

75

Karlsruher Schriftenreihe
Fahrzeugsystemtechnik

Bernd Wassertheurer

**Reifenmodellierung für die
Fahrdynamiksimulation auf
Schnee, Eis und nasser Fahrbahn**



Scientific
Publishing

Bernd Wassertheurer

**Reifenmodellierung für die Fahrdynamiksimulation
auf Schnee, Eis und nasser Fahrbahn**

**Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik
Band 75**

Herausgeber

FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

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

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

Reifenmodellierung für die Fahrdynamiksimulation auf Schnee, Eis und nasser Fahrbahn

von
Bernd Wassertheurer

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Reifenmodellierung für die Fahrdynamiksimulation
auf Schnee, Eis und nasser Fahrbahn

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) angenommene Dissertation

von Dipl.-Ing. Univ. Bernd Wassertheurer

Tag der mündlichen Prüfung: 14. Juni 2019

Hauptreferent: Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Mirek Göbel

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



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

Print on Demand 2019 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 1869-6058

ISBN 978-3-7315-0957-8

DOI 10.5445/KSP/1000097330

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, der effizienten Nutzung des begrenzten urbanen Verkehrsraums und nach angemessenen Kosten finden ihre Antworten nicht aus der singulären Verbesserung einzelner technischer Elemente, sondern benötigen Systemverständnis und eine domänenübergreifende Optimierung der Lösungen.

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

Das Kraftübertragungsverhalten zwischen Reifen und Fahrbahn ist von großer Bedeutung für das Fahrverhalten von Straßenfahrzeugen. Sicheres und komfortables Fahren wird durch ein optimales Zusammenspiel von Fahrwerk und Reifen erreicht. Elastokinematik und Regelsysteme sind dafür gleichermaßen bedeutsam. Zur Abstimmung der vielfältigen Parameter werden seit längerem Simulationsmodelle für Fahrzeug, Fahrwerk und Reifen eingesetzt. Diese Vorgehensweise liefert sehr gute Vorhersagen der Fahreigenschaften des Fahrzeugs bei unterschiedlichsten Manövern. Allerdings gelingt dies bislang nur auf trockenen Fahrbahnen, da

Reifenmodelle basierend auf Messungen auf trockener Fahrbahn erstellt werden. Dafür kommen meist Flachbahnprüfstände zum Einsatz, auf denen der Reifen auf einem aufgerauten Stahlband oder auf dem sogenannten Safety Walk-Belag, einem Korundpapier, abrollt. Die Kraftübertragungscharakteristik in Umfangs- und Querrichtung des Reifens hängt in ihrem Verlauf über dem Umfangsschlupf bzw. dem Schräglaufwinkel jedoch sehr stark vom Fahrbahnbelag ab. Dies gilt umso mehr, je geringer der Reibbeiwert ausfällt, also vor allem auf winterlichen Fahrbahnen. Man behilft sich bislang durch eine einfache proportionale Skalierung der Reifenkennlinien auf Basis der auf dem jeweiligen Belag maximal übertragbaren Kraft. Für eine zutreffende Parametrierung von Fahrwerkregelsystemen ist dies jedoch nicht ausreichend.

Hier setzt die Arbeit von Herrn Wassertheurer an, in der er eine neue Methode zur Erzeugung wintertauglicher Reifenmodelle vorschlägt. Sie basiert auf Messungen von Reifenkennlinien auf nasser, beschneiter und vereister Fahrbahn an einem Innentrommelprüfstand, aus denen statistische Modelle erarbeitet werden, die Zusammenhänge zwischen Reifenmerkmalen und Reifenkennlinien herstellen. Einige einfach zu gewinnende Reifenmerkmale, bei denen auch die Reifenprofilierung über ein Bildauswertungsverfahren berücksichtigt wird, sind nun als Eingangsinformation ausreichend, um eine Vorhersage für einen umfangreichen Satz von Reifenkennlinien auf verschiedenen winterlichen Fahrbahnoberflächen erstellen zu können. Dieser Kennliniensatz kann dann, genauso wie es für Messdaten der Reifencharakteristik üblich ist, zur Erstellung eines Magic Formula-Reifenmodells verwendet werden, was dann gemeinsam mit einem Fahrzeugmodell eine gegenüber dem bisherigen Verfahren deutlich verbesserte Simulation des Fahrverhaltens auf winterlichen Fahrbahnen erlaubt.

Frank Gauterin

Karlsruhe, 14.06.2019

Reifenmodellierung für die Fahrdynamiksimulation auf Schnee, Eis und nasser Fahrbahn

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURSWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

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

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Univ. Bernd Wassertheurer

Tag der mündlichen Prüfung: 14.06.2019
Hauptreferent: Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Mirek Göbel

Kurzfassung

Die Fahrdynamiksimulation von Fahrzeugen auf Niedrigreibwert stellt besondere Anforderungen an die Reifenmodellierung. Mangels verfügbarer Messmöglichkeiten für Reifen auf Schnee- und Eisfahrbahnen ist eine valide Parametrierung von Reifenmodellen meist nicht möglich. Besonders für die Simulation von Fahrdynamikregelsystemen auf Niedrigreibwert sind diese Modelle jedoch essenziell.

Diese Forschungsarbeit beschreibt eine neuartige, auf statistischen Methoden basierende Methodik zur Erzeugung von Reifenmodellen für Schnee-, Eis- und nasse Fahrbahnen, welche den Anforderungen an die Fahrdynamiksimulation gerecht werden. Die Datenbasis bilden hierfür Messungen auf dem Reifen-Innentrommel-Prüfstand am *Institut für Fahrzeugsystemtechnik* am *Karlsruher Institut für Technologie*. Als einer der wenigen Reifenprüfstände weltweit bietet er die Möglichkeit, Reifen unter Laborbedingungen auf realen Schnee-, Eis- und nassen Fahrbahnen zu untersuchen. Die Versuchsdurchführung basiert hierbei auf der statistischen Versuchsplanung *Design of Experiments*.

