontalen und seitlichen Verdrängung am Reifeneinlauf (orange) und zwei Kameras die Aufwirbelung hinter dem Reifen am Reifenauslauf (Schwallgisch gelb und Tropfengisch hellblau) bewerten sollen. Beispielhafte Aufnahmen sind in Abbildung 5.11 dargestellt.

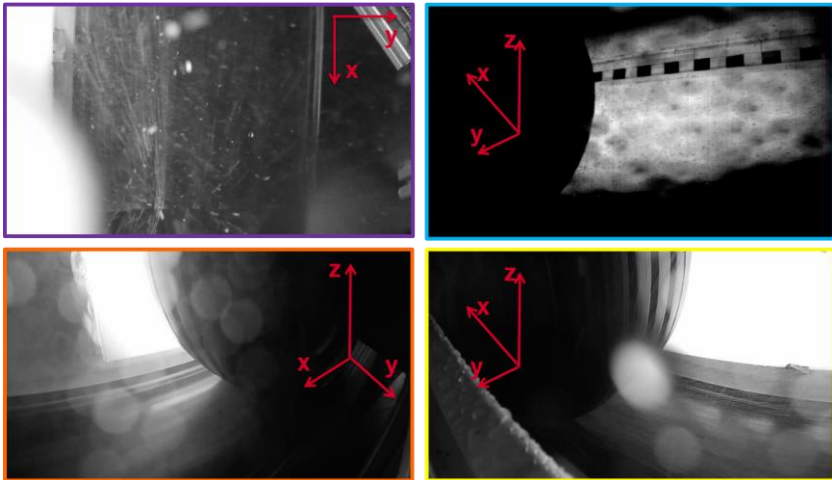


Abbildung 5.11: Beispielaufnahmen der verschiedenen Kameras [1]. Die farblichen Umrandungen markieren die jeweilige Position, siehe Abbildung 5.10.

Ein Nachteil dieses Aufbaus ist die Verschmutzung der Linsen durch Wassertropfen. Aus platztechnischen Gründen ist eine andere Gestaltung nicht möglich.

Für eine detailliertere Beschreibung zum Versuchsaufbau sei auf [116] verwiesen.

Messplan

Der Hauptfokus der Untersuchungen liegt auf den Einflüssen von Geschwindigkeit und Wasserhöhe. Daher werden hier sehr viele Einzelmessungen durchgeführt. Den zugehörigen Messplan zeigt Abbildung 5.12.

Reifen 1		Pirelli 245 35 R20													
t = 8 mm		p = 2,2 bar													
		Fz = 4000 N													
Nr.		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	v	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
	h	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
2	v	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
	h	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
3	v	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
	h	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
4	v	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
	h	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
5	v	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
	h	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
6	v	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
	h	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
7	v	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
	h	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
8	v	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
	h	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
9	v	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
	h	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
10	v	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
	h	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	v	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
	h	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
12	v	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
	h	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

v [km/h]; h [mm]

Abbildung 5.12: Messplan nach [116]. Mögliche Variationen von Wasserhöhe und Geschwindigkeit. Um die Variantenvielfalt einzugrenzen, werden nur grün hinterlegte Messpunkte untersucht.

Die grün hinterlegten Messpunkte werden für jeden Reifen getestet. Geschwindigkeiten unterhalb 40 km/h und Wasserhöhen größer als 2 mm sind nicht möglich, da dort kein stabiler Wasserfilm gebildet werden kann. Geschwindigkeiten oberhalb von 140 km/h sind durch die Kameras nicht mehr sinnvoll interpretierbar.

Die standardmäßigen Randbedingungen, für die ein Messplan wie Abbildung 5.12 gilt, sind eine Radlast von 4000 N (Leergewicht inkl. Fahrer, Porsche 911, Typ 991 II Carrera 4) und ein Luftdruck von 2,2 bar (Serienvorgabe Komfortluftdruck).

Darüber hinaus werden für Radlast und Luftdruck jeweils zwei weitere Zustände eingestellt (Radlast 3800 N und 4800 N, Luftdruck 1,7 bar und 2,7 bar). Diese Variationen werden für die Wasserhöhen 0,5 mm, 1,0 mm und 2,0 mm mit den Geschwindigkeiten von 40 km/h, 60 km/h und 80 km/h untersucht.

Insgesamt kommen vier verschiedene Reifen zum Einsatz, zwei Sommerreifen (Pirelli P Zero 245/35 R20) und zwei Winterreifen (Michelin Pilot Alpin 245/35 R20), siehe Abbildung 5.13. Jeweils einer der beiden Saisonreifen ist neuwertig und der andere künstlich verschlissen, siehe Tabelle 5.1.



Abbildung 5.13: Genutzte Reifen [1]. Oben links: Michelin 20“ Winter neu (Mi20Wi_neu). Oben rechts: Michelin 20“ Winter verschlissen (Mi20Wi_worn). Unten links: Pirelli 20“ Sommer neu (Pi20So_neu). Unten rechts: Pirelli 20“ Sommer verschlissen (Pi20So_worn).

Tabelle 5.1: Restprofiltiefe der verschlissenen Reifen.

Reifen	Restprofil innen	Mitte	Außen
Pirelli	1,1 mm	2,5 mm	3,3 mm
Michelin	0,75 mm	0 mm	1,0 mm

Die Variationen von Radlast und Luftdruck werden nur mit den neuen Reifen getestet.

Messablauf

Nachdem mittels Prüfstandsteuerung die gewünschten Randbedingungen eingestellt wurden, werden die Kameras für eine Aufzeichnung von ungefähr 10 Sekunden angesteuert. Während die Daten gespeichert werden, wird der nächste Betriebspunkt am Prüfstand eingestellt.

5.2.4 Auswertungsmethodik

Die Auswertung der Videodaten findet auf zwei Arten statt [1]. Die Daten der Action-Cams werden subjektiv ausgewertet. Hierfür werden Aufnahmen unterschiedlicher Randbedingungen hintereinander angesehen und Abweichungen notiert. Aufgrund der stark variierenden Bildinhalte ist diese Vorgehensweise sinnvoll, siehe Abbildung 5.11 oben links, unten links und rechts.

Für die Daten der Hochgeschwindigkeitskamera wurde in [116] eine objektive Auswertungsmethode entwickelt, die anschließend in [117] verfeinert und automatisiert wurde. Ziel der Methode ist die Auswertung der Kameradaten in Bezug auf Tropfengröße und -anzahl in Abhängigkeit von den Randbedingungen. Dafür müssen die Aufnahmen gleicher Randbedingungen Bild für Bild und hierbei wieder Pixel für Pixel automatisiert analysiert werden. Diese Methode wird im Folgenden vorgestellt.

Durch die Hintergrundbeleuchtung werden Tropfen als schemenhafte Schatten wahrgenommen, die sich von der helleren Umgebung absetzen, siehe Abbildung 5.11 oben rechts. Tropfen können somit über eine Helligkeitsschwelle bestimmt werden. Dazu wird jeder Pixel im Bild auf seine Helligkeit überprüft und nach lokalen Extrema (Minima) gesucht. Diese stellen die Zentren der einzelnen Tropfen dar. Von diesen Zentren werden schrittweise die Helligkeitswerte aller angrenzenden Pixel analysiert. Abbildung 5.14 zeigt die Vorgehensweise des Algorithmus am Beispiel von zwei beieinander liegenden Tropfen.

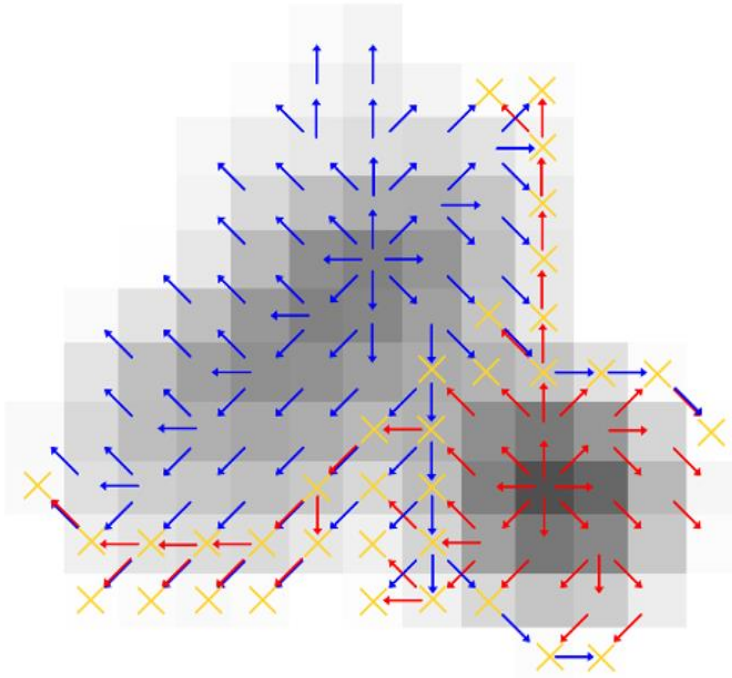


Abbildung 5.14: Tropfenerkennungsalgorithmus [1, 117]. Zwei lokale Extrema markieren die Zentren zweier naheliegender Tropfen (rote und blaue Quelle). Von dort werden schrittweise angrenzende Pixel überprüft und dem nächstgelegenen Zentrum zugeordnet.

Von den lokalen Extrema (Minima) in blau und rot geht der Algorithmus die angrenzenden Pixel ab und prüft, ob die Helligkeitsschwelle überschritten wird. Dies geschieht beispielsweise nach links oben und rechts unten. Liegen sich wie in diesem Beispiel zwei Tropfen so nah, dass zwischen diesen Tropfen keine Pixel eine Helligkeit oberhalb der Helligkeitsschwelle aufweisen und demnach keine Abgrenzung der Tropfen über dieses Kriterium erfolgt, wird

diese Überlappung über ein Nebenkriterium aufgelöst. Hierbei werden Tropfen dem jeweils nächstgelegenen Zentrum zugeordnet. Die gelben Kreuze markieren die erkannten Tropfengrenzen.

Die Größe der Tropfen wird über die Anzahl der Pixel ermittelt, die einem Tropfen zugeordnet werden. Die Korrelation zwischen Pixelgröße und realem Abstand wird mit Hilfe der Messskala auf der LED-Hintergrundbeleuchtung realisiert, siehe Abbildung 5.15 links. Aufgrund der leichten Schiefstellung der Kamera ist die Umrechnung zwischen Pixelgröße und realem Abstand abhängig von der Position des Pixels im Bild. Daher wird ein Skalierungsfaktor eingeführt, der je Sektor berechnet wird, siehe Abbildung 5.15 rechts. Als Beispiel: Tropfen, die weiter rechts im Bild erfasst werden, sind näher an der Kamera als gleichgroße Tropfen, die links im Bild sind. Somit scheinen die Tropfen im rechten Bereich größer zu sein. Dies wird durch den sektorbezogenen Skalierungsfaktor ausgeglichen.

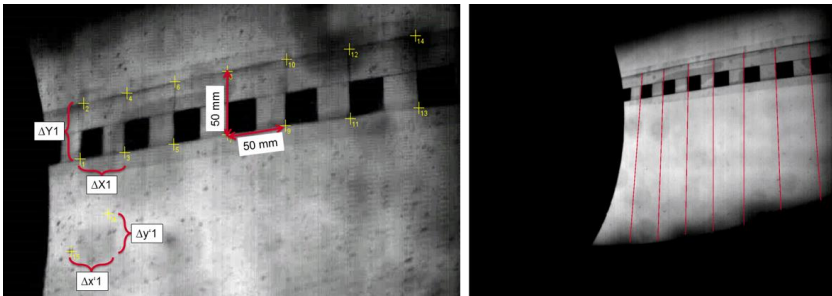


Abbildung 5.15: Ermittlung eines Skalierungsfaktors (sektorbezogen, rechts) zur Umrechnung von Pixelgröße zu realem Abstand mit Hilfe einer Messskala (links) [1, 116].

Die reale Größe der Tropfen wird jedoch nicht nur durch die Position im Bild (links/rechts) beeinflusst, sondern auch durch den Ablösepunkt am Reifen. Tropfen, die sich an der fiktiven Reifeninnenseite (der Radaufhängung zugewandte Seite) lösen, haben eine Flugbahn, die näher an der Kamera vorbeiführt, und erscheinen somit größer, siehe Abbildung 5.11 Bild links oben, in positiver y-Richtung. Aufgrund der Schattendarstellung der Tropfen entfällt

die Möglichkeit, die Tiefe des Tropfens und somit des Ablösepunkts in y-Richtung zu bestimmen. Die mittlere Tropfengröße wird deswegen auf die Mitte des Reifens bezogen. Hierfür wird im Folgenden angenommen, dass sich alle Tropfen in y-Richtung des Reifens (über die Reifenbreite) während der Variation der Randbedingungen gleich lösen. Das bedeutet auch, dass die Aussagekraft der ermittelten Tropfengröße keine absolute Gültigkeit besitzt, sondern ausschließlich für die Relativvergleiche genutzt werden kann.

Um des Weiteren Aussagen über das Ablöseverhalten entlang der Umfangsrichtung treffen zu können, muss ein weiteres Schnittbild entworfen werden. Abbildung 5.16 zeigt hierzu eine Einteilung der Bildbereiche nach Ablösewinkel am Reifen.

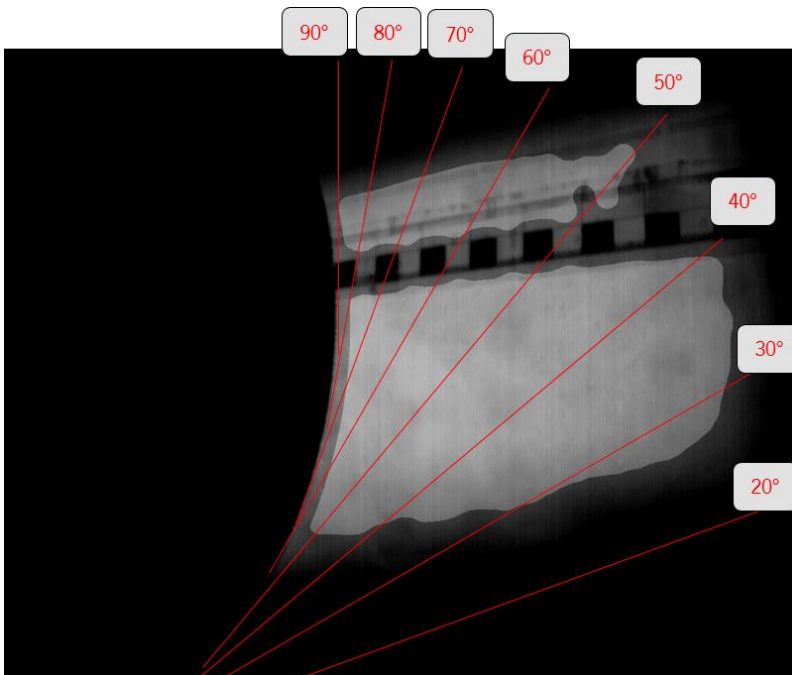


Abbildung 5.16: Einteilung in Ablösewinkel im stabilisierten Bildbereich nach [1, 117].

Außerdem zu erkennen ist eine hellgraue Akzentuierung im Bild. Diese hebt den Bildbereich hervor, der mittels Bildverarbeitungsalgorithmen stabilisiert und aufbereitet werden kann. So können beispielsweise Tropfen auf der Linse und andere Störeinflüsse ausgeklammert werden [117]. Aus Abbildung 5.16 lässt sich auch erkennen, dass die Größe der unterschiedlichen Bildbereiche je Ablösewinkel sehr stark variieren kann. Daraus ergibt sich zwangsläufig, dass die statistische Aussagekraft mancher Randgebiete (zum Beispiel: 20° - 30° und 80° - 90°) als weniger belastbar einzustufen ist, da hier nur äußerst kleine Bereiche analysiert werden können. Die Anzahl der Tropfen wird ebenfalls nach Ablösewinkel berechnet. Da sich somit unterschiedlich große Bereiche ergeben, in denen Tropfen gezählt werden, wird die Tropfenanzahl nicht absolut, sondern in Bezug auf die Größe des Bildausschnittes angegeben.

Exemplarisch ist in Abbildung 5.17 dargestellt, wie der Algorithmus aus einem Rohbild einzelne Tropfen erkennt. Die Einfärbung dient der Abgrenzung einzelner Tropfen ohne dabei eine weitere Charakterisierung (z.B. Größe) vorzunehmen. Für die detaillierte Beschreibung des Bildaufbereitungsalgorithmus sei auf [117] verwiesen.

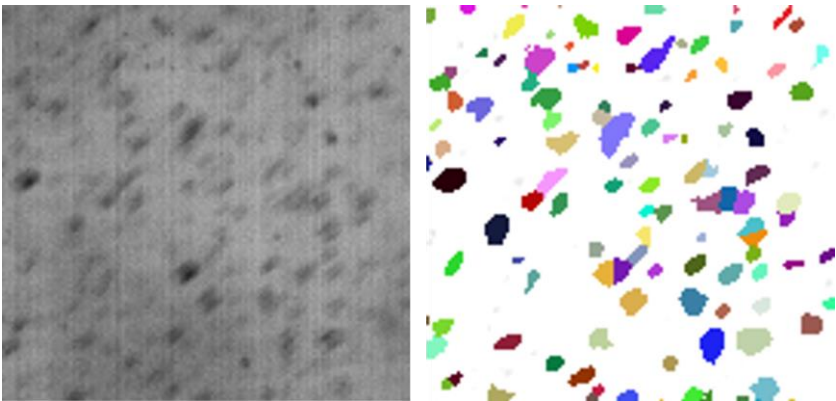


Abbildung 5.17: Tropfenerkennung mittels Bildverarbeitungsalgorithmik [1, 117]. Links: Rohbild. Rechts: Verarbeitetes Bild mit hervorgehobenen Tropfen.

5.3 Ergebnisse

Aus den bekannten Erkenntnissen und offenen Fragen (vergleiche Kap. 5.2.2) sowie den eigenen Versuchen (vergleiche Kap. 5.2.3) werden im Folgenden drei Modelle abgeleitet [1], die das Aufwirbelungsverhalten des Reifens in die Bereiche Tröpfchengischt, Schwallgischts sowie frontale und seitliche Verdrängung einteilen, siehe Abbildung 5.7.

5.3.1 Tröpfchengischt am Reifenumfang

Die Tröpfchengischt am Reifen ist insbesondere bei feuchter und leicht nasser Fahrbahn sehr prägnant. Sie beschreibt die Ablösung von Wasser entlang des Reifenumfangs oberhalb von ungefähr 30° (Ende der Totzone, sofern vorhanden, und der Schwallgischtszone, die unmittelbar am Reifenauslauf vorherrscht) bis zum Reifeneinlauf (ungefähr 330°), an dem der Reifen wieder auf die Fahrbahn trifft.

Die Ablösungen finden dabei als Tropfen statt, die den Reifen tangential mit der Umfangsgeschwindigkeit des Reifens verlassen. Es bestehen Abhängigkeiten von Reifenprofil, Ablöswinkel (Drehwinkel), Drehgeschwindigkeit und Wassermenge auf dem Reifenprofil. Aus diesen Abhängigkeiten ergeben sich die Tropfenanzahl und -größe sowie die Ablösungspunkte.

Die Hauptablösepunkte sind hauptsächlich die Übergangsbereiche zwischen Negativ- und Positivvolumen nahe den Längsrillen des Reifenprofils, siehe Abbildung 5.18.

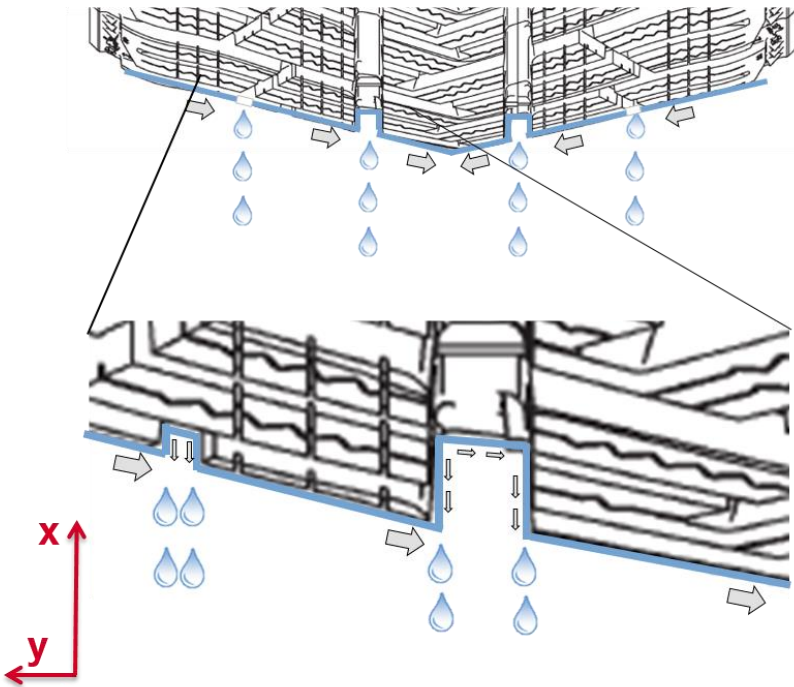


Abbildung 5.18: Ablösepunkte entlang des (überspitzt dargestellten) Reifenprofils in y-Richtung [1]. Oben: Gesamtes Reifenprofil im Schnitt. Unten: Vergrößerter Ausschnitt.

Die Annahme hierfür sei, dass ein ungefähr konstanter Wasserfilm entlang der gesamten Reifenoberfläche, also auch in den Rillen, vorhanden ist. Das Wasser läuft nun durch die Fliehkraft weg vom Zentrum der Drehbewegung des Reifens (in Abbildung 5.18 also nach unten), ohne sich vom Reifen zu lösen (Pfeile in Abbildung 5.18), bis es schließlich zu den Sammelpunkten am Reifen kommt (gedachte Tropfenursprünge in Abbildung 5.18). An diesen Sammelpunkten hat das Wasser keine Möglichkeit, sich gleichzeitig sowohl weiter vom Drehzentrum zu entfernen als auch der Reifenkontur zu folgen. Es kommt zur Ablösung einzelner Tropfen [1].

Abbildung 5.19 zeigt das beschriebene Verhalten mit einer Aufnahme vom Prüfstand (identisch mit Abbildung 5.11 links oben). Abgesehen von den Rändern der Profilblöcke ist außerdem in der Mitte des Reifenprofils (weitest entfernter Punkt vom Drehzentrum) eine weitere Ablösestelle erkennbar [1].



Abbildung 5.19: Ablösepunkte entlang des Reifenprofils in y-Richtung am Prüfstand [1].

Bei höheren Geschwindigkeiten und Wasserhöhen auf der Fahrbahn kann beobachtet werden, dass sich zusätzliche Ablösungen mittig auf den Profilblöcken und in den Längsrillen bilden. Ursache hierfür sind die höheren Fliehkräfte und vorhandenen Wassermengen auf der Reifenoberfläche, wie auch die Betrachtung der Tropfengröße und –anzahl zeigt [1].

Tropfengröße und –anzahl stehen in einem direkten Zusammenhang. Mit zunehmender Geschwindigkeit oder Wassermenge am Reifen löst sich zwangsläufig auch mehr Wasser vom Reifen, vergleiche Kap. 5.1. Als Erinnerung: Für die Ablösung von Flüssigkeit müssen aus einem einzelnen Volumen mehrere kleine Volumina erstellt werden. Hierfür ist Arbeit notwendig, um die zusätzlich benötigte Oberfläche zu generieren. Tropfen werden also nicht unendlich häufig zerteilt und haben somit eine gewisse Mindestgröße. Auf der

anderen Seite muss bei der Entstehung eines neuen Tropfens auch die Adhäsion zur Ablösung überwunden werden. Daher entstehen auch nicht unendlich große Tropfen. Generell kann gesagt werden, dass höhere Geschwindigkeiten des Rads und somit höhere Fliehkräfte Wasser schneller lösen (entlang der Drehbewegung) und daher für einen stationären Beobachter mehr Wasser gelöst wird. Ähnliche Betrachtungen gelten auch für die Wassermenge, die sich auf dem Reifenprofil befindet. Befindet sich mehr Wasser auf dem Reifen, so werden schneller die benötigten Wasservolumina für eine Ablösung bereitgestellt [1].

Die Betrachtung der Tropfengröße bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten, aber sonst gleichen Randbedingungen, zeigt, dass die Tropfengröße mit zunehmender Geschwindigkeit oberhalb 70 km/h abnimmt, siehe Abbildung 5.20. Dies deckt sich mit den strömungsmechanischen Grundlagen, vergleiche Kap. 5.1.

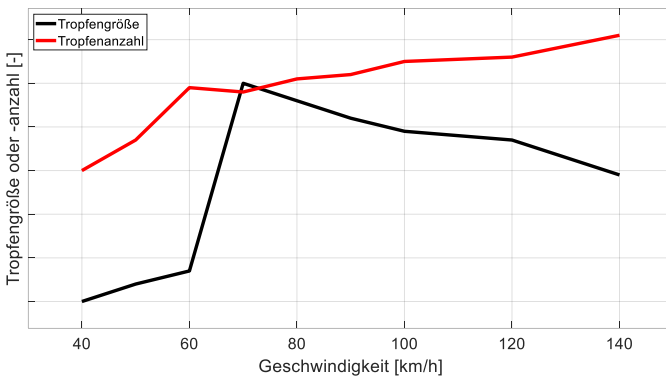


Abbildung 5.20: Tropfengröße und -anzahl über Geschwindigkeit bei 2 mm Wasserhöhe und neuem Winterreifen unter 45° Abstrahlwinkel nach [1].

Während die Tropfengröße oberhalb von 70 km/h sinkt, steigt die Tropfenanzahl, um die kleiner werdenden Tropfen auszugleichen. Die bis 70 km/h wachsende Tropfengröße ist mit der Weber-Zahl alleine nicht zu erklären. Als weitere Einflussgröße ist die Wassermenge am Reifen verantwortlich. Da mit

steigender Geschwindigkeit die Fliehkraft steigt, wird auch die Wasserbewegung entlang der Reifenoberfläche zu den Sammelstellen beschleunigt. Bis zu einem gewissen Grad scheint die somit steigende Wasserverfügbarkeit durch Geschwindigkeit an den Sammelpunkten die Bildung größerer Tropfen zu begünstigen, bevor dann durch weitere Zunahme der Fliehkraft die Tropfengröße wieder abnimmt [1].

Dies korreliert auch mit den weiteren Ergebnissen zum Einfluss der Wasserhöhe auf der Fahrbahn, siehe Tabelle 5.2. Es wird festgestellt, dass eine steigende Wasserhöhe zu größeren Tropfen führt. In diesem Fall ist also die Wasserverfügbarkeit an den Sammelstellen größer, weil mehr Wasser an der Reifenoberfläche in Summe hängen geblieben ist und nicht, weil die Fliehkraft sie dort schneller hin transportiert hat. Dabei ist die am Reifen haftende Wassermenge limitiert, so dass bei einer endlichen Wasserhöhe auf der Fahrbahn die vom Reifen aufgenommene Wassermenge in Sättigung geht. Ab diesem Zeitpunkt saturieren auch Tropfengröße und –anzahl. Maßgeblich beeinflusst wird die maximale Wassermenge am Reifen dabei durch zwei Faktoren, erstens das interne Aufnahmevolumen des Reifens (vergleiche Kap. 5.3.3) sowie zweitens die Wasserablösung in der Schwallgischte beziehungsweise die sogenannte „Totzone“ (vergleiche Kap. 5.3.2).

Die Betrachtung der Tropfengröße und –anzahl entlang des Ablösewinkels zeigt, dass beide abnehmen. Dies ist damit zu erklären, dass durch die Ablösungen die verbleibende Wassermenge sinkt und somit weniger Wasser für weitere Ablösungen zu Verfügung steht. Dies deckt sich mit den bekannten Erkenntnissen.

Tabelle 5.2: Übersicht der Einflussparameter auf Tropfengröße und –anzahl (gültig unterhalb der maximalen Wasseraufnahmeschwelle) [1].

Steigerung Parameter	Einfluss auf Tropfen- größe	Einfluss auf Tropfen- anzahl
Wasserhöhe auf Fahr- bahn	Steigend	Steigend
Fahrgeschwindigkeit	Sinkend	Steigend
Ablösewinkel	Sinkend	Sinkend
Negativvolumen	Sinkend	Steigend
Reifenfüllluftdruck	Ohne Tendenz	Ohne Tendenz
Radlast	Ohne Tendenz	Ohne Tendenz

Mit steigendem Negativvolumen im Reifenprofil kann mehr Wasser auf der Reifenoberfläche gespeichert werden. Somit steht mehr Wasser für die Ablösung zu Verfügung, was die steigende Tropfenanzahl erklärt. Eine Ursache für die sinkende Tropfengröße lässt sich aus einem Überschneidungseffekt mit der Schwallgicht erklären, vergleiche Kap. 5.3.2.

Radlast- und Reifenfüllluftdruckveränderungen rufen zwar Variationen in Tropfengröße und –anzahl hervor, diese sind jedoch ohne eine konkrete Tendenz und somit nicht deutbar. So lange durch Radlast- und Reifenfüllluftdruckvariation keine Änderungen für das interne Aufnahmevolumen oder die Schwallgicht einhergehen, sind auch keine gezielten Einflüsse auf die Tröpfchengicht zu erwarten [1].

Als wichtiger Hinweis zu Tabelle 5.2 sei zu beachten, dass diese Tabelle nur gültig ist, solange die maximale Wasseraufnahme des Reifens nicht erschöpft ist. Dieser Zustand wird bei den abgefahrenen Reifen entsprechend früher erreicht. Bei erschöpfter Wasseraufnahme können die Bilder der Hochgeschwindigkeitskamera ihre Aussagekraft verlieren, da bei höheren Geschwindigkeiten Wasser aus der seitlichen Verdrängung das Kamerabild erheblich stört. Es wird vermutet, dass bei erschöpfter interner Aufnahme alle Steigerungen von Tabelle 5.2 verschwinden [1].

5.3.2 Schwallgischt am Reifenlatschübergang

Als Schwallgischt werden hier die Wasserablösungen im Reifenauslauf bezeichnet, wo der Reifenlatsch endet und sich der Reifen von der Fahrbahn abhebt. Der maximale Winkel, unter dem sich die Schwallgischt ablöst, hängt dabei nicht von der Geschwindigkeit ab, sondern vom Winkel des Reifenlatschendes. An diesem Punkt ist die lokale Krümmung des Reifens am größten.

Im Vergleich zur Tröpfchengischt (vergleiche Kap. 5.3.1) kann sich in der Schwallgischt deutlich mehr Wasser lösen, insbesondere bei größeren Wasserhöhen auf der Fahrbahn. Während sich bei relativ geringen Wasserhöhen bereits eine stabile Tröpfchengischt ausbildet, muss für eine Schwallgichtbildung deutlich mehr Wasser auf der Fahrbahn liegen. Dafür steigt die Schwallgicht bei Zunahme der Wasserhöhe weiter, wenn die Tröpfchengischt bereits gesättigt ist [1].

Verantwortlich hierfür sind insbesondere größere Rillen. Während bei geringen Wasserhöhen die gesamte Reifenoberfläche leicht und gleichmäßig benetzt ist, steigt mit zunehmender Wasserhöhe vor allem das in den Längsrillen aufgenommene Wasser an. Durch ein großes Verhältnis zwischen Wasservolumen und Haftoberfläche in der Rille wird die Schwallgicht begünstigt.

Hieraus resultiert auch ein Phänomen, das in [103] als „Totzone“ zwischen Tröpfchengischt und Schwallgicht bezeichnet wird, siehe Abbildung 5.7. Die Totzone ist ein Bereich geringer oder keiner Ablösungen. Sie verknüpft die Tröpfchen- und Schwallgicht insofern, dass starke Schwallgicht die Tröpfchengicht in Teilen vermindern kann, was zu der Abnahme der Tropfengröße in der Tröpfchengicht bei steigendem Negativvolumen führt, siehe Tabelle 5.2.

Zur Erläuterung dient folgendes Gedankenexperiment: Ausgehend von einer geringen Wassermenge auf der Fahrbahn entsteht ein Wasserfilm auf der Reifenoberfläche (Abbildung 5.21 links). Mit zunehmender Wassermenge auf der Fahrbahn steigt auch die Wassermenge, die am Reifen haftet (Abbildung 5.21 mittig). Wird eine kritische Wassermasse im Reifenprofil erreicht, kommt es zu einer Ablösung als Schwallgicht. Diese Ablösung reißt dabei mehr Wasser

vom Reifen, als bei etwas geringerer Wassermenge im Reifenprofil noch hängen geblieben wäre (Abbildung 5.21 rechts).

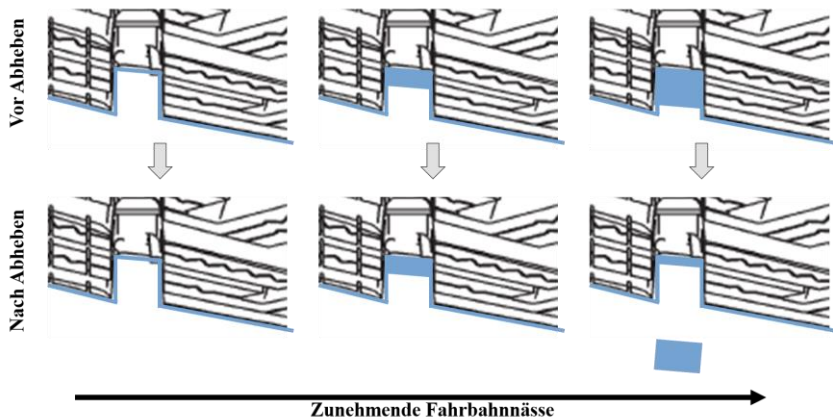


Abbildung 5.21: Auslösemechanismus der Schwallgicht bei kritischer Wassermenge [3]. Obere Zeile: Reifen noch auf der Fahrbahn. Untere Zeile: Reifen abgehoben. Links: Geringe Wassermenge, kein Einfluss auf Tröpfchengicht. Mitte: Mittlere Wassermenge, Steigerung der Tröpfchengicht. Rechts: Kritische Wassermenge, nach Ablösung verbleibt weniger Wasser am Reifen als im mittleren Fall und führt somit zur Verringerung der Tröpfchengicht.

Mit zunehmender Geschwindigkeit und Wasserhöhe, und somit in Richtung erhöhter Aquaplaningwahrscheinlichkeit, wird die Schwallgicht dabei turbulenter, siehe Abbildung 5.22. Wie außerdem in Abbildung 5.22 (oben) erkennbar ist, befinden sich die Ablösungen über den Längsrillen, falls das interne Aufnahmevolumen erschöpft ist. Bis dahin sind auch die Ablösungen in der Schwallgicht besonders an den Rändern der Profilblöcke zu finden, siehe Abbildung 5.22 unten [1].

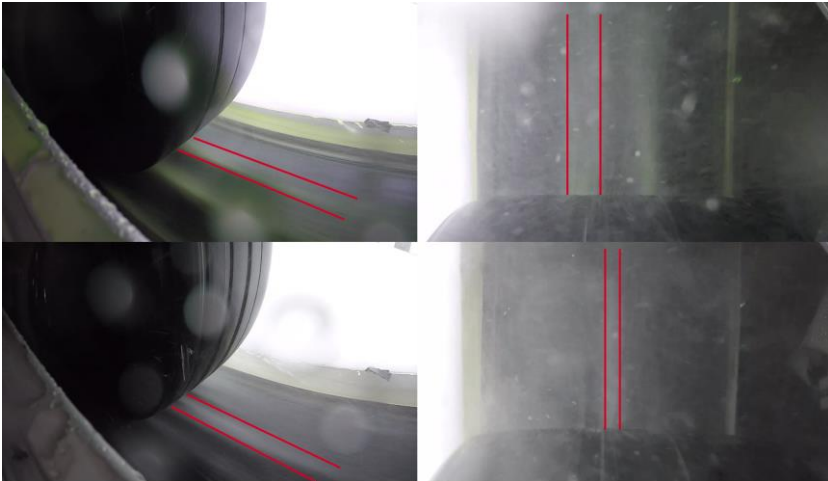


Abbildung 5.22: Turbulente Schwallgicht bei 1 mm Wasserhöhe und 80 km/h. Oben: Abgedrehter Winterreifen (interne Aufnahme erschöpft). Unten: Abgedrehter Sommerreifen (interne Aufnahme nicht erschöpft).

Untersuchungen der Radlast und des Reifenfüllluftdrucks [1] ergeben im Bereich der turbulenten Schwallformation bei einer Verkleinerung des Reifenlatsches (beispielsweise durch verringerte Radlast oder erhöhten Reifenfüllluftdruck) eine zunehmend turbulenterer Schwallformation als bei größeren Reifenlatschflächen, siehe Abbildung 5.23. Der Einfluss von Radlast und Reifenfüllluftdruck auf den maximalen Abstrahlwinkel kann mit dem Versuchsaufbau nicht untersucht werden, weil dieser Winkel nicht erfasst werden kann. Hierzu müsste eine Kamera in y-Richtung auf das Latschende gerichtet sein, was aus Platzgründen nicht realisierbar ist.



Abbildung 5.23: Einfluss von Reifenluftdruck und Radlast auf die Schwallformation, neuer Sommerreifen bei 2 mm Wasserhöhe und 80 km/h [1]. Oben: 1,7 bar, 4800 N. Mitte: 2,2 bar, 4000 N. Unten: 2,7 bar, 3800 N.

5.3.3 Frontale und seitliche Verdrängung

Rollt ein Reifen auf einer nassen Fahrbahn ab, so versucht der Reifen in direkten Kontakt mit der Fahrbahn zu kommen. Hierfür muss er die Zwischenschicht des Wasserfilms durchbrechen und dieses Wasser entsprechend abführen, vergleiche Kap. 2.2.2 und Kap. 2.2.3. Dies geschieht in der Regel, indem der Reifen das Wasser in seinen Rillen und Lamellen aufnimmt, was als interne

Aufnahme bezeichnet wird. Befindet sich zu viel Wasser auf der Straße oder besitzt der Reifen ein sehr kleines Negativvolumen, dann ist die interne Aufnahme früh erschöpft, und Wasser muss an den äußeren Rändern des Profillatsches abgeleitet werden. Mit zunehmender Geschwindigkeit und Wasserhöhe steigt der Winkel um die x-Achse, unter dem das Wasser seitlich abgeschleudert wird bis zu einem Maximum von 45° [86], siehe Abbildung 5.7.

Muss der Reifen Wasser zur Seite des Latsches verdrängen, kommt es bei höheren Geschwindigkeiten oder Wassermengen zu einer Wasserwalze, die der Reifen vor sich herschiebt. Da dies Analogien zur Schifffahrt aufweist, wird diese Walze auch als Bugwelle bezeichnet [86]. Wie die seitliche Verdrängung kann auch diese frontale Verdrängung im Abstrahlwinkel mit der Geschwindigkeit steigen. Abbildung 5.24 zeigt hierzu Aufnahmen vom Innentrommelprüfstand mit stark ausgeprägter seitlicher und frontaler Verdrängung.

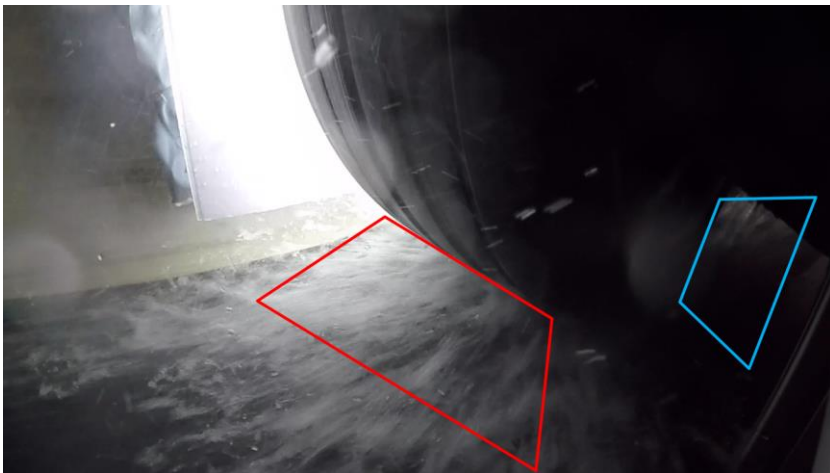


Abbildung 5.24: Frontale (rot) und seitliche (blau) Wasserverdrängung des Reifens.

Eine kleine Vorstufe der seitlichen Verdrängung wird bereits erreicht, wenn ein geschlossener Wasserfilm auf der Fahrbahn vorhanden ist [66]. Eine kleine seitliche Verdrängung entsteht außerdem auch durch das reine Auftreffen des

Reifens auf die Fahrbahn, da die am äußersten im Reifenlatsch liegenden Profilblöcke das Wasser sowohl in die innenliegenden Rillen als auch nach außen drücken. Dieser Effekt ist aber sehr gering und im Laufe dieser Arbeit nicht als die eigentliche seitliche Verdrängung zu verstehen, die vielmehr stark mit der Erschöpfung des internen Aufnahmevolument zusammenhängt.

Da sich laut [66] aus der seitlichen Verdrängung sehr gut auf Aquaplaning-Gefahr schließen lässt, wird eine weitere Versuchsreihe angestoßen [1]. In dieser weiteren Versuchsreihe wird das Aquaplaningverhalten der unterschiedlichen Reifen bei verschiedenen Wasserhöhen und Geschwindigkeiten untersucht. Hierfür wird im Gegensatz zu den Versuchen aus Kap. 5.2.3 anstelle der Trommel der Reifen angetrieben, der die Trommel seinerseits somit im Kraftschluss bewegt. Die Antriebskraft des Reifens wird auf 20 % der Radlast eingestellt. Damit wird ein Reibungsbeiwert von $\mu = 0,2$ ausgenutzt. Die kritische Aufschwimmgeschwindigkeit wird dabei ermittelt, indem bei eingestellten Randbedingungen die Geschwindigkeit aus dem Stillstand langsam bis zur Aufschwimmgeschwindigkeit erhöht wird. Sie ist erreicht, wenn die am Reifen gemessene Längskraft stärker als 30 % einbricht.

Tabelle 5.3: Aufschwimmgeschwindigkeiten verschiedener Reifen und Wasserhöhen sowie Beginn der seitlichen Wasserverdrängung [1].

Reifen	Wasserhöhe [mm]	Aufschwimm- geschwindigkeit [km/h]	Beginn seitliche Verdrängung [km/h]
Sommer neu	2	> 180	140
Sommer abgedr.	0,6	> 160	≤ 40
Sommer abgedr.	0,8	100	≤ 40
Sommer abgedr.	1	88	≤ 40
Winter abgedr.	0,6	> 180	≤ 40
Winter abgedr.	0,8	74	≤ 40

Beim Vergleich der Aufschwimmgeschwindigkeiten und der Ergebnisse der Kamera zur seitlichen Verdrängung in Tabelle 5.3 lässt sich erkennen, dass in

jedem Fall zuerst die seitliche Verdrängung einsetzt, bevor mit zunehmender Geschwindigkeit Aquaplaning auftritt. Das bedeutet, dass – unter der Annahme konstanter Randbedingungen – durch die Ermittlung der seitlichen Wasserverdrängung rechtzeitig vor Aquaplaning gewarnt werden könnte und somit die Annahme aus [66] bestätigt ist. Dabei ist der Geschwindigkeitspuffer, also die Spanne zwischen unterer Geschwindigkeit, bei der seitliche Verdrängung auftritt und kritischer Aquaplaninggeschwindigkeit stark variabel. In manchen Fällen ist der Puffer sehr groß, zum Beispiel bei den jeweils abgedrehten Reifen und einer Wasserhöhe von 0,6 mm. Es sei erwähnt, dass der neue Winterreifen selbst bei einer Wasserhöhe von 3 mm nicht aufgeschwommen ist und daher in Tabelle 5.3 nicht aufgeführt ist. Ebenso konnten Geschwindigkeiten unter 40 km/h nicht geprüft werden, weshalb die seitliche Verdrängung bei den meisten Reifen auch unterhalb von 40 km/h einsetzen könnte.

Ein großer Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass kritische Wasserhöhen, bei denen es durch Geschwindigkeitszunahme zu Aquaplaning kommen kann, unabhängig von allen anderen Randbedingungen bestimmt werden können. Insbesondere die heute noch schwierig zu ermittelnde Größe Reifenverschleiß wird im Gegensatz zu Tröpfen- und Schwallgicht hier nicht benötigt. Nachteilig ist jedoch, dass es nur eine binäre Unterscheidungsmöglichkeit zwischen aquaplaningrelevanten und –nichtrelevanten Wasserhöhen gibt und somit keine Möglichkeit besteht, geringe Fahrbahnässegrade zu ermitteln [1].