Die entwickelte Methodik erlaubt es, im Anschluss an eine einmalige Befüllung der statistischen Datenbasis mittels Prüfstandsmessungen ohne weitere aufwändige Messungen virtuelle Reifensimulationsmodelle für Fahrbahnen mit Niedrigreibwert zu parametrieren. Die statistische Vorgehensweise erlaubt zudem eine detaillierte Untersuchung der Reifeneigenschaften und -charakteristiken auf verschiedenen Fahrbahnen.

Zur Verifizierung der Methodik und zur Validierung damit erzeugter Reifenmodelle werden Gesamtfahrzeugsimulationen mit virtuell parametrisierten Reifen mit Messungen realer Fahrversuche verglichen.

Abstract

Vehicle driving dynamics simulation on low friction surfaces brings along high demands on tyre modelling. For lack of available measurement facilities, for measuring tyres on snow and ice surfaces, valid parameterisation of tyre models is usually impossible. However, for driving dynamics control systems simulation on low friction surfaces such tyre models are essential.

This research thesis describes a novel methodology for generating tyre models for snow, ice and wet surfaces based on statistical methods, taking into account the requirements of driving dynamics simulation. The base for this is created by measurements on the internal drum tyre test bench at the *Institute of Vehicle System Technology* at the *Karlsruhe Institute of Technology*. As one of the few tyre test benches it provides the possibility for studying tyres on real snow, ice and wet road surfaces under laboratory conditions. The experiment execution here is based on statistical planning of the experiments called *Design of Experiments*.

The developed methodology allows a parameterisation of virtual tyre simulation models for low friction surfaces without further expensive measurements, subsequent to a one-time generation of the statistical database by test bench measurements. Moreover this statistic approach enables detailed investigation of tyre properties and characteristics on different track surfaces.

To verify the methodology and to validate tyre models generated with it full vehicle simulations with virtually parameterised tyre models are compared with real vehicle driving measurements.

Danksagung

Mein ausdrücklicher Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin, der mir die Möglichkeit gegeben hat, mich diesem spannenden Thema zu widmen und so auch die Möglichkeit zu meiner Promotion geschaffen hat. Er hat mir bei der Bearbeitung des Forschungsprojekts sämtliche Freiheiten gegeben und sein Vertrauen geschenkt, das Thema selbstverantwortlich am *Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik* des *Instituts für Fahrzeugsystemtechnik* des *Karlsruher Instituts für Technologie* bearbeiten zu dürfen. Dies hat maßgeblich zu meiner fachlichen und persönlichen Weiterentwicklung beigetragen. Vielen Dank für die Betreuung dieser Arbeit und die interessanten und konstruktiven Gespräche, welche wichtige Anregungen für meine Forschungstätigkeit geliefert haben.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Mirek Göbel für die freundliche Übernahme des Korreferats. Es freut mich besonders, dass er (in seiner damaligen Funktion bei *BMW*) als Initiator dieses Forschungsprojekts diese Aufgabe übernommen hat. Vielen Dank ebenfalls an Prof. Dr.-Ing. Peter Elsner für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Mein besonderer Dank geht an meinen Forschungsgruppenleiter Dr.-Ing. Hans-Joachim Unrau, der mir zu jeder Zeit mit Rat und Tat zur Seite stand und so maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen hat. Danke für die engagierte Unterstützung in meinem Forschungsvorhaben und die interessanten und wertvollen fachlichen Diskussionen.

In meiner Zeit am Institut habe ich nicht nur kompetente Kollegen, sondern gute Freunde gefunden. Ich möchte deshalb an dieser Stelle ein herzliches Dankeschön an meine lieb gewonnenen Kolleginnen und Kollegen richten. Es war eine ganz besonders tolle Zeit am Institut, geprägt von interessantem wissenschaftlichen Dialog und diversen herausragenden außeruniversitären Freizeitaktivitäten.

Ebenfalls möchte ich mich beim gesamten technischen Personal des Lehrstuhls für die tatkräftige Unterstützung im Prüfstandsbetrieb bedanken, das zusammen mit mir auch bei widrigen, frostigen und nassen Bedingungen am Innentrommelprüfstand ausdauernd viel gemeinsame Zeit verbracht hat.

Ebenfalls gilt mein Dank der *BMW Group* in München für die Initiierung der Forschungs Kooperation und die bereitgestellten Forschungsmittel. Vielen Dank an Dr.-Ing. Markus Bullinger für den wertvollen fachlichen Diskurs und an Dipl.-Ing. Harald Roeth für die Unterstützung bei sämtlichen organisatorischen Herausforderungen. Danke auch an alle Kolleginnen und Kollegen bei *BMW*, die mich bei meinen Gesamtfahrzeugmessungen in Schweden unterstützt haben und die Aufenthalte nahe dem Polarkreis zu einem Erlebnis gemacht haben.

Zudem möchte ich mich bei meinen Studentinnen und Studenten bedanken, die ich im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten betreuen durfte und die mich durch ihre HiWi-Tätigkeiten in meinem Forschungsvorhaben unterstützt haben.

Abschließend gilt ein besonders herzlicher Dank meiner Familie und im Besonderen meinen Eltern, die mich stets unterstützt und gefördert haben und die so maßgeblich die Voraussetzung für ein Studium und den erfolgreichen Abschluss dieser Promotion geschaffen haben.