5.4 Zusammenfassung der Wasseraufwirbelungseffekte am Reifen

Die in Kap. 5.3 vorgestellten Aufwirbelungsmechanismen haben in Bezug auf ihre Aussagekraft zum Fahrbahnässegrad unterschiedliche Rollen. Die Tröpfchengicht, die sich über einen Großteil des Reifenumfanges erstreckt, ist bereits bei sehr geringen Fahrbahnässegraden erkennbar. Die Ablösungen bilden sich als Tröpfchen, deren relative Größe und Anzahl sich nach Tabelle 5.2 beschreiben lassen. Mit zunehmender Wasserhöhe und Geschwindigkeit steigt die in Summe vom Reifen abgelöste Wassermenge, bis der Reifen nicht mehr

Wasser aufnehmen kann, da die interne Aufnahme erschöpft ist. Abgesehen von der internen Aufnahme besteht außerdem eine Verknüpfung zwischen Tröpfchengischt, Schwallgicht und Totzone, insofern dass eine Zunahme der Schwallgicht unter gewissen Umständen eine Verringerung der Tröpfchengischt unter flachen Winkeln hervorrufen kann.

Die Schwallgicht tritt am Reifenauslauf unter einem sehr flachen Winkel als Lamellenablösung auf. Im Gegensatz zur Tröpfchengischt ist die Schwallgicht erst bei höheren Fahrbahnneigungen und Geschwindigkeiten erkennbar und die gelöste Wassermenge steigt auch noch bei höheren Wassermengen auf der Fahrbahn und zunehmenden Geschwindigkeiten an. Wenn Schwallgicht vorhanden ist, löst sich hier auf den Winkelabschnitt bezogen deutlich mehr Wasser als in der Tröpfchengischt. Bereits in einem Fahrzeug mit wenig Bodenfreiheit erreicht die Schwallgicht nur den Schweller, nicht die Radhausschale.

Um aus den Effekten der Tröpfchen- und Schwallgicht auf den Fahrbahnneigungsgrad schließen zu können, sind neben der Fahrgeschwindigkeit mehrere Informationen über den Reifen und dessen Zustand notwendig. Dies ist bei der Deutung der frontalen und seitlichen Verdrängung nicht notwendig. Hier kann durch das reine Vorhandensein von seitlicher Verdrängung darauf geschlossen werden, ob die vorliegende Wassermenge für den aktuellen Betriebszustand von Fahrzeug und Reifen bei dieser oder höherer Geschwindigkeit aquaplaningrelevant ist oder nicht.

Kommt es zum vollständigen Aufschwimmen eines Reifens, stellen sich inkonsistente Gichtverhältnisse ein, die eine Deutung in Bezug auf den Fahrbahnneigungsgrad gänzlich ausschließen [1].

6 Sensorische Erfassung der Wasseraufwirbelung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der sensorischen Erfassung der Wasseraufwirbelung. Im Fokus stehen Auswahl, Positionierung und Anbindung der Sensorik (vergleiche Kap. 6.1) und die Analyse der Sensorrohnsignale (vergleiche Kap. 6.3).

Diskussionen und Erkenntnisse aus diesem Kapitel wurden teilweise bereits in [2] veröffentlicht.

6.1 Konzepte

Allen im Folgenden vorgestellten Sensorkonzepten liegt die Annahme zu Grunde, dass Wasserpartikel auf eine feste Oberfläche auftreffen und dort eine impulsförmige Anregung hervorrufen.

Unter Vernachlässigung jeglicher Aufprallmechanismen (Wasserpartikel „verschwindet“ nach Aufprall, ohne folgende Partikel zu stören) oder Aerodynamik, lässt sich die kinetische Energie des aufprallenden Wasserpartikels berechnen.

$$E_{kin} = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad \text{Gl. 6-1}$$

Je nach Betrachtungsweise umfasst die Masse m entweder nur einzelne Wasserpartikel oder einen gesamten Wasserschwall. Für die Geschwindigkeit v wird die Abrollgeschwindigkeit des Reifens genutzt.

Wie in Kap. 5.3.1 beschrieben, ist die dabei vom Reifen abgelöste Wassermenge nicht nur abhängig von der auf der Fahrbahn verfügbaren Wassersammlung, sondern auch von der Wasserbereitstellung am Ablösepunkt auf

dem Reifen, welche unter anderem von Reifenprofil und Abrollgeschwindigkeit beeinflusst wird. Die Abroll- beziehungsweise Fahrgeschwindigkeit hat somit Einfluss auf beide Parameter der Gleichung, wohingegen die Wasserhöhe auf der Fahrbahn nur Einfluss auf die Wassermasse hat. Darüber hinaus ist der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit in der Gleichung bereits quadratisch. Daraus lässt sich ableiten, dass Änderungen in der Fahrgeschwindigkeit in den Signalen eines Beschleunigungssensors einen deutlich größeren Einfluss haben sollten als Änderungen der Wasserhöhe auf der Fahrbahn.

Die entstehende Anregung durch die auftreffenden Wasserpartikel ist sowohl als Körper- als auch als Luftschall wahrnehmbar. Der Luftschall befindet sich zum Teil auch im hörbaren Bereich, so dass in anderen Sensorsystemen bereits die Erkennung beispielsweise anhand des Reifenabrollgeräuschs diskutiert wurde, vergleiche Kap. 3.2. Die folgende Betrachtung beschäftigt sich ausschließlich mit der Erfassung und Untersuchung von Körperschallphänomenen.

Sensorik

Im Rahmen dieser Arbeit werden insgesamt drei unterschiedliche Sensorkonzepte untersucht [2]. Dabei ist ein sehr präziser Beschleunigungssensor verbaut, der dank hoher Auflösung und minimalem Gewicht als Referenz für die grundsätzliche Machbarkeit des Vorhabens steht. Für den Beweis, dass Sensorik auch kostengünstiger einsetzbar ist, sind außerdem zwei Sensortypen verbaut, die für einen Serieneinsatz nach Kap. 4.3 geeigneter wären. Aus Gründen der Geheimhaltung werden die beiden letztgenannten Sensortypen oberflächlich behandelt. Für weitere Informationen hierzu sei auf [68, 69] verwiesen.

Abbildung 6.1 zeigt die drei unterschiedlichen Sensortypen und Montagevarianten auf einer Radhausschale. Die durchgezogenen vertikalen Linien zeigen die Positionen von einem neuen Sensorprototyp auf Basis von Piezo-Folie. Wird eine Kraft senkrecht zur Folie aufgebracht, kann dies als Spannungsunterschied gemessen werden. Einsetzbar ist diese Technik bis in den unteren zweistelligen kHz-Bereich.

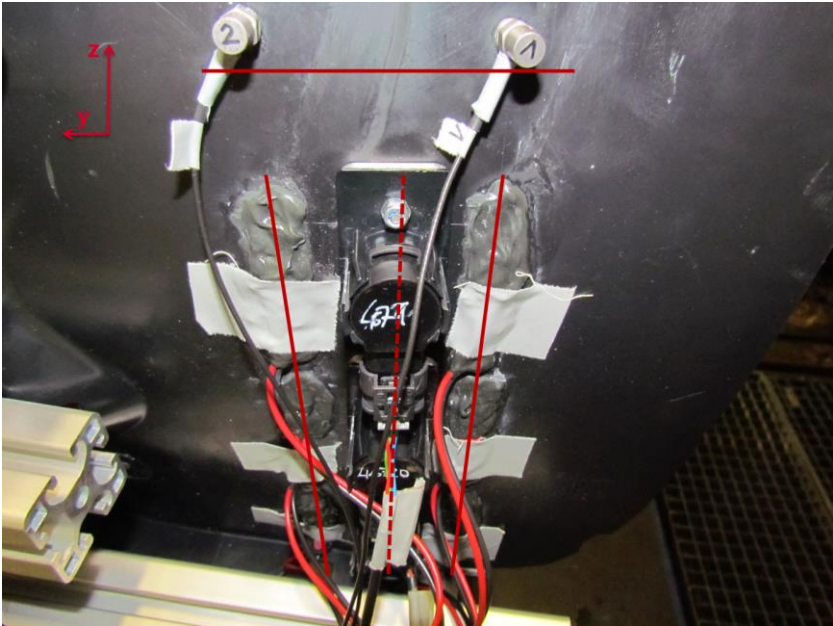


Abbildung 6.1: Verschiedene Sensortypen und Montagevarianten [2]. Oben (horizontale Linie): Beschleunigungssensoren Brüel & Kjær. Vertikale Linien (durchgezogen): Sensor auf Basis Piezo-Folie. Vertikale Linie (gestrichelt): Ultraschallsensor.

Die gestrichelte vertikale Linie zeigt Ultraschallsensoren, die beispielsweise auch als Parksensoren genutzt werden können [68, 69]. Dort wird der Sensor aktiv betrieben, in dem er eigenständig einen Impuls im Ultraschallbereich (mittlerer zweistelliger kHz-Bereich) aussendet und den Empfang des Echos zur Distanzmessung auswertet. Im hier vorgestellten Anwendungsfall ist der Sensor rein passiv im Empfangsmodus. Für die Versuche wird ein internes Sensorsignal benutzt, das im eigentlichen Anwendungsfall zur Bewertung des Rauschpegels genutzt wird und bereits vorverarbeitet ist (zum Beispiel: Temperaturabhängigkeit). Die einzige Parametrierungsmöglichkeit bietet die interne Sensorvorverstärkung.

Die horizontale Linie zeigt die Beschleunigungssensoren der Firma Brüel & Kjær [118 bis 120]. Diese Sensoren verfügen über einen mitgelieferten Kalibrierungsschein, der Auskunft über Amplituden- und Phasenverläufe des jeweiligen Sensors gibt. Mit diesen Informationen kann die Messtechnik präzise kalibriert werden. Die Schwingung einer seismischen Masse wird durch ein piezoelektrisches Element erfasst. Somit sind Anregungen bis zu 750 g (Amplitude) und bis zu 40 kHz (Frequenz) messbar.

Anbringung und Positionierung

Die Möglichkeiten zur Anbringung eines Sensors richten sich nach Sensortyp und Positionierung des Sensors am Fahrzeug [2]. Die Sensorprototypen auf Basis der reinen Piezo-Folie werden mittels Kunststoffkleber auf der Radhausschale befestigt, siehe Abbildung 6.1. Die Brüel & Kjær Beschleunigungssensoren werden entweder mit Kunststoffkleber (Schweller und Unterboden) oder Zweikomponentenkleber (Radhausschale) befestigt.

Alle Sensoren auf der Radhausschale werden auf der radabgewandten Seite angebracht. Sie sind daher vom direkten Einschlag der Wasserpartikel durch die Radhausschale geschützt. Ausnahmemöglichkeiten bestehen bei den Ultraschallsensoren, die aufgrund ihrer Anbindung auch durch ein Loch in der Radhausschale direkt mit Wasser beaufschlagt werden können, siehe Abbildung 6.2.



Abbildung 6.2: Verdeckte (oben, ohne Loch) und offene (unten, mit Loch) Verbauung der Ultraschallsensoren auf der Radhausschale [49]. Die Sensormembran befindet sich jeweils zwischen den Befestigungsschrauben der Halterung. Es handelt hierbei nicht um die in Abbildung 6.1 gezeigte Radhausschale.

Die offene Verbauung der Ultraschallsensoren ist möglich, da diese in einer eigenständigen Halterung auf der Radhausschale befestigt werden, siehe Abbildung 6.1. Durch die Halterung sind die Ultraschallsensoren die einzigen Sensoren, deren Membran nicht durch Klebstoff, sondern durch Vorspannung mit dem Festkörper verbunden sind. Die Vorspannkraft hat einen Einfluss auf das Sensorsignal.

Die Sensoren an Schweller und Unterboden werden an der Außenseite der Karosserie angebracht, siehe Abbildung 6.3. Sie befinden sich damit auf der gleichen Seite des Festkörpers, auf der die Wasserpartikel auftreffen. Bei den Sensoren am Unterboden ist außerdem anzumerken, dass diese nicht auf der eigentlichen, für diese Versuche entfernten, Unterbodenverkleidung aus Kunststoff angebracht sind, sondern auf metallischen Komponenten dahinter befestigt wurden. Dabei ist das Material an den Sensorpositionen 1, 2 und 5 eine dünne Blechstruktur und das Material an den Sensorpositionen 3 und 4 ein Teil der Längsträgerstruktur der Karosserie.

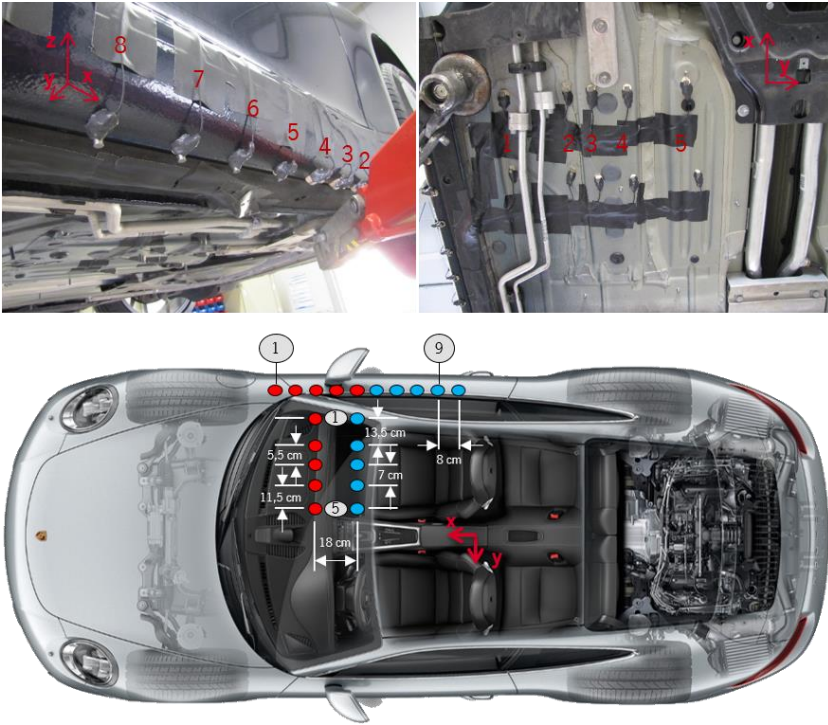


Abbildung 6.3: Sensoranbindung und -positionierung am Schweller und Unterboden [2, 3]. Oben: Sensoranbindung mittels Kunststoffkleber an Schweller (links) und Unterboden (rechts). Unten: Schematische Darstellung der Positionen in Draufsicht. Sensoren: B&K Typ 4507 (rot) [120] und B&K Typ 4397 (blau) [119].

Die Sensorik auf der Radhausschale dient der Erfassung von Tröpfchengischt, am Schweller kann eine Kombination von Tröpfchen- und Schwallgischt gemessen werden, und am Unterboden wird neben Schwallgischt hauptsächlich Wasser aus der seitlichen Verdrängung messbar [3].

Einfluss der Radhausschale auf die Körperschallübertragung

Das Material der Radhausschale ist aus einem Weichkunststoff (Polypropylen) mit einer Stärke von mehreren Millimetern ausgeführt. Werden die Sensoren

auf der Radhausschale verklebt, anstatt im offenen Verbau direkt mit den Wassertropfen beaufschlagt zu werden, erfährt die Körperschallübertragung senkrecht zur Oberfläche (x -Richtung in Abbildung 6.2) dadurch eine leichte Dämpfung der Amplitude und eine Verbreiterung des Übertragungsverhaltens im Frequenzbereich. Beispielsweise wird ein einzelner Tropfen aus einer Pipette, der aus 1 m Höhe auf die Radhausschale trifft, nicht sensiert.

Die Körperschallausbreitung in der Ebene (aufgespannt durch y - und z -Richtung in Abbildung 6.2) wird sehr stark gedämpft. So sind beispielsweise Anregungen mit einem Hochdruckreiniger, die zu einem maximalen Signalausschlag bei direkter Beaufschlagung der Radhausschale im Bereich der verdeckten Sensormembran führen, in einer Entfernung von 6-7 cm kaum noch wahrnehmbar.

Der Verschleißeinfluss (Versprödung) sowie ein Temperatureinfluss (folgende Versuche nur zwischen 5-25°C) auf die Radhausschale und das Übertragungsverhalten sind nicht Teil dieser Arbeit.

Alternatives Sensorkonzept

In einer Vorversuchsreihe wird gemeinsam mit [109] ein Sensorsystem verbaut, das Kräfte anstelle von Beschleunigungen messen kann. Dazu wird ein Aufbau erstellt, bei dem eine Druckmessfolie auf einer angefertigten Plexiglasplatte befestigt ist, siehe Abbildung 6.4.

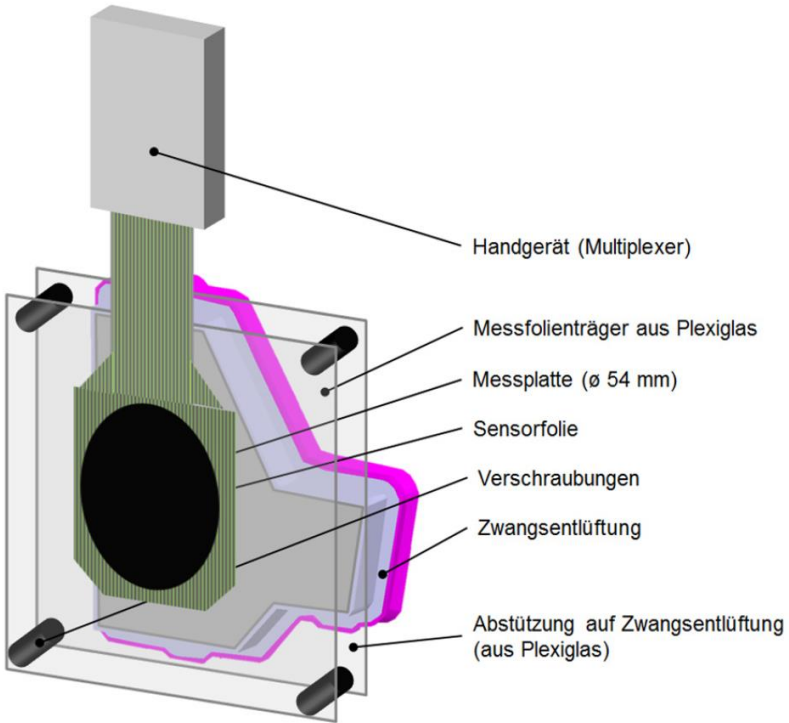


Abbildung 6.4: Aufbauskitze des Kraftmesssystems [109].

Als Ausgabe hat das System eine ortsbezogene Kraftmessung, die beispielsweise wie in Abbildung 6.5 visualisiert werden kann.

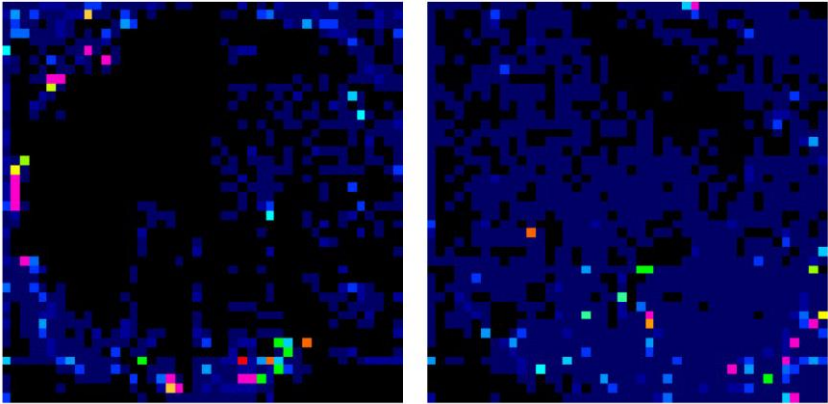


Abbildung 6.5: Sensorausgang des Kraftmesssystems. Lage der Pixel entspricht der Position auf der Messfolie, Höhe der Kraft ist über Farbe skaliert. Links: Messung mit zusätzlicher Radhausschalenverkleidung über Folie. Rechts: Messung mit direkter Wasserbeaufschlagung der Folie [109].

Für die in Abbildung 6.5 durchgeführten Versuche wird die Radhausschalenverkleidung zerschnitten, um eine entsprechende Öffnung für den Messaufbau zu ermöglichen. Dieser wird an der Fahrzeugkarosserie befestigt. In Abbildung 6.5 rechts treffen Wasserpartikel direkt auf die Folie. Für den Versuch im linken Bild wurde ein Stück Radhausschale mit sehr geringer Krümmung gewählt und auf der Folie befestigt, so dass dieses Stück Radhausschale als Dämpfung fungiert.

Das System eignet sich aufgrund des komplexen Einbaus nur bedingt für breitgefächerte Messungen und reagiert erst bei höheren Wassermengen auf der Fahrbahn, weshalb es im Weiteren nicht betrachtet und nur der Vollständigkeit halber erwähnt sei.

6.2 Versuch

Um sofort die Summe aller Einflussfaktoren in der Signalanalyse zu beachten, werden die ersten Versuche direkt im Gesamtverbund „Fahrzeug auf Prüfge-lände“ durchgeführt. Dazu dienen verschiedene Porsche 911 (Typ 991 I und II, heck- und allradgetrieben, verschiedene Motorisierungen), die mit einem Messtechnik-Computer ausgerüstet werden, siehe Abbildung 6.6. Zusätzlich zu den Fahrzeugsensorsignalen, die auf dem CAN-Bus verfügbar sind, werden die Fahrzeuge mit hochgenauen GPS-Antennen zur Bestimmung der Referenz-geschwindigkeit und MARWIS-Sensorik (vergleiche Kap. 4.2) zur Bestim-mung der Wasserhöhe auf der Fahrbahn ausgerüstet. Die Abtastraten der an Radhausschale, Schweller und Unterboden verbauten Sensoren variieren je nach Sensorik. Die Ultraschallsensoren stellen ein vorverarbeitetes Signal über CAN zu Verfügung, weshalb hier eine Abtastrate von 100 Hz ausreichend ist. Die anderen Sensoren werden mit bis zu 48 kHz, jedoch mindestens mit 8 kHz, abgetastet.



Abbildung 6.6: Typischer Messtechnik-Aufbau im Kofferraum vorne (Porsche 911).

Befahren werden verschiedene Prüfgelände in Europa, die eine künstliche Bewässerung der Fahrbahn ermöglichen. Die Fahrbahnässegrade liegen dabei je nach Prüfgelände und Fahrspur im Bereich von 0,5-1 mm Wasserhöhe und können entlang des Testabschnitts leicht variieren. Zu diesen Prüfgeländen gehören unter anderem die Prüfzentren der Firma Bosch in Boxberg [121], der Firma Michelin in Ladoux [122] und der Firma Goodyear in Mireval [123]. Insbesondere geradlinige Bremsmessstrecken eignen sich für diese Versuche.

Auf diesen Messstrecken können Geschwindigkeiten bis zu 150 km/h sicher erreicht werden. In Einzelfällen sind auch höhere Geschwindigkeiten bis zu 180 km/h möglich. Dabei wird die Geschwindigkeit jeweils in Schritten von 10 km/h erhöht.

Als weiteres Prüfgelände kann auch die hauseigene Teststrecke der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG genutzt werden, bei der eine Kreisbahn mit einem Radius von 100 m und leichter Überhöhung befahren werden kann. Hiervon kann ein kurzer Abschnitt zwischen 10 m bis 20 m künstlich bewässert werden, sodass über dem äußeren Teil der Fahrbahn ein konstanter Wasserfilm abläuft und sich zum kurveninneren eine Wasserlache sammeln kann. Diese Kreisbahn kann somit für Analysen des Lenkwinkelleinflusses genutzt werden.

Für besonders große Fahrbahnässegrade können die Kreisbahn der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG sowie ein spezielles Aquaplaningbecken der Firma Bosch in Boxberg genutzt werden. In beiden Fällen beträgt die Wasserhöhe mehrere Zentimeter.

Im Rahmen dieser Versuchsreihe werden verschiedene Reifen benutzt, darunter neuwertige und künstlich abgedrehte Winterreifen sowie UHP-Reifen (Ultra High Performance). Alle Reifen haben achsweise die gleichen Dimensionen (Vorderachse 245/35 20“).

6.3 Signalanalyse

Das Ziel der Signalanalyse ist die geschickte Verarbeitung der Sensorrohsignale, um ein Ausgangssignal zu erhalten, aus dem sich der Fahrbahnässegrad

ableiten lässt. Die dafür eingesetzten Verarbeitungsschritte sollten nicht beliebig komplex und rechenintensiv sein, vergleiche Kap. 4.3.

In diesem Abschnitt wird am Beispiel der Brüel & Kjør Beschleunigungssensoren auf der Radhausschale gezeigt, wie eine solche Signalverarbeitung exemplarisch abgeleitet werden kann. Für die Signalverarbeitung werden die Programme MATLAB [124] und Artemis Suite [125] genutzt.

Zeitbereich:

Bei der Betrachtung des Verlaufs des Rohsignals im Zeitbereich in Abbildung 6.7 ist erkennbar, dass sich ein hoher Ausschlag durch Fahrbahnässe ergibt.

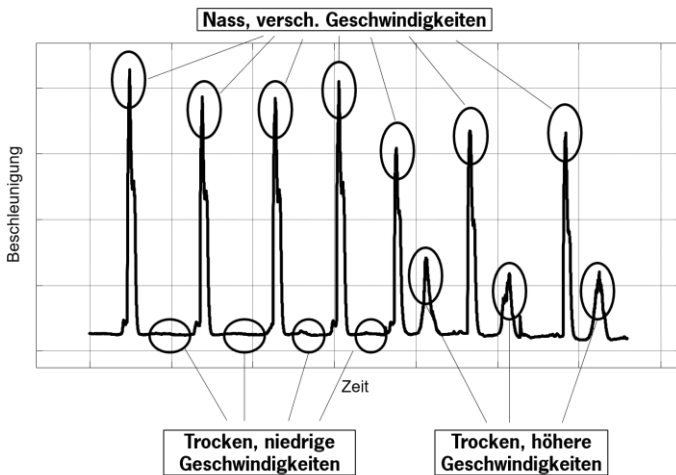


Abbildung 6.7: Rohsignal der Beschleunigungssensoren auf der Radhausschale im Zeitbereich bei verschiedenen Geschwindigkeiten und abwechselnd nasser (gleicher Fahrbahnässegrad) und trockener Fahrbahn.

Die Höhe des Ausschlags zeigt dabei erwartungsgemäß Abhängigkeiten von der Fahrgeschwindigkeit. Bei trockener Fahrbahn und niedrigen Geschwindigkeiten zeigt das Signal das gewünschte Verhalten in einem sehr flachen und niedrigen Verlauf. Es kann jedoch bei höheren Geschwindigkeiten dazu kommen, dass trotz trockener Fahrbahn der Signalverlauf ansteigt, siehe mittlere Ausschläge in Abbildung 6.7. Ursache hierfür sind Anregungen durch Aerodynamik und Fahrbahnunebenheiten, die sich über die Radaufhängung in die Karosserie ausbreiten. Porsche-interne Messungen auf einem Rollenprüfstand im Fahrzeugschallraum sowie im Windkanal zeigen, dass sich die Anregungen durch Aerodynamik und Fahrbahnunebenheiten im Amplitudenbereich ähneln. In beiden Fällen steigt der Pegel mit der Geschwindigkeit. Einflüsse von Seitenwind und Reifentyp werden hierfür als gering eingestuft.

Frequenzbereich

Der Einfluss der Geschwindigkeit auf das Sensorsignal bei Trockenheit lässt sich anhand eines Amplitudenspektrogramms mittels einer Short Time Fourier Transformation (STFT) gut deutlich machen, siehe Abbildung 6.8.

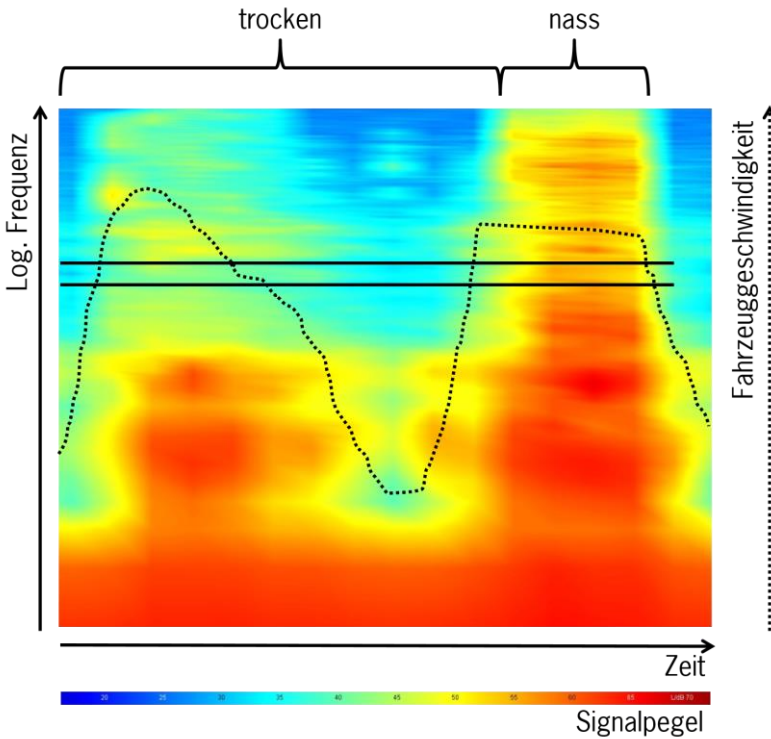


Abbildung 6.8: Amplitudenspektrogramm der Beschleunigungssensoren auf der Radhausschale einer Messfahrt bei Übergang von trockener zu nasser Fahrbahn [2]. Horizontale Linien markieren den Bereich der optimalen Unterscheidbarkeit zwischen trocken und nass. Die Fahrzeuggeschwindigkeit ist gestrichelt dargestellt.

Wie in Abbildung 6.8 zu sehen ist, hat die Geschwindigkeit im trockenen Bereich (linke Hälfte im Diagramm) einen Einfluss auf das Sensorsignal. Insbesondere der niedrige Frequenzbereich wird stärker angeregt [2].

Im Gegensatz hierzu zeigen die impulsförmigen Anregungen durch die Wasserpunkte eine sehr breitbandige Anregung (rechte Hälfte des Diagramms). Beispielhaft ist in Abbildung 6.8 ein Frequenzbereich mit horizontalen Linien hervorgehoben. In diesem speziellen Szenario ist der Unterschied zwischen

trockener und nasser Fahrbahn durch das Sensorsignal in diesem Frequenzband am markantesten.

Die Analyse mittels einer STFT hat den Vorteil, dass sowohl zeitliche Verläufe als auch Auswirkungen im Frequenzbereich schnell visuell darstellbar sind [2]. Für eine automatisierte Auswertung bietet eine STFT keine Vorteile, da die für einen analytischen Vergleich zwischen unterschiedlichen Betriebsbedingungen benötigten Referenzwerte auch über andere Signalverarbeitungsschritte (siehe Fast Fourier Transformation) gebildet werden können. Nachteilig bei einer STFT ist die vergleichsweise hohe Rechendauer.

Die höchste noch analysierbare Frequenz wird über das sogenannte Shannon-Kriterium bestimmt, bei dem die Abtastrate doppelt so groß wie die größte zu erfassende Schwingungsfrequenz sein muss. Im Gegensatz zu anderen Analysemethoden im Frequenzbereich stellt sich bei der STFT die Frage nach der sinnvollen Auflösungsverteilung zwischen Zeit- und Frequenzbereich, da nach der Küpfmüller'schen Unbestimmtheitsrelation Zeit- und Frequenzauflösung nicht gleichzeitig beliebig hoch sein können. Für eine hohe Auflösung im Frequenzbereich wird demnach eine längere Messdauer benötigt. Gleichzeitig resultiert hieraus eine höhere Unschärfe im Zeitbereich. Umgekehrt führt eine Erhöhung der Auflösung im Zeitbereich zu einer Verringerung der möglichen Auflösung im Frequenzbereich [2]. Für weitere Grundlagen der Signalverarbeitung siehe auch [126, 127].

Alternativ zu einem Amplitudenspektrogramm bietet ein Amplitudenspektrum eine sehr gute Möglichkeit, sich Phänomene im Frequenzbereich anzuschauen und dabei eine hohe Frequenzauflösung zu erhalten. Im Gegensatz zu einem Amplitudenspektrogramm ist – durch den Entfall einer Dimension, hier Zeit – in einem Amplitudenspektrum die Darstellung mehrerer Messungen in einem gemeinsamen Diagramm deutlich einfacher.

Als direkter Nachteil ergibt sich durch den Entfall der Zeitdarstellung jedoch, dass für Amplitudenspektrum nur (quasi-) stationäre Signale nutzbar sind, sprich nur Messungen, während derer sich die Betriebsbedingungen nicht ändern. Da dies jedoch nicht immer garantiert werden kann (zum Beispiel: leicht

schwankende Wasserhöhe entlang der Strecke), empfiehlt es sich, die Messdauer über den durch die Frequenzauflösung benötigten Mindestzeitraum auszu dehnen.

Die STFT hat folgende Haupteinstellmöglichkeiten:

- Blocklänge
- Fensterfunktion
- Spektrale Gewichtung
- Überlappung

Blocklänge

Für eine STFT wird ein Ausschnitt aus der gesamten Messungsdauer ausgewählt. Die Größe dieses Ausschnitts beziehungsweise dieser Zeitfensterlänge wird durch die Blocklänge bestimmt. Die Blocklänge bestimmt damit die Anzahl von Messwerten, die in einer einzelnen FFT verarbeitet werden und ist typischerweise eine Potenz von 2. Wird die Blocklänge vergrößert, wird dadurch ein längeres Messintervall betrachtet. Dies verbessert die Auflösung im Frequenzbereich und verschlechtert die Auflösung im Zeitbereich.

Tabelle 6.1: Beispielhafte Auflösungen im Zeit- und Frequenzbereich in Abhängigkeit der Abtastrate und Blocklänge.

Abtastrate [kHz]	Blocklänge [-]	Auflösung im Zeitbereich [ms]	Frequenzauflösung [Hz]
8	512	64	15,625
12	512	42,667	23,438
50	512	10,24	97,656
8	4096	512	1,953
12	4096	341,333	2,930
50	4096	81,92	12,207

Tabelle 6.1 zeigt beispielhafte Auflösungen im Zeit- und Frequenzbereich in Abhängigkeit von Blocklänge und Abtastrate. Die Wahl von Abtastrate und Blocklänge richtet sich stark nach den zu untersuchenden Phänomenen. Im Folgenden wird der Einfluss gängiger Werte der Blocklänge gemeinsam mit anderen Einflussgrößen diskutiert.

Fensterfunktion

Bei einer FFT wird ein Ausschnitt des Messbereichs gewählt und für die weitere Analyse gedanklich unendlich häufig hintereinandergelegt und darauf die FFT angewandt. Da innerhalb eines gewählten Ausschnitts selten ganzzahlige Vielfache einer vollständigen Schwingungsperiode enthalten sind, sind die Signalwerte am Anfang und Ende des gewählten Ausschnitts selten identisch. Beim Hintereinanderlegen entstehen an den Übergängen Sprünge. Dies führt in der FFT zu ungewollten Störungen, einem „verschmieren“ der Frequenzen, das als „Leakage“ (zu Deutsch: Leckage) Effekt bezeichnet wird. Mittels einer Fensterfunktion werden daher die Enden des ausgeschnittenen Signals immer auf einen gemeinsamen Wert (zum Beispiel: Null) geführt, um diese Sprünge zu vermeiden. Die bekanntesten Fensterfunktionen sind die Rechteck-, Hanning-, Hamming- und Flat-Top-Fensterfunktion. Durch jede Fensterfunktion ergibt sich eine kleine, deterministische Unschärfe in der FFT. Die Wahl der Fensterfunktion basiert auf Erfahrung und den zu untersuchenden Phänomenen. Im Rahmen dieser Arbeit wird ausschließlich die Flat-Top-Fensterfunktion genutzt. Damit werden Amplitudenfehler besonders geringgehalten, was zu Lasten einer etwas schlechteren Frequenzauflösung geht.

Spektrale Gewichtung

Signalanteile gleicher Amplitude in verschiedenen Frequenzbereichen können beim Empfänger in unterschiedlicher Stärke empfunden werden. Um dies auszugleichen, gibt es die Möglichkeit, eine spektrale Gewichtung durchzuführen. Ist der Empfänger ein Mensch, können beispielsweise die spektralen Gewichtungen „A“, „B“, „C“, „D“ oder „G“ genutzt werden [128]. Alternativ kann eine spektrale Gewichtung allgemein genutzt werden, um Effekte in bestimmten Frequenzbereichen bewusst zu betonen oder zu vernachlässigen. In dem

Falle, dass ein unbekanntes Verhalten im Frequenzbereich untersucht werden soll, bietet es sich an, keine Gewichtung vorzunehmen.

Überlappung

Wenn die Dauer des zu untersuchenden Messschriebs größer als der durch die Blocklänge definierte Ausschnitt ist und der gesamte Messschrieb mittels FFT analysiert werden soll, müssen mehrere Ausschnitte im Messschrieb erzeugt werden. Statt dabei diese Ausschnitte nur aneinanzureihen, kann mittels Überlappung dabei das Ausschnittsfenster um einen kleineren Bereich als die Blocklänge verschoben werden. Je höher die Überlappung ist, desto geringer ist dabei die Verschiebung zweier aufeinander folgender Ausschnittsfenster. Durch eine hohe Überlappung können dynamische Ereignisse innerhalb des Messschriebs besser beobachtet werden, ohne Einbußen in der Frequenzauflösung hinnehmen zu müssen. Gleichzeitig werden durch eine hohe Überlappung Einzelimpulse hervorgehoben und übermäßig im Frequenzbereich ausgedehnt. Außerdem kann die Überlappung genutzt werden, um die durch die Fensterfunktion erzeugte Verfälschung der Amplitude im Frequenzbereich auszugleichen. Bei einer Hanning-Fensterung führt beispielsweise eine Überlappung von $1/2$ zu einer pegelrichtigen Analyse und eine Überlappung von $2/3$ zu einer energetisch richtigen Analyse.

Abbildung 6.9 zeigt das Ergebnis von mehreren mittels Überlappung kombinierten FFT mit verschiedenen Parametern auf Basis der gleichen Eingangsdaten.

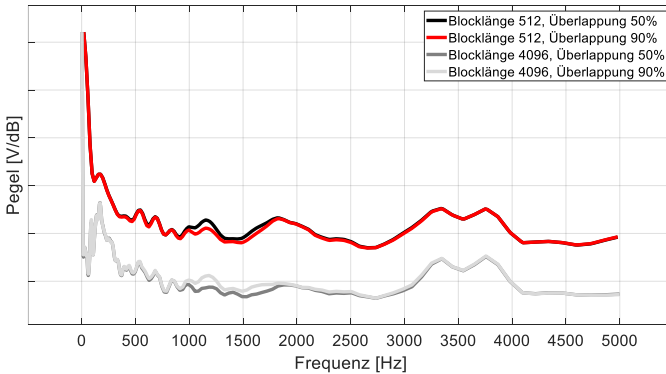


Abbildung 6.9: Mittels Überlappung kombinierte FFT mit verschiedenen Parametervariationen für Blocklänge und Überlappung.

Die Eingangsdaten erfordern aufgrund der Messdauer eine entsprechende Überlappung. Erkennbar ist, dass sich der Einfluss der Überlappung bei sonst fast deckungsgleichen Verläufen nur marginal auswirkt. Die Blocklänge zeigt einen Einfluss, der sich in diesem Beispiel vor allem auf die absolute Höhe der Verläufe auswirkt. Lokale Minima und Maxima bleiben jedoch weitestgehend erhalten. Da sich die Position der lokalen Extrema im Frequenzbereich nicht merklich ändert und relative Amplitudenverläufe erhalten bleiben, kann der Einfluss der Blocklänge als weniger relevant eingestuft werden.

Für die weitergehende Betrachtung wird eine Parametrierung mit Blocklänge von 512 und Überlappung von 90 % ohne Gewichtung gewählt. Diese Wahl stellt einen guten Kompromiss zwischen den Auflösungen im Zeit- und Frequenzbereich dar.

Ermittlung des optimalen Frequenzbereichs zur Unterscheidung zwischen trockener und nasser Fahrbahn

In Abbildung 6.8 wird bereits ein Frequenzbereich ersichtlich, in dem für diesen Anwendungsfall die größtmögliche Differenz im Sensorsignal zwischen einer trockenen und nassen Fahrbahn besteht. Ziel der weiteren Analyse ist es

zu untersuchen, ob dieser optimale Frequenzbereich von Eingangsparametern wie Geschwindigkeit und Reifenparametern abhängig oder allgemeingültig ist [2].

Als Bewertungsgrundlage hierfür dienen Messfahrten aus Kap. 6.2 mit verschiedenen Reifen und Geschwindigkeiten jeweils auf trockener und nasser Fahrbahn (konstanter Fahrbahnneigung). Die aufgezeichneten Rohsignale werden mittels einer Fast Fourier Transformation verarbeitet.

$$\text{normDiff}_i = \left(\frac{FFT_{nass} - FFT_{trocken}}{FFT_{trocken}} \right)_i \quad \text{Gl. 6-2 [2]}$$

Durch die Bildung eines Referenzwerts, hier genannt „normierte Differenz“, wird je Stützstelle i im Frequenzbereich die Unterscheidbarkeit zwischen dem linearen Amplitudenspektrum-Ergebnis auf nasser und trockener Fahrbahn und somit die Eignung der unterschiedlichen Frequenzbereiche zur Unterscheidung zwischen einer nassen und trockenen Fahrbahn bewertet, siehe Gl. 6-2. Durch das Dividieren des jeweiligen Wertes auf trockener Fahrbahn kann zudem die Prägnanz der Abweichung zwischen den Signalverläufen auf trockener und nasser Fahrbahn stärker hervorgehoben werden. Das Ergebnis dieser normierten Differenz wird in Abbildung 6.10 für verschiedene Geschwindigkeiten gezeigt.

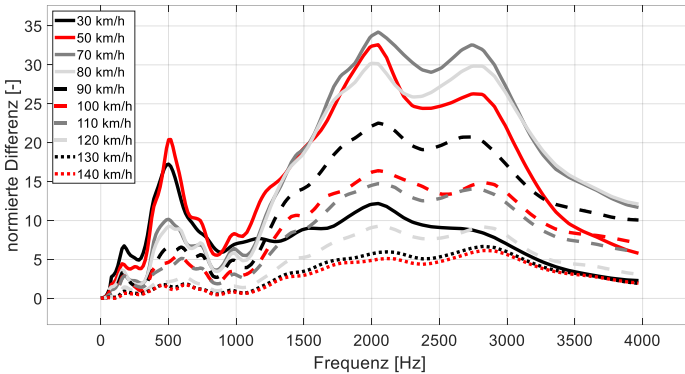


Abbildung 6.10: Normierte Differenz zwischen den FFT-Ergebnissen auf nasser und trockener Fahrbahn bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten (Michelin Winter neu) [2].

Auffällig sind die lokalen Maxima bei ungefähr 500 Hz, 2100 Hz und 2750 Hz, deren Lage im Frequenzbereich unabhängig von der Geschwindigkeit ist, und die lediglich in ihrer Höhe variieren [2]. An diesen Frequenz-Stellen ist die Unterscheidbarkeit zwischen trockener und nasser Fahrbahn in den Signalen somit besonders ausgeprägt (Zahlenbeispiel: Das Verhältnis aus den FFT-Ergebnissen von nass zu trocken für 70 km/h bei 2100 Hz ist 35:1). Weiter erkennbar ist, dass sich oberhalb von 200 Hz alle Kurven deutlich oberhalb von Null befinden, was bedeutet, dass eine Anregung durch nasse Fahrbahn stets größere Anregungen am Sensor hervorruft als eine trockene Fahrbahn. Außerdem auffällig ist, dass die Geschwindigkeit einen nicht monoton steigenden Einfluss auf die Signale hat. Die Ursache für dieses Phänomen wird in Kap. 7.1 zusammen mit den bekannten Erkenntnissen aus [66] erläutert.

Wird für jede Frequenzstützstelle in Abbildung 6.10 ein Mittelwert aus allen Geschwindigkeitskurven gebildet, ergibt sich eine Kurve, die ebenfalls die ausgeprägten Maxima widerspiegelt. In Abbildung 6.11 sind hierfür die Mittelwertkurven verschiedener Reifen dargestellt.