Bernd Wassertheurer
München, im Juni 2019

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung	2
2 Stand der Wissenschaft und Technik	3
2.1 Einflüsse und Wechselwirkungen auf das Reifenverhalten	3
2.1.1 Mechanismen der Kraftübertragung	3
2.1.2 Kraftübertragung auf unterschiedlichen Fahrbahnen	7
2.1.3 Einfluss der Profilgestaltung auf die Kraftübertragung auf Schnee und Eis	10
2.2 Fahrdynamiksimulation in der Fahrzeugentwicklung	12
2.2.1 Simulationsumgebungen	12
2.2.2 Reifenmodelle in der Gesamtfahrzeugsimulation	13
2.2.3 Messtechnische Ermittlung von Reifenkennlinien in der Praxis.....	15
2.2.4 Parametrierung von Reifenmodellen.....	19
2.2.5 Abbildung verschiedener Fahrbahnen und Fahrbahnzustände	21
2.2.6 Einordnung der Forschungsarbeit.....	24
3 Ermittlung von Reifencharakteristiken durch Einsatz statistischer Methoden	25
3.1 Grundprinzip der Erzeugung virtueller Winterreifenmodelle	25
3.2 Statistischer Ansatz zur Planung von Reifenmessungen.....	29
3.2.1 <i>Design of Experiments</i> als Planungsinstrument	29
3.2.2 Erstellung von Versuchsplänen für Reifenmessungen.....	31
3.3 Messungen auf dem Reifen-Innentrommelprüfstand	35
3.3.1 Fahrbahnen.....	37
3.3.2 Koordinatensysteme	46

3.3.3	Fahrbahnkrümmung	49
3.4	Versuchsreifen	50
3.5	Messprozeduren	53
3.6	Auswertung der Messdaten	55
3.6.1	Messdatenanpassung vor dem Fittingprozess	56
3.6.2	Magic Formula-Fitting	59
3.6.3	Analyse der Seitenkräfte bei kombinierten Umfangskraft-Schlupf-Messungen	65
3.6.4	Qualität der gefitteten Daten	69
3.7	Ermittlung spezifischer Kenngrößen	71
3.7.1	Analytische Ermittlung von spezifischen Reifenparametern aus Magic Formula-Kennlinien	71
3.7.2	Auswertung von Reifenprofilkenngrößen aus Reifenprofilabdrücken	75
3.7.3	Weitere Kenngrößen zur statistischen Auswertung	85
3.8	Erzeugung von statistischen Vorhersagefunktionen / -modellen	86
3.8.1	Struktur der Vorhersagemodelle	87
3.8.2	Ermittlung signifikanter Einflussfaktoren	88
3.8.3	Ermittlung von Reifen- und Fahrbahncharakteristiken aus statistischen Vorhersagemodellen	89
3.8.4	Vergleich von Reifeneigenschaften anhand statistischer Auswertung	93
3.8.5	Reifencharakteristiken auf winterlichen Fahrbahnen	95
4	Erzeugung virtueller Winterreifenmodelle	119
4.1	Erzeugung virtueller Messdaten aus statistischen Vorhersagemodellen	119
4.1.1	Methodik zur Erzeugung einzelner virtueller Messdatenscribe	120
4.1.2	Erzeugung eines gesamten Messdatensatzes zur Magic Formula-Parametrierung	124

4.2 Erzeugung eines Magic Formula-Reifenmodells zum Einsatz in der Simulationsumgebung	127
4.3 Validierung der statistischen Methodik zur Reifenmodellerzeugung	130
4.4 Implementierung eines Softwarewerkzeugs zur Erzeugung von Reifenmodellen	135
5 Einsatz virtueller Winterreifenmodelle in der Simulation	139
5.1 Vergleich mit skalierten Reifenmodellen aus <i>Flat-Trac</i> -Parametrierungen	139
5.2 Simulation der Fahrdynamik und des Regelssystemverhaltens auf winterlichen Fahrbahnen.....	142
5.3 Übertragbarkeit auf Messungen im Außenversuch	146
5.3.1 Ermittlung von Messdaten im Außenversuch.....	147
5.3.2 Auswertung der Messdaten.....	150
5.3.3 Validierung der Simulationsergebnisse anhand realer Messdaten	152
6 Zusammenfassung und Ausblick	157
6.1 Zusammenfassung	157
6.2 Ausblick	158
Literaturverzeichnis.....	161
Abbildungsverzeichnis.....	169
Tabellenverzeichnis.....	177
Abkürzungen, Formelzeichen und Symbole.....	179
Abkürzungen.....	179
Formelzeichen und Symbole.....	180
Anhang.....	185

1 Einleitung

Fahrdynamikregelsysteme und Fahrerassistenzsysteme sind aus heutigen Straßenfahrzeugen nicht mehr wegzudenken. Moderne Sensorik und leistungsfähige Steuergeräte ermöglichen immer ausgefeiltere Funktionen und Regelstrategien, welche Komfort und Sicherheit erhöhen. Gleichzeitig verkürzen sich die Entwicklungszyklen einzelner Modellreihen und Derivate. Die Entwicklung der Funktionen, die Bewertung und Analyse der Fahrdynamik sowie Auslegung der Regelsysteme erfolgt deshalb vermehrt mittels simulationsbasierter Methoden.

1.1 Motivation

Bei der Fahrdynamiksimulation spielen Reifenmodelle eine wesentliche Rolle. Während auf trockener Fahrbahn hierfür bereits sehr gute Reifenmodelle verfügbar sind, mangelt es auf winterlichen Fahrbahnen – wie Schnee-, Eis- und nassen Fahrbahnen – meist an verlässlichen Reifenmodellen. Fehlende Versuchseinrichtungen und aufwändige Messprozeduren verhindern in den meisten Fällen eine direkte Parametrierung von Reifenmodellen auf diesen Fahrbahnoberflächen.