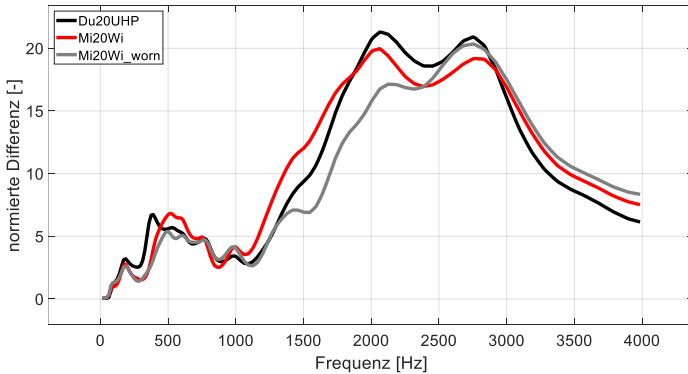


Abbildung 6.11: Mittelwerte der normierten Differenz über alle Geschwindigkeiten für verschiedene Reifen [2].

Wie in Abbildung 6.11 zu erkennen ist, sind die Positionen der Maxima im Frequenzbereich bei verschiedenen Reifen an sehr ähnlichen Stellen [2]. Dies unterstreicht, dass an diesen Stellen der Einfluss der Fahrbahnnässe gegenüber trockener Fahrbahn besonders prägnant ist.

Ermittlung einer geeigneten Bandpassfilterung

Aus den vorangegangenen Erläuterungen in diesem Kapitel lässt sich ableiten, dass eine geeignete Analyse und Aufbereitung des Rohsignals vor allem im Frequenzbereich erfolgversprechend scheint. Hierfür bieten sich Bandpassfilter an. Bei der Auslegung eines Bandpassfilters stellt sich neben der Zielfrequenz auch die Frage, wie breit oder spitz das Filter sein soll beziehungsweise darf. Hierzu zeigt Abbildung 6.12 die Auswirkungen von unterschiedlichen Bandpassbreiten im Filter auf die Lage des optimalen Frequenzbereichs sowie die Höhe der normierten Differenz. Der optimale Frequenzbereich wird dabei durch eine besonders hohe normierte Differenz charakterisiert.

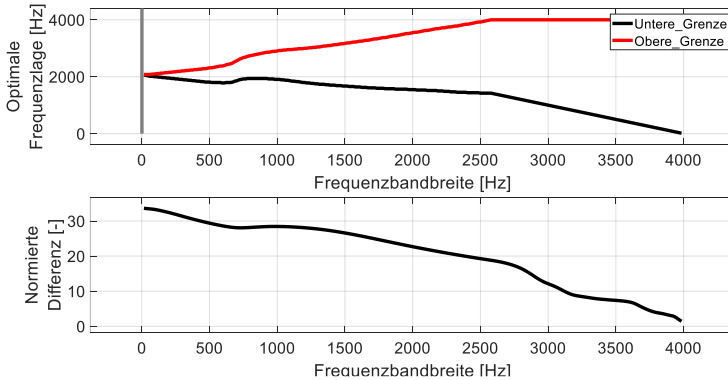


Abbildung 6.12: Oben: Lage des optimalen Frequenzbands zur Unterscheidung zwischen trockener und nasser Fahrbahn bei Variation der Frequenzbandbreite des Filters. Unten: Normierte Differenz an der optimalen Frequenz bei Variation der Frequenzbandbreite des Filters.

Im oberen Teil ist sichtbar, dass sich bei einer Verbreiterung des Bandpassfilters die Lage des optimalen Bandpasses zuerst in beide Richtungen ausdehnt (obere Grenze steigt, untere Grenze fällt), bis schließlich zuerst die obere Grenze von 4000 Hz erreicht wird (Maximum bei einer Abtastrate von 8 kHz). Die Steigung der oberen Grenze ist dabei größer, das heißt, der Bandpassfilter orientiert sich zu höheren Frequenzen. Als Lesehilfe für das obere Diagramm dient folgendes Beispiel: Bei einer Bandbreite des Filters von 1 Hz liegt das optimale Frequenzband zur bestmöglichen Unterscheidung zwischen trockener und nasser Fahrbahn bei ungefähr 2100 Hz. Wird die Bandbreite des Filters auf 1000 Hz erhöht, so liegt das optimale Frequenzband zwischen 1900 Hz und 3000 Hz.

Im unteren Teil zeigt Abbildung 6.12 die Höhe der normierten Differenz bei einer Verbreiterung des Bandpassfilters jeweils bei der zugehörigen optimalen Frequenzlage. Erkennbar ist, dass mit zunehmender Breite des Bandpassfilters die normierte Differenz sinkt. Das bedeutet, dass die Unterscheidbarkeit bei steigender Breite des Bandpassfilters abnimmt.

Die Erkenntnisse zur Bandpassbreite lassen sich somit wie folgt zusammenfassen. Um eine möglichst hohe Unterscheidbarkeit zwischen trockener und nasser Fahrbahn in den Signalen zu erzielen, sollte ein möglichst enger Bandpassfilter gewählt werden. Die Lage des optimalen Frequenzbands für diesen Filter dehnt sich dabei mit zunehmender Bandbreite aus, ohne sprunghaft zu sein.

Parallel zu den Analysen aus Abbildung 6.10 und Abbildung 6.11 werden mit ähnlichen Versuchen weitere besonders prägnante Frequenzbänder identifiziert, die einen hohen Einfluss der Fahrbahnnässe zeigen, weshalb für die folgenden Untersuchungen Bandpassfilter um diese Frequenzen gewählt werden. Diese sind bei 500 Hz, 620 Hz, 1600 Hz, 2100 Hz, 2750 Hz, 3250 Hz und 5000 Hz.

Das für die Auswertung genutzte Programm Artemis Suite [125] bietet für die Erstellung eines Bandpassfilters darüber hinaus Optionen, deren Parametrierungen teilweise empirisch ermittelt werden müssen. Folgende Einstellungen werden für die weiteren Analysen dieser Arbeit gewählt [2]:

- Filter: IIR
- Filtertyp: Chebyshev
- Ripple: 0,047 [dB]
- Filterordnung: 6
- Bandweitenmethode: Qualität
- Filterqualität: 8

Mit Hilfe dieser Filterung ist es nun möglich, aus den Rohsignalen der Sensoren neue Signale zu erzeugen, die besonders stark auf Wasseraufwirbelungen von Fahrbahnnässe reagieren. Die optimalen Einstellungen sollten hierbei für jedes Sensorsystem bestehend aus Sensortyp, Position, Befestigungsmethode und Grundmaterial separat geprüft werden.

Die benötigten Rechenkapazitäten hängen laut [125] dabei nahezu ausschließlich von der Filterordnung (in diesem Falle $N=6$) ab, siehe Abbildung 6.13.

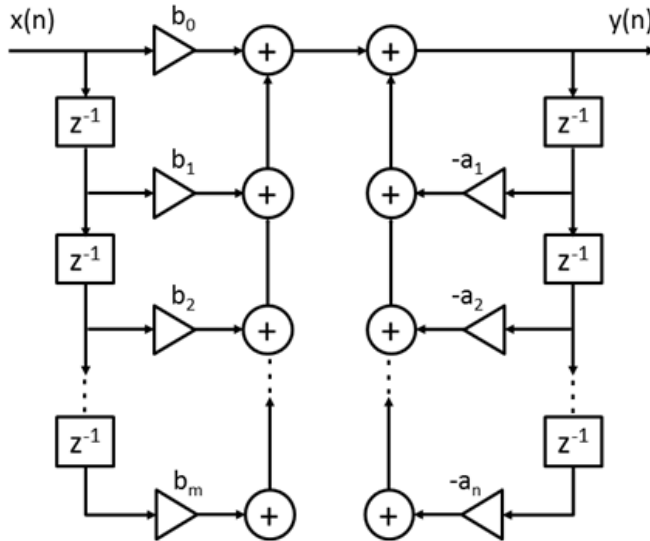


Abbildung 6.13: Exemplarische Filteraufbau für den Bandpass nach [125].

Porsche-interne Recherchen und Lasttests haben diesem Filteraufbau eine sehr gute Steuergerätauglichkeit attestiert.

7 Validierung und Bewertung

Unter der Annahme, dass die in Kap. 6 vorgestellten Sensorkonzepte in Verbindung mit der ebenfalls dort ermittelten Signalverarbeitung eine geeignete Methode zur Erkennung und Quantifizierung von Wasseraufwirbelungen darstellen, kann im Folgenden eine ausführliche Validierung der in Kap. 5 aufgestellten Modelle zur Wasseraufwirbelung des Reifens vollzogen werden, vergleiche Kap. 7.1. Anschließend wird das Gesamtkonzept in Kap. 7.2 anhand der in Kap. 4 identifizierten Systemanforderungen bewertet.

7.1 Validierung

Die Validierung erfolgt in drei Stufen, die sich von Laborversuchen (vergleiche Kap. 7.1.1) über Gesamtfahrzeugversuche auf Prüfgeländen (vergleiche Kap. 7.1.2) bis zu einer Validierung auf öffentlicher Straße und unter realen Bedingungen (vergleiche Kap. 7.1.3) erstrecken. Die Grundlagen der dafür notwendigen Versuche werden in Kap. 5.2 und 6.2 vorgestellt.

Da nicht alle Versuche auf einem einheitlichen Entwicklungsstand erfolgen, sind die folgenden Diagramme nicht anhand ihrer Absolutwerte vergleichbar. Die relative Vergleichbarkeit der Daten innerhalb eines Diagramms ist jedoch gewährleistet.

7.1.1 Validierung im Labor

Die Versuche im Labor werden alle auf dem Innentrommelprüfstand aus Kap. 5.2 durchgeführt. Hierfür wird der Messaufbau aus Abbildung 5.10 dahingehend verändert, dass Kameras und Beleuchtung entfernt werden und eine Halterung für eine Radhausschale angebracht wird. Abbildung 7.1 zeigt den Aufbau aus der seitlichen Ansicht. Die Sensoren sind auf der radabgewandten Seite im hinteren Aufwirbelungsbereich des Reifens (in Abbildung 7.1 links

durch Verschraubung in der Radhausschale erkennbar) verbaut. Die genaue Sensoranordnung hierzu zeigt Abbildung 6.1.

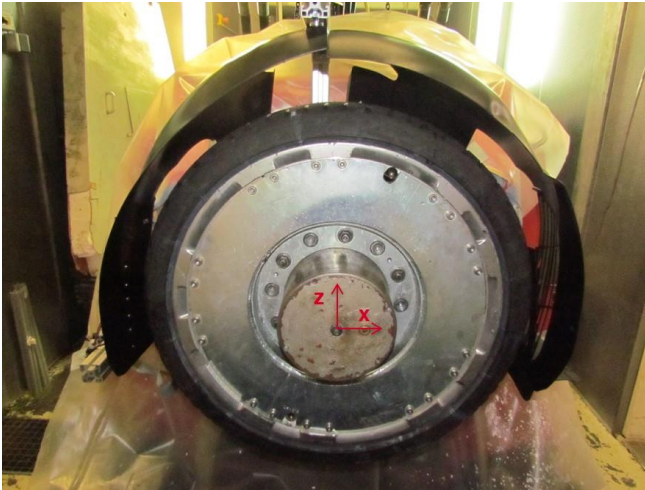


Abbildung 7.1: Innentrommelprüfstand mit Halterung der Radhausschale aus Aluminium-Profilen.

Die Halterung besteht aus modularen Aluminium-Profilen und die Anbindungspunkte zur Radhausschale sind dem Verbau im Gesamtfahrzeug nachvollzogen. Trotzdem ist zu erwarten, dass diese spezifische Halterung das Schwingungsverhalten der Radhausschale beeinflusst. Wie in Abbildung 7.1 erkennbar ist, fehlen darüber hinaus Fahrzeugteile (Rohkarosserie und Achsbauerteile), die den Wasserfluss im Radhaus beeinflussen können, vergleiche Kap. 7.1.2.

Einfluss der Wasserhöhe

Um die grundsätzliche Funktionsweise des Systems zu beweisen, muss als erstes die Abhängigkeit des verarbeiteten Sensorsignals von der Wasserhöhe

nachgewiesen werden. Hierzu zeigt Abbildung 7.2 den Einfluss der Wasserhöhe auf das Signal der Beschleunigungssensoren bei verschiedenen Geschwindigkeiten.

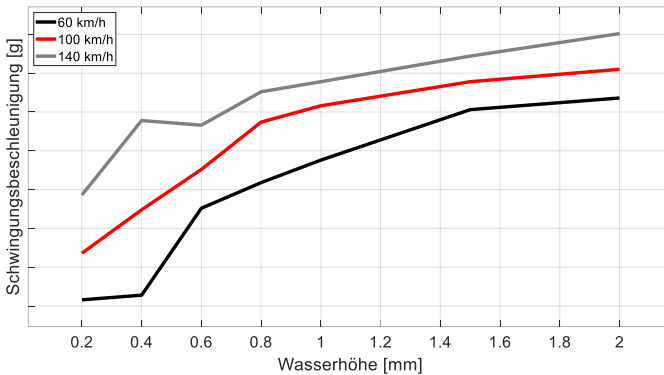


Abbildung 7.2: Einfluss der Wasserhöhe bei verschiedenen Geschwindigkeiten auf das Signal der Beschleunigungssensoren [2].

Für alle Geschwindigkeiten weist das Sensorsignal einen degressiven Verlauf bei zunehmender Wasserhöhe auf. Neben der hier untersuchten Tröpfchengischt, die sich bereits bei geringen Wassermengen auf der Fahrbahn bildet, ist der degressive Verlauf mit zunehmender Wasserhöhe durch die Bildung von Schwallgischt und einsetzender seitlicher Verdrängung zu erklären, die somit die Zunahme der Tröpfchengischt auf der Radhausschale einschränken. Dies bestätigt die Modelle zur Tröpfchengischt und hat zur Folge, dass sich ab einer endlichen Wasserhöhe trotz weiterer Zunahme des Fahrbahn­näs­se­grads keine Steigerung der Tröpfchengischt erreichen lässt [2]. In [93] wurde hierzu ein Wurzel-Zusammenhang zwischen Pegel und Wasserhöhe festgestellt.

Fahrgeschwindigkeit

Wie in Gl. 6-1 dargestellt, hat die Fahrgeschwindigkeit in zweierlei Art Einfluss auf die Wasseraufwirbelung und somit auch auf den Verlauf des Sensorsignals. Abbildung 7.3 zeigt hierzu den Einfluss der Fahrgeschwindigkeit bei verschiedenen Wasserhöhen am Beispiel eines Piezo-Folien-Sensors.

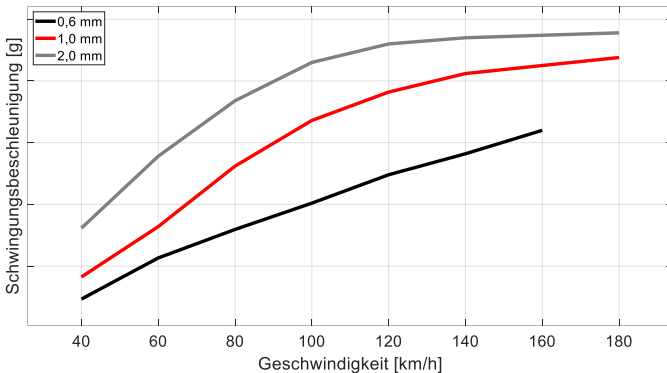


Abbildung 7.3: Einfluss der Fahrgeschwindigkeit bei verschiedenen Wasserhöhen auf das Signal eines Piezo-Folien-Sensors.

Wie zu erwarten, steigt der Signalverlauf bei zunehmender Geschwindigkeit. Entgegen den Überlegungen aus Kap. 6.1 ist jedoch kein progressiver Verlauf, sondern ein degressiver Charakter erkennbar. Die besonders starke Ausprägung der Degression bei zunehmenden Wasserhöhen (hier 1,0 mm und 2,0 mm) auf der Fahrbahn spricht für die Hypothese, dass sich bei größeren Wasserhöhen bereits mehr Wasser in der Schwallgisch löst und somit vorzeitig den Reifen unter einem flacheren Winkel verlässt oder seitlich verdrängt wird.

Bei geringeren Wasserhöhen (hier 0,6 mm) ergibt sich ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Signalverlauf. Das bedeutet, dass die mit zunehmender Geschwindigkeit durch Fliehkraft abnehmende Tropfen-

größe durch die erhöhte kinetische Energie der Wasserpartikel insofern kompensiert wird, dass der Impuls der Tropfen in Summe über der Geschwindigkeit konstant bleibt.

Der Effekt, dass sich ein globales Maximum des Signals bei einer mittleren Geschwindigkeit einstellt, wie es in [66] dargestellt ist, ist nicht erkennbar. Für die Analyse sei auf Kap. 7.1.2 verwiesen.

Reifeneinfluss

Die Gestaltung des Reifenprofils, insbesondere das Negativvolumen, hat einen Einfluss auf die Wasseraufwirbelung des Reifens. Grundsätzlich gilt, dass mehr Negativvolumen eine seitliche Verdrängung des Wassers durch den Reifen verringert, da der Reifen das Wasser im Profil aufnehmen kann. Dies kann zu höherer Wasseraufwirbelung in Tröpfchen- und Schwallgicht führen [2].

Die oben gezeigten Diagramme Abbildung 7.2 und Abbildung 7.3 werden mit einem neuen Winterreifen aufgenommen. Die Kurven des neuen Winterreifen (Mi20Wi_neu) werden daher aus Abbildung 7.3 übernommen und dienen als Orientierungshilfe für die folgende Betrachtung des Reifeneinflusses in Abbildung 7.4.

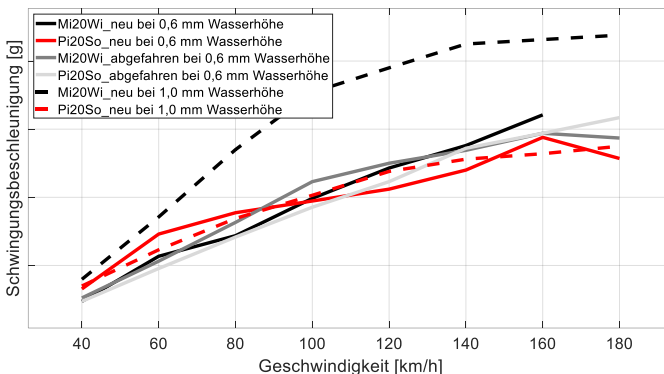


Abbildung 7.4: Einfluss der Geschwindigkeit bei verschiedenen Wasserhöhen und verschiedenen Reifen [2].

Wie Abbildung 7.4 zeigt, spielt die Profilgestaltung (hier dargestellt durch Sommer- und Winterreifen) bei einer Wasserhöhe von 0,6 mm eine untergeordnete Rolle [2]. An manchen Stellen kann hierbei die Anregung durch abgedrehte Reifen sogar geringfügig höher sein als die Anregung der neuwertigen Pendants.

Der Einfluss der Profilgestaltung wird bei einer höheren Wasserhöhe (hier 1,0 mm) zwischen Sommer- und Winterreifen deutlich. Während der Sommerreifen auf dem Niveau der niedrigeren Wasserhöhe verbleibt, steigt das Niveau des Winterreifens deutlich. Die beiden Reifen unterscheiden sich nicht nur in ihrem absoluten Negativvolumen, sondern auch durch die Profilgestaltung, siehe Abbildung 5.13. Während der Sommerreifen sehr dominante Längsrillen hat, sind beim Winterreifen die Querrillen und Lamellen deutlich stärker ausgeprägt. Dies führt zu der Folgerung, dass Querrillen und Lamellen die Wasseraufwirbelung in der Tröpfchengischt stärker fördern als breite Längsrillen. Während sich in breiten Längsrillen das Wasser leichter in der Schwallgisch lösen kann, weil vergleichsweise wenig Wasser im Kontakt mit der Oberfläche steht, binden schmalere Längsrillen, aber vor allem Querrillen und Lamellen das Wasser stärker [2].

Beim Vergleich von Sommer- und Winterreifen ist außerdem zu beachten, dass insbesondere die Längsrillen der unterschiedlichen Reifen nicht an den gleichen Stellen entlang des Reifens in Querrichtung angeordnet sind. Die für diesen Vergleich ausgewerteten Sensoren liegen daher in einem Bereich, bei dem sowohl Sommer- als auch Winterreifen einen Übergang von Längsrille zu Profilblock haben.

Darüber hinaus wurde für die beiden abgedrehten Reifen ab einer Wasserhöhe von 0,6 mm zudem der Beginn der seitlichen Wasserverdrängung festgestellt, siehe Tabelle 5.3.

Sensorposition

Während für die oben beschriebenen Versuche jeweils die gleiche Sensorposition gewählt ist, werden im Folgenden die Sensoren entlang der Radhausschale in y- und z-Richtungen unterschiedlich positioniert [2], siehe Abbildung 6.1.

Diese Versuche zum Einfluss der Sensorposition werden mit gleichzeitig betriebenen Sensoren, neuwertigem Winterreifen und bei 0,6 mm Wasserhöhe durchgeführt. Abbildung 7.5 zeigt den Einfluss der Sensorposition in y-Richtung.

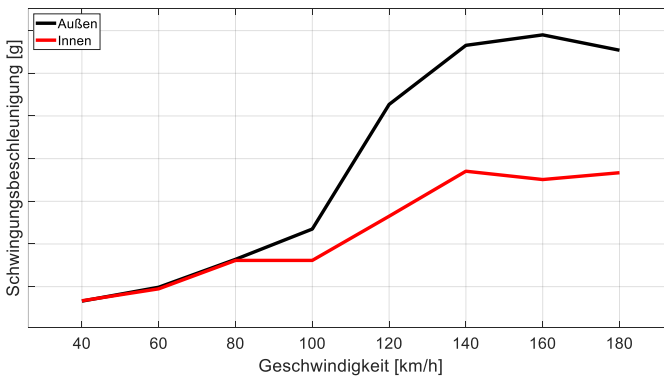


Abbildung 7.5: Einfluss der Sensorposition in y-Richtung über Geschwindigkeit [2, 3].

Die Sensoren sind im Abstand von 6 cm in y-Richtung dabei so versetzt, dass ein Sensor am Übergang zwischen Längsrille und Profilblock (in Abbildung 7.5 „Außen“) und der andere Sensor über einem breiteren Profilblock (in Abbildung 7.5 „Innen“) angebracht ist. Bei niedrigeren Geschwindigkeiten zeigen die unterschiedlichen Sensoren nahezu deckungsgleiche Verläufe, was für eine gleichmäßige, profilunabhängige Ablösung im Bereich geringerer Fliehkräfte spricht. Bei höheren Geschwindigkeiten fließt deutlich mehr Wasser an die Ablösestellen entlang der Profilblockkanten (vergleiche Kap. 5.3.1), so dass dieser Sensor („Außen“) eine höhere Anregung erfährt [2].

Auch in z-Richtung kann die Sensorpositionierung einen deutlichen Einfluss haben, siehe Abbildung 7.6.

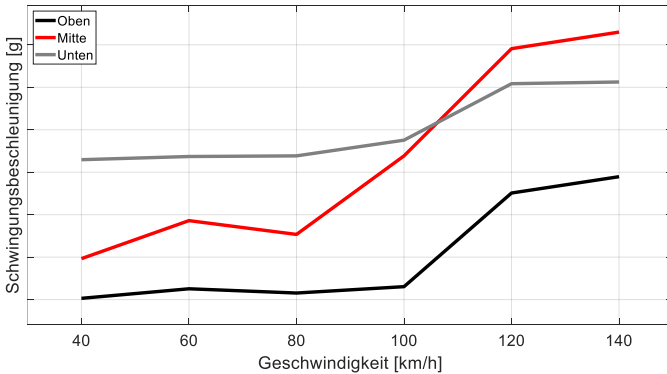


Abbildung 7.6: Einfluss der Sensorposition in z-Richtung über Geschwindigkeit [2, 3].

Grundsätzlich zeigen alle Sensoren einen ansteigenden Verlauf mit einem ausgeprägten Gradienten zwischen 80 km/h und 120 km/h. Der unterste Sensor erfährt im Vergleich bis 100 km/h stets die höchste Anregung. Ursache hierfür ist die schwindende Wassermenge am Reifen entlang der Drehbewegung, die auch für die Verkleinerung der Tropfengröße verantwortlich ist. Die Tatsache, dass oberhalb von 100 km/h die Anregungen am mittleren Sensor höher als am unteren Sensor sind, ist auf die Zunahme der Schwallgicht und die Ausprägung der „Totzone“ zurückzuführen [2]. Eine detaillierte Darstellung liefern die Sensorpositionsvergleiche am Schweller in Kap. 7.1.2.

Kurzzusammenfassung der Laborversuche

Die statischen Laborversuche [2] zeigen, dass die Theorien zur Wasseraufwirbelung im Bereich der Tröpfchengicht und deren Erfassung grundsätzlich richtig sind. Unterschiedliche Fahrbahnneigungen können aufgelöst werden. Um dies auf eine absolute Wasserhöhe zurückzuführen, ist es notwendig, zusätzliche Parameter wie Geschwindigkeit, Reifen und Sensorposition zu kennen.

7.1.2 Validierung auf dem Prüfgelände

Um die Funktion des Systems gänzlich validieren zu können, werden neben Laborversuchen auch Versuche am Realfahrzeug benötigt. Als Zwischenschritt zur Validierung auf öffentlicher Straße werden daher zahlreiche Versuche auf verschiedenen Prüfgeländen durchgeführt.

Wie in Kap. 5.2.1 beschrieben, bieten Prüfgelände spezifische Vor- und Nachteile im Vergleich zu Laborversuchen. Als wesentliche Unterschiede sind auf Seiten der Messstrecken die deutlich schwerer einstellbaren Randbedingungen (konstanter Wasserfilm in definierbarer Höhe) und seitens des Fahrzeugs die Anbringung der Sensoren zu nennen. Im Gegensatz zu den Laborversuchen können neben den Sensoren auf der Radhausschale am Realfahrzeug auch Sensoren an Schweller und Unterboden verbaut werden, siehe Abbildung 6.3. Dabei kommen während der Prüfgeländeversuche auf der Radhausschale die gleichen Sensoren zum Einsatz wie während der Laborversuche.

Für die folgenden Versuche werden Messfahrten auf einer Geraden (Bosch Prüfgelände Boxberg) und einer Kreisbahn (Porsche) bei unterschiedlichen Fahrbahnwasserständen durchgeführt. Dabei entspricht „nass“ ungefähr einer Wasserhöhe von 0,5 mm bis 1,0 mm und „sehr nass“ von 20 mm bis 40 mm.

Die Versuche mit Sensorik auf der Radhausschale zeigen in Bezug auf den Einfluss unterschiedlicher Reifen ein vergleichbares Ergebnis wie die Laborversuche. Schweller- und Unterbodentests werden nur mit einem Reifensatz durchgeführt.

Sensorik auf der Radhausschale

Abbildung 7.7 zeigt den Einfluss von Sensorposition und Geschwindigkeit auf den Verlauf des Sensorsignals. Die Positionen „Oben“ und „Mitte“ sind an gleicher Stelle auf der y-Achse, wohingegen „Unten außen“ und „Unten innen“ von dieser Linie nach innen beziehungsweise außen verschoben sind.

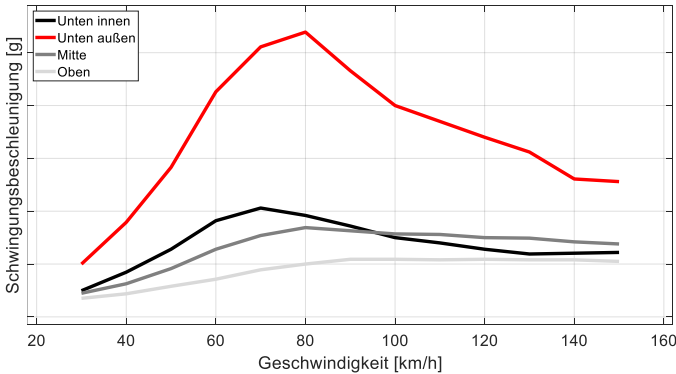


Abbildung 7.7: Einfluss von Sensorposition und Geschwindigkeit.

Im Vergleich zu den Laborversuchen lassen sich zwei wesentliche Merkmale bestätigen. Erstens ist ein sehr prägnanter Einfluss der Sensorposition in y-Richtung erkennbar („Unten außen“ zu „Unten innen“). Zweitens sinkt das zu erwartende Sensorsignal mit höherer Sensorposition in z-Richtung.

Darüber hinaus tritt der Einfluss der Geschwindigkeit stark hervor. Mit steigender Geschwindigkeit geht das Sensorsignal zuerst in Sättigung und fällt im Folgenden auf niedrigere Werte ab. Aus den Ablösemechanismen am Reifen lässt sich dieses Verhalten nicht ableiten Als Ursache führt [66] die aerodynamische Abbremsung der Wasserteilchen durch Verwirbelungen im Radhaus auf. Einen weiteren Effekt liefert die Simulation [129].

Im Vergleich zum Prüfstands Aufbau verhindern Anbauteile im Radhaus einen schnellen Wasserablauf. Zudem können Wasserströme aus anderen Quellen wie der seitlichen Verdrängung in den Sensorbereich gelangen, siehe Abbildung 7.8.

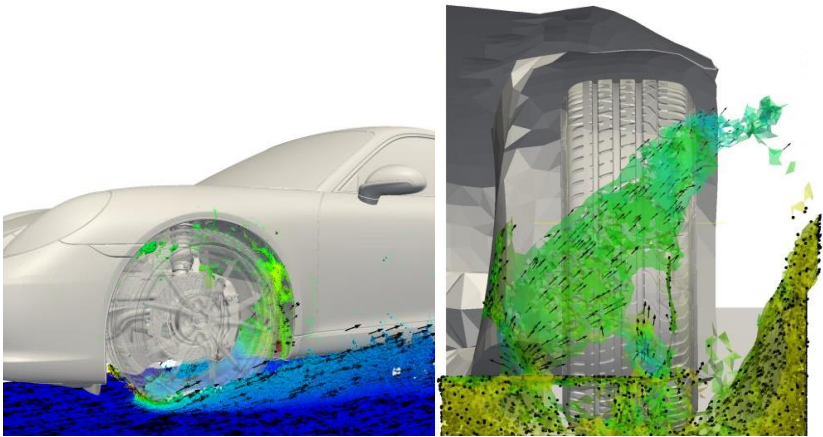


Abbildung 7.8: Umlenkung von Wasserströmungen im Radhaus unter Ausblendung der Wasseraufwirbelung des Reifens [129].

Als Folge entsteht ein dünner Wasserfilm auf der Radhausschale, der neu aufgeworfene Wasserpartikel dämpft, bevor diese die Sensormembran erreichen. Die Ausprägung dieses Dämpfungseffekts wird durch zunehmende Wasserhöhe und Fahrgeschwindigkeit verstärkt, da auf diese Weise der abzuführende Wasservolumenstrom im Radhaus steigt. Gemeinsam mit [109] wird bei zunehmender Wasserhöhe und Fahrgeschwindigkeit auch die Verschiebung eines Wasseraustrittspunkts am Radhaus zu höheren Positionen in z-Richtung beobachtet.

Um der Dämpfung entgegenzuwirken, wird ein Aufbau mit Wasserabscheider vorbereitet, der die Wasserströme vor der Sensormembran umleiten soll, siehe Abbildung 7.9.



Abbildung 7.9: Wasserabscheider vor der Sensormembran.

Durch die Umleitung der von unten kommenden Wasserströme wird die Sensormembran im Idealfall ausschließlich von frisch aufgewirbelten Wasserpartikeln beaufschlagt und erfährt somit keine Dämpfung. Der Wasserabscheider ist hierfür so angefertigt und positioniert, dass die tangentielle Ablösung am Reifen, die direkt auf die Sensormembran trifft, gerade nicht gestört wird. Alle tiefer abgelösten Wasserpartikel werden jedoch um die Sensormembran herumgeleitet.

Abbildung 7.10 zeigt den direkten Vergleich zwischen Testfahrten mit und ohne Anbau des Wasserabscheiders. Sowohl im linken als auch im rechten Radhaus ist eine Steigerung der Signalanregung durch Verwendung des Wasserabscheiders sichtbar, jedoch ist der Einfluss im rechten Radhaus deutlich stärker. Ursache hierfür ist ein leichter Versatz des Wasserabscheiders in z-Richtung zwischen linkem und rechtem Radhaus.

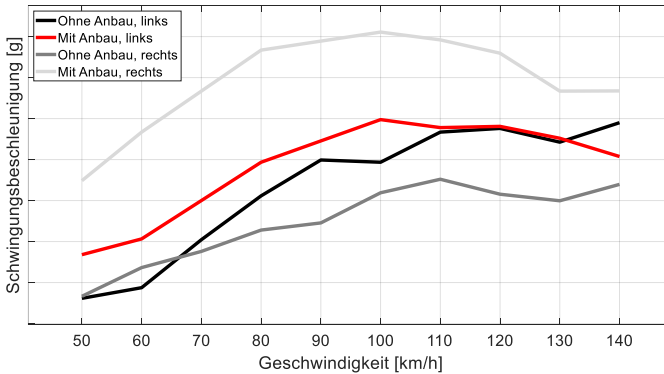


Abbildung 7.10: Einfluss der Fahrgeschwindigkeit in linkem und rechtem Radhaus mit und ohne Anbau des Wasserabscheiders.

Wie insbesondere an dem Kurvenverlauf „Mit Anbau, rechts“ zu erkennen ist, vermag der Wasserabscheider jedoch die Dämpfung des Sensorsignals durch Umleiten der Wasserschicht nicht zu vermeiden. Daher ist abzuleiten, dass der Einfluss der aerodynamischen Verwirbelung nicht vernachlässigbar ist. Dieses Dämpfungsverhalten ist nicht im Labor sichtbar, da hier eine vollkommen andere aerodynamische Strömung vorherrscht.

Sensorik am Schweller

Das Dämpfungsverhalten auf der Radhausschale ist in den Ergebnissen der Schweller- und Unterbodenversuche nicht mehr zu erkennen. Für die Schwellerversuche zeigt Abbildung 7.11 ein mit der Geschwindigkeit stetig und nahezu linear zunehmendes Verhalten der Anregung bis 80 km/h. Aufgrund der Versuche auf sehr nasser Fahrbahn können Geschwindigkeiten oberhalb von 80 km/h für diesen Zustand nicht erreicht werden.

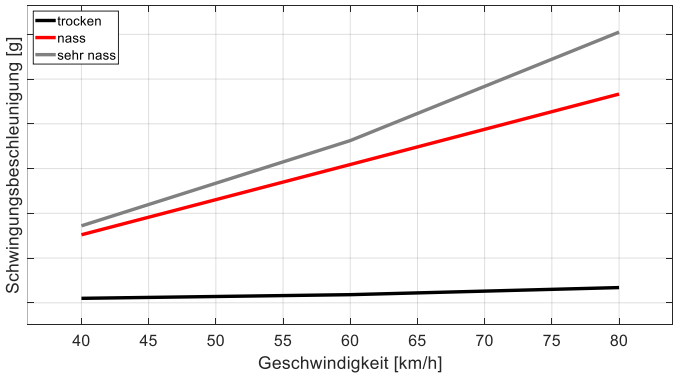


Abbildung 7.11: Einfluss von Wasserhöhe und Geschwindigkeit am Schwellen (Position 7 in Abbildung 6.3) [3].

Außerdem sichtbar in Abbildung 7.11 ist die deutliche Unterscheidbarkeit zwischen den Zuständen „trocken“, „nass“ und „sehr nass“.

Dass dieses Verhalten, insbesondere in Bezug auf den Einfluss der Geschwindigkeit, stark abhängig von der Positionierung des Sensors ist, zeigt Abbildung 7.12.

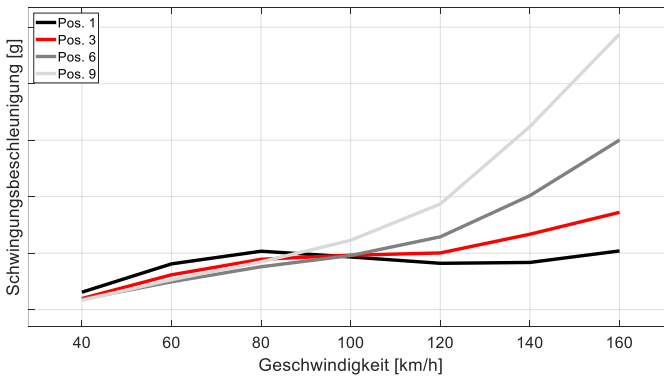


Abbildung 7.12: Einfluss der Geschwindigkeit an unterschiedlichen Sensorpositionen am Schweller bei nasser Fahrbahn [2, 3].

Während bei nasser Fahrbahn für die Position 3 ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen Sensoranregung und Geschwindigkeit besteht, ist mit zunehmendem Verschieben des Sensors entlang der x-Achse in Richtung Fahrzeugheck (Position 6 und 9) ein progressiver Anstieg über Geschwindigkeit zu erkennen [2].

Ursache hierfür ist die zunehmende Wassermenge, die den Sensor erreichen kann. Unter der Annahme, dass bei geringen Geschwindigkeiten die abgelösten Wassermengen vom Reifen eine parabolische Flugbahn besitzen, erreicht mehr Wasser die vorderen Sensoren (Position 1). Dieses Wasser stammt zunächst ausschließlich von der Tröpfchengischt. Mit zunehmender Geschwindigkeit (oberhalb 80 km/h) steigt der Einfluss der Schwallgicht. Für den vorderen Sensor (Position 1), der nicht von der Schwallgicht erreicht wird, sinkt durch die Zunahme der Schwallgicht der Einfluss der Tröpfchengischt (Totzone). Die hinteren Sensoren (Position 6 und 9) erfahren diese Totzone nicht. Steigt die Geschwindigkeit weiter (oberhalb 130 km/h), wird der Einfluss der Tröpfchengischt bei den hinteren Sensoren durch die Schwallgicht überlagert, weshalb es zu einem unstetigen Verlauf und starkem Anstieg in den Kurven kommt [2].

Abbildung 7.13 zeigt eine neue Versuchsvariable und Einflussgröße auf das Sensorsignal, den Lenkwinkel.

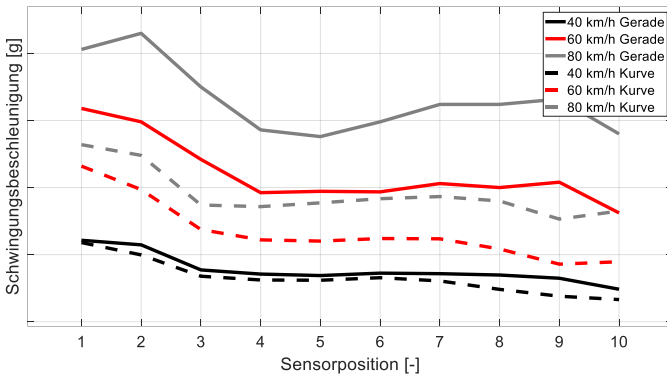


Abbildung 7.13: Einfluss des Lenkwinkels in Abhängigkeit der Position am Schweller.

Die in der Abbildung als Kurve gekennzeichneten Messwerte werden auf einer Kreisbahn gefahren, auf der der Lenkwinkelbedarf mit zunehmender Geschwindigkeit steigt. Vornehmlich erkennbar ist, dass durch den Lenkwinkel die Anregungen an den Sensoren verringert werden [2]. Ursache hierfür ist, dass die Wasseraufwirbelung nicht mehr direkt auf den Schweller gerichtet, sondern um den Radlenkwinkel verdreht ist. Daher ist mit zunehmender Geschwindigkeit und somit steigendem Lenkwinkel (maximaler Lenkradwinkel 70°) die Differenz zwischen Versuchen auf der Geraden und in der Kurve größer. Zudem ist eine leichte Zunahme der Abweichungen entlang der x-Achse in Richtung des Fahrzeughecks erahnbar, da eine Drehung des Reifens dort eine stärkere Verschiebung des Gischtaufreffpunkts auslöst.

Sensorik am Unterboden

Die Versuche mit Sensorik am Unterboden wurden bereits in [3] veröffentlicht. Sie dienen primär der Bestätigung des Modells der seitlichen Wasserverdrängung durch den Reifen. Wie aus Abbildung 7.14 zu sehen ist, lässt sich am

Unterboden besonders gut zwischen einer nassen und einer sehr nassen Fahrbahn unterscheiden.

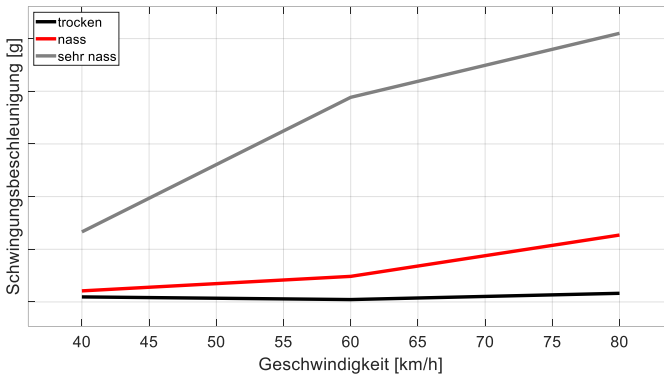


Abbildung 7.14: Einfluss von Fahrgeschwindigkeit und Fahrbahnässegrad am Unterboden Position 4 in der vorderen Reihe [3].

Bei beiden Nässegraden ist das interne Aufnahmevolumen des Reifens bereits ausgeschöpft, so dass es zu einer seitlichen Verdrängung des Wassers kommt. Im Vergleich zu den Ergebnissen am Schweller aus Abbildung 7.11 ist die Unterscheidbarkeit zwischen nass und sehr nass am Unterboden deutlich ausgeprägter. Versuche auf feuchter Fahrbahn ergeben Signalverläufe, die kaum von den Verläufen auf trockener Fahrbahn unterscheidbar sind. Hierfür verantwortlich ist die nicht vorhandene seitliche Verdrängung bei feuchter Fahrbahn, wie auch in [66] festgestellt wird.

Die Anregung am Unterboden bei nasser Fahrbahn ist auch abhängig von der Position, siehe Abbildung 7.15.

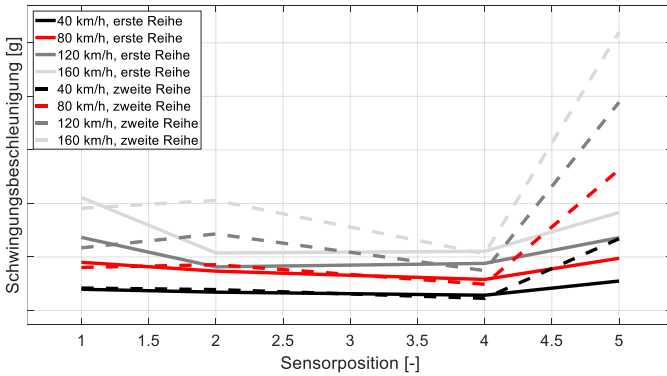


Abbildung 7.15: Einfluss von Fahrgeschwindigkeit und Position bei nasser Fahrbahn. Sensoren an Position 3 ohne Funktion [3].

Es sei daran erinnert, dass die Sensoren an den Positionen 1, 2 und 5 auf einem anderen Materialtyp als die Sensoren an Position 3 und 4 angebracht sind. Neben dem Material, auf dem die Sensoren befestigt sind, spielt auch die reine Positionierung eine Rolle. Während beispielsweise nahe des Schwellers (Position 1) nur wenig Abweichung zwischen den Anregungen an den Sensoren in der ersten und zweiten Reihe herrscht, ist dies bei der nächstgelegenen Position 2 deutlich anders. Hier erfahren die Sensoren in der hinteren Reihe eine stärkere Anregung. Ursache hierfür ist die Verdrängung, die sich am Reifen aufbaut und zuerst auf den Sensor an Position 1 in der vorderen Reihe und anschließend auf den Sensor an Position 2 in der hinteren Reihe trifft [3].

Für den Sensor an Position 5 in der zweiten Reihe ergaben nähere Betrachtungen zwischen Versuchen bei trockener und nasser Fahrbahn eine allgemein zu sensible Kalibrierung.

Der Entfall der Unterbodenverkleidung als Sensormaterialträger sei ebenfalls erwähnt. Da sich das Material der Unterbodenverkleidung mit dem Material der Radhausschale vergleichen lässt, werden in Bezug auf eine Integration mit Unterbodenverkleidung ähnliche Effekte erwartet, was die Signalausbreitung innerhalb der x-y-Ebene betrifft (bei der Radhausschale y-z-Ebene).