Um trotzdem ähnliche Fahrzustände wie auf winterlichen Fahrbahnen zu erhalten, werden in der Fahrzeugentwicklung in der Regel Hochreiwert-Reifenmodelle auf niedrigere Reibwerte herunter skaliert und damit in der Simulation gerechnet. Da diese Parametrierungen jedoch nicht validiert sind und deshalb zu ungenauen und unplausiblen Ergebnissen führen können, muss die Applikation und Funktionsabsicherung der Regelsysteme auf winterlichen Fahrbahnen bislang stets im realen Fahrversuch durchgeführt werden.

Mit validen Reifenmodellen, welche das Reifenverhalten auf winterlichen Fahrbahnen ausreichend gut beschreiben, könnten Fahrdynamikregelsysteme und Fahrerassistenzsysteme bereits vor Durchführung realer Fahrversuche vorab in der Simulation appliziert und auf ihr funktionales Verhalten auf Niedrigreibwert virtuell abgesichert werden. Dies würde bei der Entwicklung der Regel- und Fahrerassistenzsysteme einen großen Zeit- und Kostenvorteil bedeuten.

1.2 Zielsetzung

Abgeleitet aus der Motivation formuliert sich somit folgendes Ziel dieser Forschungsarbeit: die Entwicklung einer Methodik zur Erzeugung von universell einsetzbaren Reifenmodellen für die Fahrdynamiksimulation auf Fahrbahnen mit niedrigem Reibwert, wie Schnee-, Eis- und nassen Fahrbahnen.

Mit den so erstellten Reifenmodellen soll eine gezielte Entwicklung, Vorapplikation und Absicherung von Fahrdynamikregelsystemen und Fahrerassistenzsystemen ermöglicht werden, um so die Entwicklungszeit und Entwicklungskosten auf Niedrigreibwert zu reduzieren.

Im Rahmen der Forschungstätigkeit soll zudem das Verständnis für die Reifencharakteristik von Winterreifen auf den betrachteten Fahrbahnen vertieft und das grundsätzliche Verhalten beschrieben werden.

Ziel ist es, auf Basis der Erkenntnisse aus der Arbeit ein Software-Werkzeug zu entwickeln, mit dem zukünftig ohne aufwändige Reifenmessungen parametrisierte Reifenmodelle für die Handlingsimulation auf Niedrigreibwert erzeugt werden können.

Die Validierung der Methodik erfolgt anhand realer Fahrversuche, die in Schweden durchgeführt wurden.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Die Reifenforschung umfasst unter anderem die Untersuchung von Reifeneigenschaften und deren Einflussfaktoren sowie die Forschung an virtuellen Reifenmodellen zu Simulationszwecken.

2.1 Einflüsse und Wechselwirkungen auf das Reifenverhalten

Der Reifen, als einziges Bindeglied des Fahrzeugs zur Fahrbahn, ist bezüglich seines Verhaltens neben seinen eigenen Eigenschaften (Aufbau, Gummimischung, Profilierung) ebenso von seinem Reibpartner, der Fahrbahn, abhängig. Verantwortlich hierfür sind verschiedene Kraftübertragungsmechanismen, die je nach Fahrbahn unterschiedlich stark ausgeprägt Einfluss auf das Reifenverhalten nehmen.

2.1.1 Mechanismen der Kraftübertragung

Die Gummireibung weicht aufgrund der viskoelastischen Eigenschaften von Gummi von den klassischen Reibungsgesetzen ab [Mey64]. Die Gummireibung folgt eigenen Gesetzmäßigkeiten. Die Kraftübertragung zwischen Reifengummi und Fahrbahn lässt sich nach [Gey72] in vier Einzelkomponenten unterteilen. Die übertragbare Gesamtkraft ist die Kraft senkrecht zur Fahrbahn F_Z multipliziert mit dem Reibungskoeffizienten μ_{Reib} . Dieser entspricht der Summe aus Adhäsionsreibung μ_a , Hysteresereibung μ_h , Kohäsionsreibung μ_k und viskoser Reibung μ_v (Gleichung 2.1).

Abbildung 2.1 zeigt die im Kontakt auftretenden Kraftanteile. Die einzelnen Komponenten können dabei unabhängig voneinander auftreten [Bac96] und werden im Folgenden erläutert.

$$\mu_{Reib} = \mu_a + \mu_h + \mu_k + \mu_v \quad 2.1$$

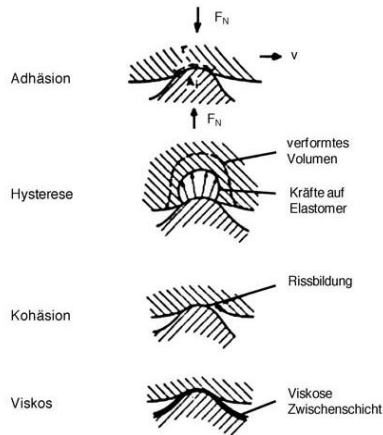


Abbildung 2.1:
Die vier Reibungskomponenten der Gummireibung [Gey72]

Adhäsionsreibung

Die Adhäsionsreibung nimmt nach KUMMER einen großen Anteil an der Gesamtreibung ein [Kum67]. Dabei handelt es sich um die Kraft, die durch das fortwährende Entstehen und Trennen molekularer Bindungen (VAN-DER-WAALS-Kräfte) zwischen den Reiboberflächen entsteht [Fis99]. Beim Kontakt des Gummis mit der Fahrbahnoberfläche entstehen Bindungen von Molekülketten auf molekularer Ebene. Bei der Bewegung des Gummis relativ zur Fahrbahn gehen nacheinander die an der Oberfläche befindlichen Kettenmoleküle des Gummis Bindungen mit der Fahrbahn ein. Die Ketten werden anschließend so weit gedehnt, bis die Bindung aufgrund der zu hohen, am Gummi angreifenden Kräfte auseinanderbricht.

Die Molekülkette zieht sich zusammen und geht an einer neuen Stelle wieder eine Bindung ein. Der Vorgang wiederholt sich fortwährend. Die dabei durch die Dämpfung des Gummis verlorene Energie führt zur Adhäsionskraft [Fis99]. Je höher die Anzahl der Bindungen, desto größer ist auch die durch Adhäsion übertragbare Kraft [Kum67].

Die Adhäsionskraft ist hierbei von der Gleitgeschwindigkeit, der Temperatur und der Anzahl der Bindungen abhängig [Kum67]. Abbildung 2.2 zeigt die Einflüsse auf die Adhäsion. Es wird deutlich, dass die Adhäsionsreibung ein Maximum bei einer bestimmten Gleitgeschwindigkeit aufweist, welches wiederum von der Temperatur abhängig ist. Auf nasser Fahrbahn reduziert sich durch den Wasserfilm die Anzahl der Bindungen, so dass ein Abfall des Adhäsionskoeffizienten μ_a erfolgt [Kum67].

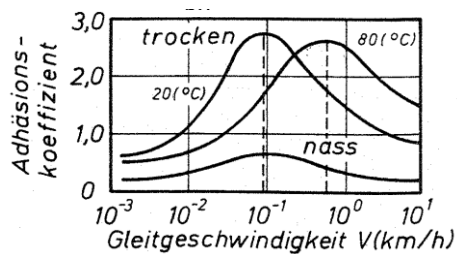


Abbildung 2.2:
Abhängigkeiten der Adhäsionsreibung [Kum67]

Hysteresereibung

Den zweiten wichtigen Anteil an der Gummireibung hat die Hysteresereibung. Sie entsteht aufgrund der Bewegung innerhalb der Molekülketten im Gummi durch Oberflächenrauigkeiten. Die aus der Oberfläche herausragenden Hindernisse bewirken eine Verformung des Gummis. Der durch die Gummidämpfung hervorgerufene Energieverlust bewirkt den Anteil der Hysteresereibung. Es wird deutlich, dass die Hysteresereibung maßgeblich von der geometrischen Rauigkeit der Oberfläche abhängig ist

[Kum67]. Erst zu sehr hohen Gleitgeschwindigkeiten zeigt sich, dass der Hysteresereibkoeffizient ebenfalls von der Geschwindigkeit abhängig ist.

Im Gegensatz zur Adhäsionsreibung wird die Hysteresereibung nicht direkt von einer Oberflächenverschmutzung oder schmierenden Medien beeinflusst [Kum67]. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich durch die Dicke der Flüssigkeitsschicht die Höhe der Rauigkeitsspitzen vermindert und somit auch die Hysterese Komponente sinkt [Bac96].

Viskose Reibung

Der Anteil der viskosen Reibung tritt nur bei Vorhandensein eines Zwischenmediums auf. Die Kräfte werden dann über die in der Flüssigkeit gebildeten Scherkräfte übertragen. Bei einem durchgehenden Flüssigkeitsfilm stehen die Reibflächen in keinem direkten Kontakt. Beim Aquaplaning tritt beispielsweise ausschließlich viskose Reibung auf [Bac96], [Bür12]. Der Anteil der viskosen Reibung an der Gesamtreibkraft ist bei Wasser als Zwischenmedium wesentlich kleiner als die Komponenten Adhäsion und Hysterese [Eic94].

Kohäsionsreibung

Die Komponente der Kohäsionsreibung wird bei den meisten theoretischen Betrachtungen vernachlässigt. Dieser Reibanteil entsteht durch die Bildung von Rissen oder dem Ausbrechen bzw. Herausreißen von Gummiteilchen aus dem Gesamtverbund. Der Einfluss auf die Gesamtreibkraft ist jedoch gering, so dass dieser Reibkomponente keine große Bedeutung zugemessen wird [Eic94], [Bac96].

2.1.2 Kraftübertragung auf unterschiedlichen Fahrbahnen

Je nach Oberflächenbeschaffenheit kommt es auf verschiedenen Fahrbahnen zu unterschiedlichen Kraftübertragungsmechanismen. Die Kohäsionsreibung wird im Folgenden nicht näher betrachtet.

Trockene Fahrbahn

Auf der trockenen Fahrbahn treten nur die Komponenten Adhäsion und Hysteresereibung auf. Ausschlaggebend für den Reibwert sind hierbei die beiden Größen der Fahrbahnoberfläche Mikro- und Makrotextrur. Eine kleine Makrorauheit und eine Mikrorauheit im mittleren Bereich führen hierbei zu hohen Adhäsionskräften. Große Mikro- und Makrorauheit sorgen dagegen für einen großen Hystereseeanteil.

Nasse Fahrbahn

Der Großteil der Kräfte wird auf der nassen Fahrbahn durch Hysteresereibung übertragen, da die adhäsiven Anteile stark durch den Flüssigkeitsfilm reduziert werden. Entscheidend ist auf nasser Fahrbahn zudem das Drainagevermögen der Fahrbahn, weshalb eine große Makrorauheit zu höheren Reibwerten führt. Das Zwischenmedium kann so besser aus der Fahrbahn abfließen und es stehen größere, aus dem Flüssigkeitsfilm herausragende Rauigkeitsspitzen für die Hysteresereibung zur Verfügung. Die zu übertragende Reibkraft wird deshalb besonders durch die Rauheit und die Gleitgeschwindigkeit beeinflusst. Eine hohe Mikrorauheit sorgt darüber hinaus an den durch die Flüssigkeit herausragenden Rauigkeitsspitzen zu einem verbesserten adhäsiven Anteil [Fis99].