Kurzzusammenfassung der Prüfgeländeversuche

Im Wesentlichen können die Ergebnisse der Laborversuche auf das Gesamtfahrzeug übertragen werden. Abweichend zeigt sich das Verhalten der Sensoranregung im Radhaus in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Als Ursache wird neben der aus [66] bekannten aerodynamischen Abbremsung ein Wasserfilm identifiziert, der im Vergleich zum Labor durch mangelnde Abführungsmöglichkeiten des Wasserstroms im Radhaus entsteht und zu einer Dämpfung nachfolgender Wasserpartikel führt. Sensoren an Schweller und Unterboden sind von diesem Dämpfungseffekt nicht betroffen und weisen zudem ein besseres Auflösungspotential zwischen höheren Fahrbahnneigungen auf.

7.1.3 Validierung auf öffentlicher Straße

Da sich auf den Prüfgeländen nur bestimmte konstante Fahrbahnneigungen einstellen lassen, erfolgt die dritte Stufe der Validierung auf öffentlicher Straße. Zur Bestimmung der nicht einstellbaren Fahrbahnneigungen wird ein optischer Referenzsensor verwendet, vergleiche Kap. 4.2. Die Messfahrt findet an einem regnerischen Tag statt und beinhaltet unterschiedliche Fahrbahnabschnitte mit schlechterer und besserer Drainage. Einen Auszug aus der Messfahrt bei einer Fahrgeschwindigkeit von 140 km/h und mit dem Referenzsensor gemessenen Wasserhöhen zwischen 0,4 mm und 1,1 mm zeigt Abbildung 7.16.

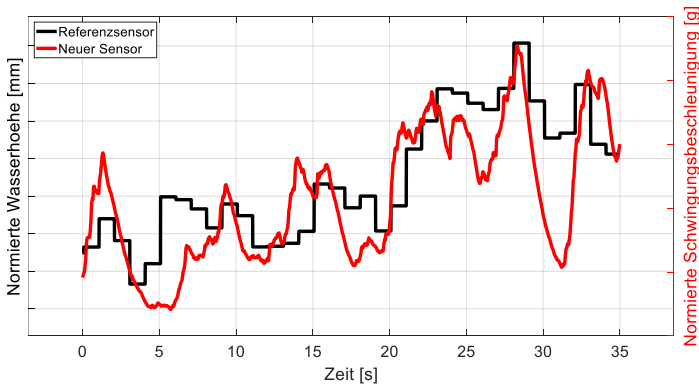


Abbildung 7.16: Vergleich bei normierten Signalwerten zwischen Referenzsensor und neuem Sensor (Schweller Position 7, nicht kalibriert) auf öffentlicher regennasser Straße [2].

Bei dem „neuen Sensor“ handelt es sich um einen Beschleunigungssensor am Schweller (Position 7), siehe Abbildung 6.3 und Abbildung 7.11. Da das neue System nicht auf absolute Wasserhöhen kalibriert ist, soll nur das Relativverhalten der beiden Sensoren verglichen werden. Zur besseren Interpretation des Diagramms werden daher die jeweiligen Sensorsignale auf ihr Maximum normiert. Der Referenzsensor liefert darüber hinaus immer einen über eine Sekunde gemittelten Wert.

Die Verläufe der beiden verschiedenen Sensorsignale zeigen hierbei im Rahmen ihrer Trends (Steigungen und lokale Extrema) eine gewisse Übereinstimmung [2]. Die in Kap. 4.4 definierten Anforderungen an eine Fahrbahn­nässe­gradauflösung im Bereich von 0 mm bis 0,5 mm und von 0,5 mm bis 1,5 mm sind gegeben, so dass von einer grundsätzlichen Bestätigung des Konzepts und somit einer positiven Validierung gesprochen werden kann.

An dieser Stelle sei zudem angemerkt, dass der Fahrbahneinfluss nur untergeordnet bewertet wurde. Wie in Kap. 2.2.4 erwähnt, haben unterschiedliche Fahrbahnoberflächen durch ihre Makrostruktur unterschiedliche Drainagekapazitäten. Beispielsweise wären (normaler) Asphalt, Flüsterasphalt oder Beton

zu nennen. Grundsätzlich wurde festgestellt, dass sich diese Fahrbahntypen sowohl in ihrem Signalverhalten bei Trockenheit als auch bei Nässe unterscheiden. Bei Nässe korreliert das Signalverhalten spürbar mit der Drainagekapazität insofern, dass bei guter Drainage wie zum Beispiel Flüsterasphalt, wo auch visuell deutlich weniger Gischt wahrnehmbar ist und demnach bei gleichem Niederschlag ein geringerer Fahrbahnnässegrad als auf beispielsweise Asphalt oder Beton vorherrscht, auch ein geringerer Signalwert gemessen wird. Die Einflüsse bei Trockenheit sind zwar grundsätzlich messbar, liegen jedoch in Relation zu jeglichen Differenzen einer trockenen und nassen Fahrbahn im vernachlässigbaren Bereich.

7.2 Bewertung

Das vorgestellte Sensorkonzept ist grundsätzlich in der Lage, unterschiedliche Wasserhöhen beziehungsweise Fahrbahnnässegrade voneinander zu unterscheiden. Die in Kap. 4 quantifizierten Anforderungen in mindestens vier Stufen (0 mm, 0 mm bis 0,5 mm, 0,5 mm bis 1,5 mm und größer 2 mm) können erfüllt werden. Darüber hinaus ist im Bereich 0 mm bis 2 mm Wasserhöhe eine kontinuierliche Schätzung theoretisch möglich.

Die Auflösung verschiedener Fahrbahnnässegrade ist dabei abhängig von der Sensorposition. Geringe Wasserhöhen ($< 0,5$ mm) lassen sich vornehmlich mit einem Sensor im Radhaus erfassen. Je tiefer die Sensoren dabei angebracht werden, desto empfindlicher sind diese bei geringen Wasserhöhen. Nachteilig an einer sehr niedrigen Sensorposition ist jedoch das Verhalten mit zunehmender Geschwindigkeit und Wasserhöhe, was durch Wechselwirkungen mit der Schwallgischt und Totzone entsteht. Zudem entstehen in der Radhausschale durch aerodynamische Turbulenzen und eine dämpfende Wasserschicht auf der Sensormembran Dämpfungseffekte, die für die Interpretation des Signalverlaufs berücksichtigt werden müssen.

Mittlere Wasserhöhen (0,5 mm-1,5 mm) werden vorzugsweise mittels Sensorik am Schweller detektiert [3]. Hier treten keine Dämpfungseffekte wie an der Radhausschale auf. Je sensibler das System gegenüber niedrigen Wasserhöhen

sein soll, desto weiter Richtung Vorderachse sollte die Sensorik verbaut sein. Bei sehr nahe an der Achse verbauten Sensoren kommt es jedoch ebenfalls zu Wechselwirkungen zwischen Tröpfen- und Schwallgicht, was bei der Interpretation des Sensorverlaufs über Geschwindigkeit entsprechend berücksichtigt werden muss. Bei weiter Richtung Heck positionierten Sensoren kann der Einfluss des Lenkwinkels steigen.

Für die Erfassung besonders großer Wasserhöhen (> 2 mm) wird die Sensorik am besten am Unterboden des Fahrzeugs platziert. Hierbei ist eine Position in Richtung Schweller einer weiter in Fahrzeugmitte liegenden Position vorzuziehen, da sich die Wasserpartikel aus der seitlichen Verdrängung nicht in allen Fahrsituationen beliebig weit in die Fahrzeugmitte verteilen.

Um eine möglichst hohe Bandbreite an auflösbaren Wasserhöhen zu erhalten, können Sensoren in allen drei Bereichen positioniert werden [3].

Wie Kap. 7.1 zeigt, muss für die Bestimmung einer absoluten Wasserhöhe eine aufwendige Kalibrierung des Systems stattfinden [3]. Manche Einflüsse sind vergleichsweise leicht zu integrieren (zum Beispiel: Fahrgeschwindigkeit). Andere Einflüsse sind hingegen deutlich schwerer zu berücksichtigen, weil sie einen komplexen Einfluss haben (Reifenprofilgeometrie) oder selbst schwer zu erfassen sind (zum Beispiel: Reifenprofiltiefe).

Durch die Überlagerung zusätzlicher Einflüsse (zum Beispiel: Lenkwinkel) können die Abstimmungsaufwände stark ansteigen. Alternativ können Schätzungen ausgesetzt werden, wenn solche Einflüsse vom Normzustand abweichen. Dies würde zu einer geringeren Verfügbarkeit des Systems führen (Beispiel: Schätzung nur bei Geradeausfahrt).

Es entsteht somit ein Spannungsfeld zwischen erreichbarer Signalgüte, Robustheit und Verfügbarkeit, welches teilweise durch erhöhte Applikationsaufwände entspannt werden kann.

Neben den bekannten messbaren Einflüssen stellen insbesondere nicht oder nur schwer messbare Größen (zum Beispiel: Reifenprofiltiefe) eine weitere Herausforderung an das System dar. Eine Fehlerkennung bei Anregung durch

andere Partikel (Schnee, Sand, Schotter, ...) wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet.

Im Vergleich zu anderen Systemen ist das neue Konzept im Rahmen der hier abgeleiteten Anforderungen nichtsdestotrotz eine wertvolle Neuerung.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wird ein System konzipiert und untersucht, das den Fahrbahn­nässegrad bestimmen kann.

Für die Auslegung des Systems werden zuerst Anforderungen definiert, um einen Serien-Einsatz im Automobilbereich zu ermöglichen. Als wesentliche Kriterien gelten hierbei eine einfache Datenverarbeitung, ein kleiner und kostengünstiger Sensor sowie eine gute Auflösung von Wasserhöhen unterhalb von 0,5 mm, eine mittlere Auflösung bis 1,5 mm sowie eine allgemeine Erkennung von noch größeren Wasserhöhen.

Das Konzept, das dem System zugrunde liegt, bewertet zur Schätzung des Fahrbahn­nässegrads die Wasseraufwirbelung des Reifens. Die bereits bekannten Ansätze dieses Konzepts werden innerhalb dieser Arbeit tiefgehend analysiert. Im Vordergrund stehen hierbei die Wasseraufwirbelungsmechanismen durch den Reifen sowie ihre sensorische Erfassung (Sensorwahl, Positionierung und Signalanalyse).

Mittels Kamerasystem werden drei markante Mechanismen analysiert, mit denen die Wasseraufwirbelung beschrieben werden kann. Die als Tröpfchengischt bezeichneten Wasserablösungen entlang des Reifenumfangs sind besonders prägnant bei geringen Fahrbahn­nässegraden. Bei mittleren Fahrbahn­nässegraden übernimmt die als Schwallgicht bezeichnete Ablösung am Reifenlatschübergang eine zunehmend wichtige Rolle. Bei hohen Fahrbahn­nässegraden, wenn das interne Aufnahmevolumen eines Reifens erschöpft ist, treten seitliche und frontale Wasserverdrängung in den Vordergrund. Neben dem Fahrbahn­nässegrad werden hierbei weitere Einflussfaktoren wie zum Beispiel Geschwindigkeit und Reifen identifiziert.

Für die Erfassung der Aufwirbelung in der Fahrzeuganwendung werden unterschiedliche Sensoren untersucht. Allen gemein ist die Messung von Körperschall, der durch das Auftreffen von Wasserpartikeln auf einer festen Oberfläche entsteht. Für die Wahl der Sensorposition ist der gewünschte

Auflösungsbereich des Fahrbahn­n­se­grads zu berücksichtigen. Um geringe Fahrbahn­n­se­grade auflösen zu können, bietet sich eine Detektion der Tröpfchengischt mittels Sensorik auf der Radhausschale an. Für mittlere Fahrbahn­n­se­grade kann Sensorik zur Erkennung von Schwallgisch am Schweller platziert werden. Bei sehr hohen Fahrbahn­n­se­graden empfiehlt sich eine Sensierung der seitlichen Verdrängung am Unterboden des Fahrzeugs.

Um einen Fahrbahn­n­se­grad nicht nur relativ bestimmen zu können, sondern auch absolute Wasserhöhen abzuleiten, muss das System kalibriert werden. Die hohe Anzahl von Einflussparametern erschwert diese Aufgabe. Zudem können heute noch nicht oder nur sehr schwer messbare Einflüsse wie zum Beispiel die Reifenprofiltiefe die Güte des Systems verringern. Trotzdem bietet dieses System wesentliche Vorteile nach den hier abgeleiteten Anforderungen im Vergleich zu den bisher bekannten Systemen.

Sollten sich im Laborbereich neue Möglichkeiten ergeben, die eine präzisere und einfachere Messung von Wasseraufwirbelungen erlauben, könnten weitere Detailuntersuchungen für die Wasseraufwirbelungsmechanismen durchgeführt werden. Eine Weiterentwicklung zur Verbesserung des Konzepts wird – nach heutigem Stand – trotzdem nicht als zielführend für einen Serieneinsatz erachtet, bis bei den physikalischen Herausforderungen (überlagerte und teilweise noch nicht messbare Einflüsse) ein entsprechender Durchbruch erreicht wurde. Vielmehr sollte das System als Baustein für eine von mehreren Konzepten gestützte Schätzung betrachtet werden. Hierfür ist der heutige Stand ausreichend.

Literaturverzeichnis

- [1] Schmiedel, B. u. Gauterin, F.: Tire Splash and Spray Directly before and during Hydroplaning. *Tire Science and Technology* 47 (2019) 2, S. 141–159
- [2] Schmiedel, B., Gauterin, F. u. Unrau, H.-J.: Road wetness quantification via tyre spray. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 233 (2019) 1, S. 28–37
- [3] Schmiedel, B., Gauterin, F. u. Unrau, H.-J.: Study of system layouts for road wetness quantification via tire spray. *Automotive and Engine Technology* 4 (2019) 1-2, S. 63–73
- [4] Statistisches Bundesamt Destatis: Verkehrsunfälle. Fachserie 8 Reihe 7 (2016)
- [5] Barry, D.: *Dave Barry turns fifty*. New York, NY: Ballantine Books 1999
- [6] Svenson, O.: Are we all less risky and more skillful than our fellow drivers? *Acta Psychologica* 47 (1981) 2, S. 143–148
- [7] Bachmann, T.: *Literaturrecherche zum Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn*. Fortschritts-Berichte VDI Reihe 12, Bd. 286. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996
- [8] Eichhorn, U.: *Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn - Einfluss und Erkennung*. Dissertation. Fortschritts-Berichte VDI Reihe 12, Bd. 222, TH Darmstadt. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994
- [9] Meyer, W. E. u. Kummer, H. W.: Die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn. *ATZ* 66 (1964) 8, S. 245–250

- [10] Kummer, H. W.: Unified Theory of Rubber and Tire Friction. Engineering Research Bulletin, Department of Mechanical Engineering. Pennsylvania State University: Engineering Research Bulletin B-94 1966
- [11] Kummer, H. W. u. Meyer, W. E.: Verbesserter Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn. Ergebnisse einer neuen Reibungstheorie. ATZ 69 (1967) 8+11, 245-251 und 382-386
- [12] Bachmann, T.: Wechselwirkungen im Prozess der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn. Dissertation. Fortschritts-Berichte VDI Reihe 12, Bd. 360, Technische Universität Darmstadt. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998
- [13] Michelin Reifenwerke KGaA: Der Reifen. Haftung - was Auto und Straße verbindet. Karlsruhe: Michelin Reifenwerke KGaA 2005
- [14] Vacherand, J.-M.: A physicist view to tire traction. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics 27 (2006), S. 271–277
- [15] Hüsemann, T., Goertz, H., Hartweg, C. P. u. Schrüllkamp, T.: Bestimmung der Reibwerte zwischen Reifen und Fahrbahn - Ein methodischer Ansatz. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik (2006) 15, S. 679–718
- [16] Popov, V.: Gummireibung und Kontaktmechanik von Gummi. In: Kontaktmechanik und Reibung. Heidelberg: Springer Berlin 2010, S. 257–273
- [17] Klempau, F.: Untersuchungen zum Aufbau eines Reibwertvorhersagesystems im fahrenden Fahrzeug. Dissertation. Fortschritts-Berichte VDI Reihe 12, Bd. 576, Technische Universität Darmstadt. Düsseldorf: VDI-Verlag 2003
- [18] Persson, B.: On the theory of rubber friction. Surface Science 401 (1998) 3, S. 445–454

- [19] Schroeder, W.: Fluidmechanik, Aerodynamisches Institut und Lehrstuhl für Strömungslehre der RWTH Aachen. Aachen: Wissenschaftsverlag Mainz 2010
- [20] Gnadler, R., Unrau, H.-J., Fischlein, H. u. Frey, M.: Umfangskraftverhalten von Pkw-Reifen bei unterschiedlichen Fahrbahnzuständen. ATZ 98 (1996), S. 458–466
- [21] Yager, T. J., Stubbs, S. M. u. McCarty, J. L.: The Effect of Chine Tires on Nose Gear Water-spray Characteristics of a Twin-engine Airplane. NASA Technical Memorandum. United States 1975
- [22] Wohanka, U.: Ermittlung von Reifenkennfeldern auf definiert angelegten Fahrbahnen. Dissertation, Universität Stuttgart. Stuttgart: Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart 2001
- [23] Holzwarth, F.: Entwicklung eines Meßverfahrens zur berührungslosen Erfassung des Wasserfilms auf Fahrzeugreifen. Diplomarbeit, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik. Stuttgart: Universität Stuttgart 1989
- [24] Slibar, A.: Der Vorgang des "Aquaplaning" in strenger Berücksichtigung der Wasserfilmdicken, der Reifenaufstandsflächen, der Profilgestaltung und der Fahrbahnbeschaffenheit. Forschungsauftrag des Bundesministeriums für Bauten und Technik, Bd. 26. Wien 1974
- [25] Horne, W. B. u. Dreher, R. C.: Phenomena of Pneumatic Tire Hydroplaning. NASA Technical Note. NASA TN D-2056. United States 1963
- [26] Horne, W. B. u. Leland, T.: Influence of Tire Tread Pattern and Runway Surface Condition on Braking Friction and Rolling resistance of a Modern Aircraft Tire. NASA Technical Note. NASA TN D-1376. United States 1962

- [27] Trzesniowski, M.: Rennwagentechnik. Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme. Reifen und Räder. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014
- [28] Wright, P. u. Matthews, T.: Formula 1 Technology. Warrendale, Pa.: SAE International 2001
- [29] Nakkel, E.: Straßenbestandserhaltung. 18. Weltstraßenkongreß (PI-ARC), Brüssel. Weltweit wachsender Straßenverkehr - weltweiter Erfahrungsaustausch. Bitumen 4 (1988)
- [30] Fischlein, H., Gnadler, R. u. Unrau, H.-J.: Der Einfluss der Fahrbahnoberflächenstruktur auf das Kraftschlussverhalten von Pkw-Reifen bei trockener und nasser Fahrbahn. ATZ Automobiltech Zeitschrift 103 (2001), S. 950–962
- [31] Greiner, M. u. Heimann, P.: Reifenrollwiderstand - Nassgriff - Reifen-Fahrbahn-Geräusch. Abschlussbericht, Karlsruher Institut für Technologie und Universität Stuttgart. Karlsruhe, Stuttgart 2013
- [32] Zipkes, E.: Über das Leistungsvermögen einer Straßenoberfläche und ihr Angebot im Adhäsionsbereich. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 2 (1983)
- [33] Fischlein, H.: Einfluss der Fahrbahngriffigkeit auf das Kraftschlussverhalten von Pkw-Reifen. Dissertation, Universität Karlsruhe. Karlsruhe 1999
- [34] Gustafsson, F.: Slip-based tire-road friction estimation. Automatica 33 (1997) 6, S. 1087–1099
- [35] EP1558456: Road friction indicator for all wheel drive road vehicles. Forssell, U., Gustafsson, F. u. Stenman, A. 15.10.2003
- [36] Eckstein, L.: Vertikal- und Querdynamik von Kraftfahrzeugen. Vorlesungsumdruck Fahrzeugtechnik II, IKA RWTH Aachen. Aachen 2010

- [37] Genta, G. u. Morello, L.: The Automotive Chassis. Volume 1: Components Design. Mechanical Engineering Series. Mechanical Engineering Series. Dordrecht: Springer Dordrecht 2009
- [38] Gauterin, F. u. Unrau, H.-J.: Script zur Vorlesung Grundlagen der Fahrzeugtechnik II. Stand Sommersemester 2017, Institut für Fahrzeugsystemtechnik. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie 2017
- [39] Bootz, A., Gruber, S., Holtschulze, J., Kroiss, H. u. Kunze, K.: Fahrwerk. In: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 735–924
- [40] Gough, V.-H.: Seitenkraft und Seitenverschiebung in der Berührungsfläche zwischen Reifen und Fahrbahn. ATZ 19 (1961)
- [41] Yung-Hsiang Judy Hsu: Estimation and Control of Lateral Tire Forces Using Steering Torque. Dissertation, Stanford University, Department of Mechanical Engineering. Stanford 2009
- [42] 10319662: Verfahren zur Ermittlung des Fahrbahnreibwerts während des Betriebs eines Kraftfahrzeugs. Baumgarten, G. 26.05.2009
- [43] Pacejka, H. B.: Tire and Vehicle Dynamics. Oxford: Elsevier Scientific Publishing Company 2002
- [44] US 2011/0118989 A1: Method for Estimating Tire Wear and Apparatus for Estimating Tire Wear. Hiroshi, M. 25.06.2009
- [45] Leach, R.: Optical Measurement of Surface Topography. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2011
- [46] Végh, I.: Erkennung von Fahrbahnoberflächenart und -beschaffenheit mit Akustik- und Regensensorik. Beitrag zum Dynamischen-Fahrbahn-Informationen-System DFIS. Zugl.: Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2008. Berichte aus der Fahrzeugtechnik. Aachen: Shaker 2009