Schneebedeckte Fahrbahn

Bei der Schneefahrbahn besteht der große Unterschied zu den anderen Fahrbahnen darin, dass der Schnee keine feste Oberfläche bildet. Auf

schneebedeckter Fahrbahn treten daher weitere Effekte der Kraftübertragung auf. [Fuk94] und [Set03] beschreiben in ihren Arbeiten zusätzlich zu den Effekten der Gummireibung (Adhäsion und Hysterese) die Effekte Verdichten, Graben und Scheren.

Beim Verdichten wird Schnee im Reifeneinlauf durch das Überrollen verdichtet. Dieser Kraftanteil wirkt stets gegen die Fahrtrichtung und wirkt sich beim Antreiben demnach kraftmindernd aus. Als Graben wird das Eintauchen der Profil- und Lamellenkanten in den verdichteten Schnee bezeichnet. Graben wird folglich auch als Kanten-Effekt beschrieben. Außerdem werden Scherkräfte zwischen dem inmitten von Profilstollen eingeschlossenen Schnee und der Schneefahrbahn übertragen [Set03], [Gie11].

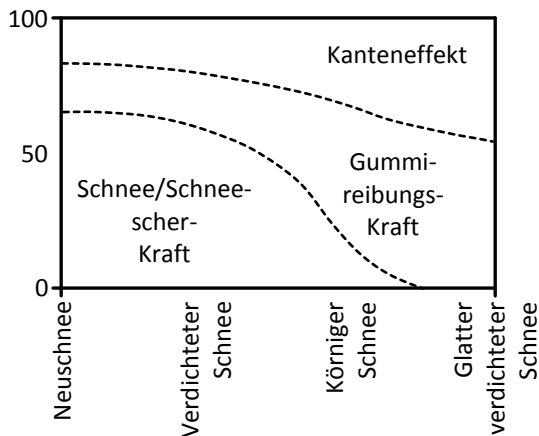


Abbildung 2.3:

Anteile der Reibungsarten auf verschiedenen Schneefahrbahnen und Eis (nach [Fuk94])

In [Fuk94] zeigt FUKUOKA, dass sich die Reibungsanteile auf verschiedenen Schneefahrbahnen unterscheiden. Abbildung 2.3 veranschaulicht, welche Reibungsanteile auf den verschiedenen Fahrbahnen den größten Einfluss haben. Während auf der frischen/weichen Schneefahrbahn besonders die

Scherkräfte zum Tragen kommen, überwiegt auf hartem und verdichtetem Schnee der Kanteneffekt bei der Kraftübertragung.

Auf Schnee kommen zudem Schmelzeffekte durch Reibungswärme zum Tragen. Gleitet der Gummi auf der Oberfläche ab entsteht Reibungswärme, die ein Aufschmelzen der obersten Schneesicht bewirkt [Gie07]. GIEBLER beschreibt in [Gie11] die Mechanismen der Kraftübertragung ausführlich.

Eisfahrbahn

Auf der polierten Eisfahrbahn treten hauptsächlich Adhäsionsreibung und viskose Reibung (durch lokales Aufschmelzen) auf. Diese Oberfläche besitzt keinerlei Rauigkeitsspitzen, Hysteresereibung im Gummi ist somit nicht möglich. Auf der glatten Fahrbahnoberfläche wird bei sehr niedrigen Temperaturen der Großteil der Kraft deshalb über adhäsive Reibung übertragen.

Unpoliertes oder abgeschabtes Eis besitzt dagegen Rauigkeitsspitzen in der Mikrotextrur und gegebenenfalls makroskopische Unebenheiten, so dass in diesem Fall zusätzlich zur Adhäsion Mechanismen der Hysteresereibung Anwendung finden [Gie11]. Rraues Eis kann deshalb unter Umständen eine mehrfach höhere Reibung besitzen als poliertes Eis. FUKUOKA geht davon aus, dass zudem der Kanteneffekt zu einem Teil der Reibung beiträgt [Fuk94].

Die beim Abgleiten erzeugte Reibungswärme erzeugt, ähnlich wie bei Schnee, ein Aufschmelzen der obersten Eisschicht. Es entsteht eine dünne, flüssige Schicht, auf der der Gummi abgleitet [Gie11], [Fur93]. Die viskose Reibung ist nochmals um ein Vielfaches geringer als der adhäsive Anteil, so dass auf Eis insgesamt nur sehr geringe Reibkräfte übertragen werden können.

2.1.3 Einfluss der Profilgestaltung auf die Kraftübertragung auf Schnee und Eis

Neben der Fahrbahnoberfläche hat die Profilgestaltung des Reifenlaufstreifens einen erheblichen Einfluss auf das übertragbare Reibpotential auf Schnee- und Eisfahrbahnen. In Abbildung 2.4 zeigt [Set03] den Einfluss des Profilnegativanteils (void) auf die Traktion. Größere Abstände zwischen den Profilblöcken ermöglichen es, dass mehr Schnee zwischen den Profilblöcken eingeschlossen wird. Dies führt zu einem höheren Anteil der durch den Schnee übertragbaren Scherreibung. In dieser Abbildung ist zudem der gegenläufige Trend für die Eisfahrbahn aufgrund der auf Eis entscheidenden Adhäsionskomponente erkennbar. Da mit steigendem Profilnegativanteil gleichzeitig die Kontaktfläche sinkt, kann auf Eis mit steigendem Negativanteil immer weniger Adhäsionskraft übertragen werden. Des Weiteren ist auch ein Kanteneinfluss auf Eis erkennbar. Beim Reifen ohne Kanten sinkt die übertragbare Kraft auf Eis gegenüber den weiteren Reifen mit derselben Anzahl an Kanten erheblich. In [Set03] wird das untersuchte Eis nicht spezifiziert, es wird daher von rauem Eis ausgegangen.

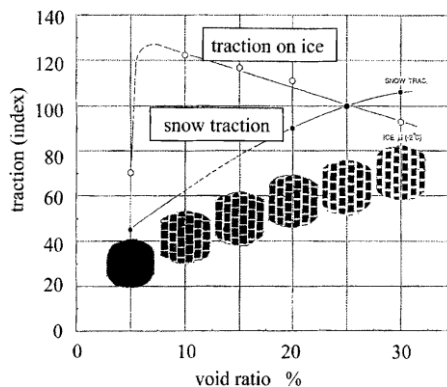


Abbildung 2.4: Einfluss des Profilnegativanteils auf den Reibwert auf Schnee und Eis [Set03]

In [Fuk94] listet FUKUOKA auf, welche Faktoren bei der Profilgestaltung die übertragbaren Kräfte auf Schnee- und Eisfahrbahnen beeinflussen. In Abbildung 2.5 ist dargestellt, dass besonders auf Schnee die Scherkräfte von der Anzahl und Richtung der Profileinschnitte beeinflusst werden, während dies auf Eis keinen Einfluss hat. Der Kanteneffekt ist auf der Schnee- und Eisfahrbahn ähnlich wichtig. Die Größe der tatsächlichen Kontaktfläche im Reifenlatsch auf die Gummireibung hat besonders auf Eis erheblichen Einfluss.

Reibkraft	Design Faktor	Schnee	Eis
Schnee/Schnee-scher-Kraft	Anzahl, Tiefe und Ausrichtung der Profilrillen	⊙	–
Gummireibungs-Kraft	Kontaktfläche, Tief-Temperatur-Charakteristik	○	⊙
Kanteneffekt	Anzahl und Winkel von Profilrillen und -lamellen (Gesamtkantenlänge)	○	○

Abbildung 2.5:

Einflüsse der Profilgestaltung auf die Reibkräfte auf Schnee und Eis (nach [Fuk94])

MUNDL verwendet in [Mun95] zur Charakterisierung von Reifenprofilen den sogenannten Strukturfaktor. Damit beschreibt er die Profilgeometrie mittels einer objektiven Kennziffer, welche die Profilkantenlängen in der Radaufstandsfläche wiedergibt. Über den Strukturfaktor können Aussagen über das Schneegriffpotential getroffen werden.

Nach dem Stand der Forschung im Bereich der Reifen- und Gummeigenschaften und deren Einflussfaktoren wird im folgenden Abschnitt der Stand der Forschung im Bereich Fahrdynamiksimulation und der Reifenmodellierung erläutert.

2.2 Fahrdynamiksimulation in der Fahrzeugentwicklung

Die Fahrdynamiksimulation von Fahrzeugen wird in der Automobilentwicklung und der Entwicklung von Fahrdynamikregelsystemen, wie etwa ESP und ABS, zunehmend wichtiger. Die virtuelle Entwicklung und Absicherung von Funktionen ist bei der steigenden Anzahl von Derivaten und stetig sinkender Entwicklungszeit nicht mehr wegzudenken [Lei15].

Um realitätsnahe Ergebnisse aus der Handlingsimulation zu erhalten, ist es essentiell, ein valides Gesamtfahrzeugmodell zur Verfügung zu haben. [Sch14] teilt das Modell des Gesamtfahrzeugs in sechs Subsysteme auf. Neben Fahrzeugstruktur (Fahrgestell und Karosserie), Antriebsstrang, Rad-aufhängungen, Bremsen und der Lenkung bilden die Reifen/Räder ein eigenes Subsystem. [Lei15] erläutert die Wichtigkeit des verwendeten Reifenmodells anhand der Tatsache, dass der Reifen das einzige Teil des Fahrzeugs ist, das in Kontakt mit der Straße steht und somit für die Kraftübertragung zur Fahrbahn verantwortlich ist.

2.2.1 Simulationsumgebungen

Zur Handlingsimulation von Fahrzeugen werden spezielle Computerprogramme eingesetzt. Für die verschiedenen Einsatzzwecke steht eine Vielzahl an Softwarelösungen zur Verfügung. [Sch14] zeigt eine Übersicht der in der Industrie zurzeit am weitest verbreiteten Softwarewerkzeuge. Beispiele für industrielle Anwendungen sind *CarMaker* oder *veDyna*. Neben der reinen Fahrzeugsimulation bieten diese Programme zudem Möglichkeiten der Fahrer- und Umgebungssimulation.

Zur Parametrierung der Fahrzeugmodelle kommen oft Mehrkörpersimulationsprogramme, wie *Adams* oder *Simpack* zum Einsatz [Sch14]. Mit Hilfe der numerischen Mehrkörpersimulation ist es möglich, sämtliche kinematischen und kinetischen Zusammenhänge zu simulieren. Aufgrund der

detaillierten Modellierung und komplexen Berechnungsschritte sind diese Programme jedoch nicht echtzeitfähig und sind somit unter anderem für einen Hardware-in-the-Loop-Einsatz (HiL) ungeeignet. Für die Fahrzeughandlingsimulation werden deshalb spezielle Werkzeuge verwendet, welche die Fahrzeugdynamik in Echtzeit berechnen können. Diese Programme verwenden hierfür speziell parametrisierte Fahrzeugmodelle.