- [47] Pudenz, K.: Sensorfusion erkennt Regen, Schnee und Eis auf der Fahrbahn, 2010. <https://www.springerprofessional.de/automobil---motoren/sensorfusion-erkennt-regen-schnee-und-eis-auf-der-fahrbahn/6582424>, abgerufen am: 23.08.2019
- [48] Stefanie Eckardt: Continental erhöht aktive Fahrsicherheit. Road Condition Observer erkennt Straßenverhältnisse. <http://www.elektroniknet.de/elektronik-automotive/assistenzsysteme/road-condition-observer-erkennt-strassenverhaeltnisse-140414.html>, abgerufen am: 09.08.2017
- [49] Schmiedel, B.: Fahrbahn-Nässe und Fahrbahn-Glätte-Detektion zur Warnung vor gefährlichen Fahrzuständen. Masterthesis, RWTH Aachen University, Institut für Kraftfahrzeuge Aachen. 2014
- [50] Jarisa, W., Hartmann, B., Schönemann, B., Meister, T., Henze, R. u. Küçükay, F.: Road condition classification using information fusion. International Munich Chassis Symposium. Wiesbaden: Springer Vieweg 2016
- [51] Optical Sensors: Road Eye. <http://www.opticalsensors.se/roadeye.html>, abgerufen am: 09.08.2017
- [52] Bühler, M.: Möglichkeiten zur Ermittlung von Fahrbahnnässe zur Warnung vor gefährlichen Fahrzuständen. Bachelorthesis, Hochschule Esslingen, Fakultät Fahrzeugtechnik. Esslingen 2012
- [53] Luftt: MARWIS specifications. http://www.luftt-marwis.com/en_US/specifications, abgerufen am: 09.08.2017
- [54] MetSense: MetRoadMobile Internetpräsenz. www.metsense.com/product?p=MetRoadMobile, abgerufen am: 10.08.2017
- [55] Wählin, J., Jonsson, P., Baad, H., Edblad, J., Vaa, T., Röien, J., Cassegren, J., Haavasoja, T. u. Schedler, K.: Laboratory test of five different

- optical road condition sensors. Conference Paper. SIRWEC, At Colorado, USA (2016)
- [56] Görich, H.-J.: System zur Ermittlung des aktuellen Kraftschlusspotentials eines PKW im Fahrbetrieb. Fortschritts-Berichte VDI Reihe 12, Bd. 181. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993
- [57] Ari J. Tuononen and Lassi Hartikainen: Optical position detection sensor to measure tyre carcass deflections in aquaplaning. International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing 2008 (2008) 3, S. 189–197
- [58] Fach, M.: Lokale Effekte der Reibung zwischen Pkw-Reifen und Fahrbahn. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 102 (2000) 7-8, S. 628–635
- [59] Cheli, F., Audisio, G., Brusarosco, M. u. Mancosu, F.: Cyber Tyre: A Novel Sensor to Improve Vehicle's Safety. SAE International (2011)
- [60] Pirelli & C. S.p.A: ADAS Systems: Hi-Tech cars and Cyber Tyres, 2016. <http://tyres.pirelli.com/global/en-ww/adas-system-hi-tech-cars-and-cyber-tyres>, abgerufen am: 11.07.2022
- [61] EP 1431728 A1: Verfahren zur Ermittlung eines Strassenzustands während des Fahrbetriebs eines Kraftfahrzeugs. Bhagavathula, S., Katragadda, S., Peravali, R. u. Trost, J. 27.11.2003
- [62] DE 19843563 A1: Vorrichtung zur Erfassung von Nässe. Eschler, J. 23.09.1998
- [63] DE 4213221 A1: Verfahren zur Erfassung der Benetzung einer Fahrbahnoberfläche. Görich, H.-J. u. Jacobi, S. 22.04.1992
- [64] DE4235809C2: Sensorsystem an Kraftfahrzeugen zur Erkennung von Nässe auf der Fahrbahn. Röder, A., Zülow, H. v. u. Bodier, R. 23.10.1992

- [65] DE4317030 C2: Verfahren zum Erkennen des Fahrzustandes an einem Fahrzeug bei nasser Fahrbahn. Arnold, W., Roeder, A. u. Ruminy, L. 21.05.1993
- [66] DE 10107862 A1: Verfahren zur Bestimmung eines Reibbeiwertes zwischen einem Kraftfahrzeugreifen und einer nassen Fahrbahn. Block, W., Grosch, K. u. Zülów, H. v. 20.02.2001
- [67] DE 19543137 A1: Sensor zum Erfassen der Benetzung einer Fahrbahn. Jacobi, S. 18.11.1995
- [68] DE 10 2015 106 408 A1: Sensoranordnung zum Erkennen eines Zustands einer Fahrbahn mit einem Ultraschallsensor, Fahrerassistenzsystem, Kraftfahrzeug sowie dazugehöriges Verfahren. Schmiedel, B., Hofmann, H., Jung, T., Jacobi, S., Maise, T., Weber, N. u. Schuler, T. 27.04.2015
- [69] DE102015106401A1: Sensoranordnung zum Erkennen eines Zustands einer Fahrbahn mit zumindest zwei beabstandeten Ultraschallsensoren, Fahrerassistenzsystem, Kraftfahrzeug sowie dazugehöriges Verfahren. Barthel, N., Hamm, W., Jung, T., Schuler, T., Roeger, M. u. Haering, F. 27.04.2015
- [70] Frey, M.: WSE-Sensor zur Erkennung feuchter, nasser, schnee- und eisbedeckter Fahrbahnoberflächen. Beitrag zum Dynamischen Fahrbahn Informations System DFIS. Dissertation, Universität Karlsruhe. Aachen: Shaker 2005
- [71] Gnadler, R. u. Marwitz, H.: Neues System zur Ermittlung des Kraftschlusspotentials im Fahrbetrieb. ATZ 106 (2004)
- [72] S. R. Esparza, O. Calderón, L. Landazábal, M. A. Deluque, J. V. Balbastre, E. de los Reyes: On the Feasibility of a Bistatic Radar for Detecting

- Bad Road Conditions. Advanced Microsystems for Automotive Applications (2009), S. 65–76
- [73] Müller, G.: Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen. Abschlussbericht. FAT-Schriftenreihe, Technische Universität Berlin. Berlin 2016
- [74] GIDAS: <https://www.gidas.org/>, abgerufen am: 23.08.2019
- [75] Landesamt der Polizei Baden-Württemberg: Unfalldaten Großraum Stuttgart der Jahre 2014 und 2015. Persönliche Korrespondenz
- [76] Lufft: Fahrbahnsensor IRS31Pro-UMB. <https://www.lufft.com/de/de/produkte/strassen-runwaysensoren-308/intelligenter-passiver-fahrbahnsensor-irs31pro-umb-1792/>, abgerufen am: 09.06.2017
- [77] Holldorb, C., Streich, M. u. Uhlig, M.: Regionalisierte Erfassung von Straßenwetter-Daten. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - Verkehrstechnik (V). Forschung kompakt, 20/15. Bremen: Carl Schünemann Verlag 2015
- [78] Deutscher Wetterdienst: GBG SWIS - Wetterinformationssystem für das Straßenwesen. <http://www.dwd.de/DE/leistungen/gbgswis/gbgswis.html>, abgerufen am: 08.06.2017
- [79] Müller, G. u. Müller, S.: Messung von Reibwerten unter Realbedingungen zur Erhöhung der Fahrzeugsicherheit. VDI-Verlag (2015) 2265, S. 217–233
- [80] Euro NCAP: Internetauftritt. <https://www.euroncap.com/de>, abgerufen am: 23.08.2019
- [81] ISO Norm: ISO 26262. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:26262:-3:ed-1:v1:en>, abgerufen am: 23.08.2019
- [82] Isenberg, C.: The Science of Soap Films and Soap Bubbles. Dover: Courier Corporation 1992
- [83] Eggers, J.: Tropfenbildung. Phys. Bl. 53 1997 5, S. 431–434

- [84] Roth-Foelsch, A. u. Loedel, T.: Eine Frage des Kontaktwinkels. Kunststoffe (2011) 12
- [85] Baumgarten, C.: Modeling Spray and Mixture Formation. In: Baumgarten, C. (Hrsg.): Mixture Formation in Internal Combustion Engines. Heat and mass transfer. Heidelberg: Springer-Verlag 2006, S. 85–210
- [86] Schütz, T.: Hucho - Aerodynamik des Automobils. Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort. Wiesbaden: Springer Vieweg 2013
- [87] Martínez-Bazán, C., Montañés, J. u. Lasheras, J.: Statistical description of the bubble cloud resulting from the injection of air into a turbulent water jet. International Journal of Multiphase Flow 28 (2002) 4, S. 597–615
- [88] Lefebvre, A.: Atomization and Sprays. Combustion: An International Series. CRC (1988)
- [89] Bai, C. u. Gossman, A. D.: Development of Methodology for Spray Impingement Simulation. SAE International (1995) 950283
- [90] Bai, C. u. Gossman, A. D.: Mathematical Model of Wall Films Formed by Impinging Sprays. SAE International (1996) 960626
- [91] Spruß, I.: Ein Beitrag zur Untersuchung der Kraftfahrzeugverschmutzung in Experiment und Simulation. Dissertation, Universität Stuttgart. Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart 2016
- [92] Kamm, J. O., Wray, G. A. u. Kolb, R. G.: The Formation of Truck Spray on Wet Roads. Davidson Lab. Rep. Transportation Research Board (1970) 1431
- [93] Kamm, J. O., Wray, G. A. u. Kolb, R. G.: Truck Spray on Wet Roads Reduced by new Fender Design. SAE-J. 79. Transportation Research Board (1970) 9, 28/31

- [94] Maycock, G.: The Problem of Water Thrown Up by Vehicle on Wet Roads. Road Research Laboratory, Bd. 4. Crowthorne, Berkshire 1966
- [95] Onderko, W.: Study of Truck Splash Guards. Report No. F-A2090, The Franklin Institute Research Laboratories. Philadelphia 1960
- [96] Browand, F., McCallen, R. u. Ross, J. (Hrsg.): The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, and Trains. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, Bd. 41. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009
- [97] Koppa, R., Pezoldt, V. J., Zimmer, R.A., Deliman, M.N. u. Flowers, R.: Development of a Recommended Practice for Heavy Truck Splash and Spray Evaluation, Texas Transportation Institute. Texas 1990
- [98] Manser, M. P., Koppa, R. u. Mousley, P.: Evaluation of Splash and Spray Suppression Devices on Large Trucks During Wet Weather, AAA Foundation for Traffic Safety. Washington D.C. 2003
- [99] Rungruangvirojn, P. u. Kanitpong, K.: Measurement of Visibility Loss due to Splash and Spray: the Comparison between Porous Asphalt, SMA, and Conventional Asphalt Pavements. Transportation Research Board 2009 (2009) 88th Annual Meeting
- [100] Dumas, G. u. Lemay, J.: Splash and Spray Measurement and Control. Recent Progress in Quebec. In: Browand, F., McCallen, R. u. Ross, J. (Hrsg.): The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, and Trains. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, Bd. 19. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004
- [101] Watkins, S.: Spray from Commercial Vehicles: A Method of Evaluation and Results from Road Tests. In: Browand, F., McCallen, R. u. Ross, J. (Hrsg.): The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, and

- Trains. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, Bd. 41. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009, S. 387–402
- [102] Koeßler, P.: Kotflügeluntersuchungen, Deutsche Kraftfahrorschung und Strassenverkehrstechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1965
- [103] Braun, H.: Neuere Erkenntnisse über Radabdeckungen, Bd. 223, Deutsche Kraftfahrorschung und Straßenverkehrstechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1972
- [104] Koeßler, P., Engels, H. R. u. Mitschke, M.: Untersuchungen über die Wirksamkeit von Kotflügeln, Bd. 109, Deutsche Kraftfahrorschung und Straßenverkehrstechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1957
- [105] Potthoff, J.: Untersuchung der Verschmutzung von Kraftfahrzeugen im Windkanal. VDI Jahrestagung Fahrzeugtechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1974
- [106] Gaylard, A., Kirwan, K. u. Lockerby, D. A.: Surface contamination of cars: a review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering 231 (2017) 9, S. 1160–1176
- [107] Spruss, I., Schröck, D., Kuthada, T. u. Wiedemann, J.: Aerodynamik als Problemlösung des Nässefadings. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 112 (2010) 10, S. 730–734
- [108] Radovich, C. u. Plocher, D.: Experiments on Spray from a Rolling Tire. The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, and Trains. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics 41 (2009), S. 403–417
- [109] Heuser, B.: Validierung des virtuellen Wassermanagements anhand von Versuchen für ausgewählte Anwendungsfälle. Masterthesis, Fachhochschule Köln, Institut für Fahrzeugtechnik. Köln 2015

- [110] Plocher, D. u. Browand, F. K.: Comparing Spray from Tires Rolling on a Wet Surface. Department of Aerospace & Mechanical Engineering. Tire Science and Technology (2012), S. 145–165
- [111] Society of Automotive Engineers: Recommended Practice for Splash and Spray Evaluation. SAE J2245. SAE Handbook 1994
- [112] Malvern Instruments: Malvern Spraytec. Technical Documentation, 2010. <https://www.malvern.com/en/products/product-range/spraytec>, abgerufen am: 19.09.2018
- [113] Institute of Vehicle System Technology, Karlsruhe Institute of Technology: Internal drum test bench. <https://www.fast.kit.edu/lff/1251.php>, abgerufen am: 14.08.2017
- [114] GoPro: Technische Übersicht GoPro HERO4 Black. <https://de.shop.gopro.com/EMEA/refurbished/refurbished-hero4-black/CHDNH-B11.html>, abgerufen am: 18.08.2017
- [115] AOS Technologies AG: Technische Übersicht Q-VIT. <http://www.aos-technologies.com/high-speed-imaging/high-speed-cameras/q-vit/>, abgerufen am: 18.08.2017
- [116] Gissel, A.: Untersuchung der Wasseraufwirbelung durch Abrollen eines Pkw-Reifens auf nasser Fahrbahn. Masterthesis, Universität Stuttgart, Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen. Stuttgart 2016
- [117] Sauer, P.: Entwicklung eines Bildverarbeitungsalgorithmus zur Tröpfchenerkennung am Beispiel der Reifengischt. Bachelorthesis, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Theoretische Elektrotechnik - und Systemoptimierung. Karlsruhe 2016
- [118] Brüel & Kjær: Data Sheet Accelerometer Type 4394. <https://www.bksv.com/en/products/transducers/vibration/Vibration-transducers/accelerometers/4394>, abgerufen am: 09.08.2017

- [119] Brüel & Kjær: Data Sheet Accelerometer Type 4397.
<https://www.bksv.com/en/products/transducers/vibration/Vibration-transducers/accelerometers/4397>, abgerufen am: 09.08.2017
- [120] Brüel & Kjær: Data Sheet Accelerometer Type 4507.
<https://www.bksv.com/en/products/transducers/vibration/Vibration-transducers/accelerometers/4507-B-004>, abgerufen am: 09.08.2017
- [121] Robert Bosch GmbH: Prüfzentrum Boxberg. http://produkte.bosch-mobility-solutions.de/de/de/about_us/testzentren/pruefzentren_boxberg/pruefzentrum_boxberg_detailseite_1.html, abgerufen am: 31.08.2017
- [122] Michelin: Prüfzentrum Ladoux. <http://www.michelin-engineering-and-services.com/ger/Unsere-Strecken/Ladoux>, abgerufen am: 31.08.2017
- [123] Goodyear: Prüfzentrum Mireval. http://www.goodyear.eu/corporate_emea/our-company/at-a-glance.jsp, abgerufen am: 31.08.2017
- [124] The Mathworks: MATLAB Internetpräsenz.
<https://de.mathworks.com/products/matlab.html>, abgerufen am: 01.09.2017
- [125] HEAD acoustics: Internet presence of ArtemiS Suite. https://www.head-acoustics.de/de/nvh_artemis_suite.htm, abgerufen am: 06.08.2017
- [126] Rauscher, C., Janssen, V. u. Minihold, R.: Grundlagen der Spektrumanalyse. München: Rohde & Schwarz 2000
- [127] Hoffmann, R. u. Wolff, M.: Intelligente Signalverarbeitung 1. Signalanalyse. Heidelberg: Springer-Verlag 2014
- [128] Biermann, J.-W.: Kraftfahrzeug-Akustik. Vorlesungsumdruck, Institut für Kraftfahrzeuge Aachen. Aachen: fka - Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen 2011

- [129]Feil, T.: Simulation der Zweiphasenströmung für Wassermanagementthemen in der Fahrzeugentwicklung. Masterthesis, Universität Stuttgart, Institut für Aerodynamik und Gasdynamik. Stuttgart 2015

**Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik
FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik
(ISSN 1869-6058)**

Eine vollständige Übersicht der Bände finden Sie im Verlagsshop

- Band 76** Kai-Lukas Bauer
Echtzeit-Strategieplanung für vorausschauendes automatisiertes Fahren
ISBN 978-3-7315-0949-3
- Band 77** Thomas Schirle
Systementwurf eines elektromechanischen Fahrwerks für Megacitymobilität
ISBN 978-3-7315-0995-0
- Band 78** Dominik Dörr
Simulation of the thermoforming process of UD fiber-reinforced thermoplastic tape laminates
ISBN 978-3-7315-0998-1
- Band 79** Dominik Robert Naake
Simulation of damage mechanisms in weave reinforced materials based on multiscale modeling
ISBN 978-3-7315-1005-5
- Band 80** Martin Hohberg
Experimental investigation and process simulation of the compression molding process of Sheet Molding Compound (SMC) with local reinforcements
ISBN 978-3-7315-1007-9
- Band 81** Benedikt Fengler
Manufacturing-constrained multi-objective optimization of local patch reinforcements for discontinuous fiber reinforced composite parts
ISBN 978-3-7315-1006-2
- Band 82** Johannes Masino
Road Condition Estimation with Data Mining Methods using Vehicle Based Sensors
ISBN 978-3-7315-1004-8
- Band 83** **11. Kolloquium Mobilhydraulik
10. September 2020, Karlsruhe**
ISBN 978-3-7315-1036-9

- Band 84** Felix Weber
Beitrag zur Entwicklung von Konstantflusspumpen für Frischbeton unter genauerer Betrachtung der Dickstoffventile
ISBN 978-3-7315-1037-6
- Band 85** 8. Fachtagung
Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 23. Februar 2021, Karlsruhe
ISBN 978-3-7315-1071-0
- Band 86** Sebastian Fünfgeld
Vorausschauende Regelung von Fahrzeugsystemen durch stochastische Vorhersage der Fahrzeugdynamik
ISBN 978-3-7315-1060-4
- Band 87** Isabelle Charlotte Ays
Development of a CO₂e quantification method and of solutions for reducing the greenhouse gas emissions of construction machines = Entwicklung einer CO₂e Quantifizierungsmethode und von Lösungen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen in Baumaschinen
ISBN 978-3-7315-1033-8
- Band 88** Alexander Bernath
Numerical prediction of curing and process-induced distortion of composite structures
ISBN 978-3-7315-1063-5
- Band 89** Nils Bulthaupt
Objektivierung des Schwingungskomforts schwerer Nutzfahrzeuge
ISBN 978-3-7315-1075-8
- Band 90** Lars Brinkschulte
Assistenzsysteme zur Reduktion des Schädigungsverhaltens von Komponenten einer mobilen Arbeitsmaschine
ISBN 978-3-7315-1089-5
- Band 91** Dominik Dörr
Adaptive Fahrhinweise für ein längsdynamisches Fahrerassistenzsystem zur Steigerung der Energieeffizienz
ISBN 978-3-7315-1090-1
- Band 92** Jürgen Römer
Steuerung und Regelung des Lenkradmoments durch Nutzung radselektiver Frontantriebe
ISBN 978-3-7315-1104-5

- Band 93** Christian Riese
Werkzeuge und Konzepte für die Untersuchung und Entwicklung zukünftiger Kfz-Bremssysteme
ISBN 978-3-7315-1125-0
- Band 94** Yaoqun Zhou
Dynamisches Bremsverhalten des Reifen-Fahrwerk-Systems
ISBN 978-3-7315-1156-4
- Band 95** Stefan Haug
Ganzheitliche Optimierung einer Axialkolbenpumpe durch bedarfsangepasste Entlastung tribologischer Kontakte
ISBN 978-3-7315-1150-2
- Band 96** Stefan Scheubner
Stochastic Range Estimation Algorithms for Electric Vehicles using Data-Driven Learning Models
ISBN 978-3-7315-1166-3
- Band 97** Yusheng Xiang
AI and IoT Meet Mobile Machines: Towards a Smart Working Site
ISBN 978-3-7315-1165-6
- Band 98** Nils Meyer
Mesoscale simulation of the mold filling process of Sheet Molding Compound
ISBN 978-3-7315-1173-1
- Band 99** Christian Timo Poppe
Process simulation of wet compression moulding for continuous fibre-reinforced polymers
ISBN 978-3-7315-1190-8
- Band 100** Torben Fischer
Modellprädiktive Regelung eines innovativen Thermomanagement-Systems für batterieelektrische Fahrzeuge
ISBN 978-3-7315-1199-1
- Band 101** Florian Wittemann
Fiber-dependent injection molding simulation of discontinuous reinforced polymers
ISBN 978-3-7315-1217-2
- Band 102** Sebastian Watzl
Experimentelle und numerische Analyse des Körperschallübertragungsverhaltens von Aggregatlagerelementen im akustisch relevanten Frequenzbereich
ISBN 978-3-7315-1226-4

- Band 103** Dominik Stretz
**Vibroakustische Analyse eines elektrischen Radnabenmotors
und Optimierung durch geeignete Steuerungsansätze**
ISBN 978-3-7315-1245-5
- Band 104** Mohamed Elgharbawy
**Measurable Safety of Automated Driving Functions
in Commercial Motor Vehicles - Technological and
Methodical Approaches**
ISBN 978-3-7315-1254-7
- Band 105** Bernhard Schmiedel
**Indirekte Schätzung des Fahrbahnneigungsgrads zur Detektion
von gefährlichen Fahrzuständen**
ISBN 978-3-7315-1258-5

Karlsruher Schriftenreihe
Fahrzeugsystemtechnik



Eine Schätzung des Fahrbahn­näs­e­grads un­ter­stützt Fahr­er so­wie Fahr­zeug bei der Fahr­zeug­füh­rung. Diese Arbeit zeigt die Grundlagen für ein System, das durch Körperschallmessungen an verschiedenen Positionen des Fahrzeugs die Wasseraufwirbelung der Reifen erfasst und daraus auf einen Fahrbahn­näs­e­grad schließt. Ein auf diesem Prinzip aufgebautes System findet im Porsche 911, Typ 992, seinen Serien-Ersteinsatz.

ISSN 1869-6058
ISBN 978-3-7315-1258-5