Neben den kommerziellen Fahrdynamiksimulationsprogrammen entwickeln vor allem die Fahrzeughersteller eigene Softwarelösungen, die ihre Fahrdynamikentwicklung bestmöglich unterstützen. Die dadurch offene Softwarestruktur erleichtert die Implementierung von Fahrdynamikregel- und Fahrerassistenzsystemen während der Entwicklung.

2.2.2 Reifenmodelle in der Gesamtfahrzeugsimulation

Neben dem parametrisierten Gesamtfahrzeugmodell bilden spezielle Reifenmodelle, welche für die jeweilige Kombination von Reifen und Fahrbahnoberfläche parametrisiert werden, die Basis für eine realitätsgetreue Fahrdynamiksimulation. Als einziges Verbindungsglied des Fahrzeugs mit der Straße sind diese für eine valide Kopplung des Fahrzeugs an die Umwelt essentiell für die Beschreibung des Fahrzeugverhaltens [Lei15], [Sch14].

Für die jeweiligen Anwendungsfälle existieren spezielle Reifenmodelle. Die Einteilung der Modelle erfolgt dabei in mathematische, semi-physikalische und physikalische Reifenmodelle. [Ein10] und [Mey07] unterteilen die Reifenmodelle übersichtlich nach ihrem Detaillierungsgrad. Die Komplexität der Modelle ist meist proportional zu ihrer Rechenzeit [Ein10]. Abb. 2.6 zeigt, dass mathematische und kennlinienbasierte Modelle am wenigsten komplex sind, sie werden deshalb vorzugsweise für die (echtzeitfähige) Fahrdynamiksimulation verwendet. Bürsten-, Ring- und Schalenmodelle zählen zu den semiphysikalischen Reifenmodellen. Als physikalische Reifenmodelle werden hochkomplexe Finite-Element-Methode-Modelle

(FEM-Modelle), Reifenstrukturmodelle und Reifenmodelle mit flexiblen Gürtelringen bezeichnet. FEM-Modelle finden vor allem in der Reifenentwicklung Anwendung [Lei15], [Amm05]. Tabelle 2.1 zeigt eine Übersicht der am meisten verbreiteten Reifenmodelle der jeweiligen Kategorie.

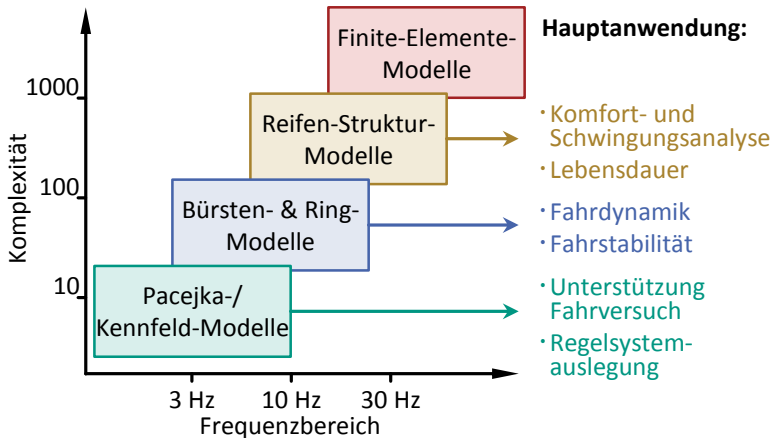


Abbildung 2.6:

Übersicht der Reifenmodelle für unterschiedliche Anwendungen [Amm05]

Für die Reglerauslegung der Fahrdynamikregelsysteme und die Berechnung von Einspurmodellen wird in der Regel ein vereinfachtes, lineares Reifenmodell verwendet. GÖBEL [Göb09] erläutert in diesem Zusammenhang den Einfluss der linearen Reifensteifigkeiten in Längs- und Querrichtung auf die Berechnung der Sollgrößen des Reglers. Hier wird deutlich, wie wichtig die Kenntnis von Reifencharakteristiken auf verschiedenen Fahrbahnoberflächen für die Leistungsfähigkeit der Regelsysteme ist.

NIEDERMEIER entwickelte in [Nie15] eine Methode, funktionale Reifeneigenschaften anhand charakteristischer Reifenparameter (CVs) virtuell bewerten und für eine fahrdynamische Grundauslegung verwenden zu können.

Auf diese Weise können Reifen objektiv bewertet werden und die funktionalen Reifeneigenschaften quantifiziert werden.

Tabelle 2.1:

Verbreitete Vertreter von Reifenmodellen (nach [Ein10])

Gruppe der Reifenmodelle	Typische Vertreter
Mathematische Modelle	- <i>Magic Formula Tyre</i> - <i>IPGTire</i> - <i>TameTire</i> - <i>TM-Easy</i>
Semi-Physikalische Modelle	- <i>MF-SWIFT</i> - <i>RMOD-K 20</i> - <i>CTire</i> - <i>CDTire 20</i> - <i>RTire</i>
Physikalische Modelle	- <i>FTire (2D / 3D)</i> - <i>RMOD-K 31</i> - <i>CDTire 30</i> - <i>DTire</i>

2.2.3 Messtechnische Ermittlung von Reifenkennlinien in der Praxis

Reifencharakteristiken und -Kennlinien werden in der Praxis meist auf Indoorprüfständen ermittelt. Die bekanntesten Prüfstände zur Messung von fahrdynamisch relevanten Kenngrößen (Kräfte und Momente) sind Flachbahn-, Außentrommel und Innentrommelprüfstände. [Cla81] gibt eine gute Übersicht über die einzelnen Prüfstandstypen.

Auf **Flachbahnprüfständen** rollt der Reifen auf einem umlaufenden Stahlband ab. Über Flächenlager wird das Stahlband im Bereich der Reifenaufstandsfläche abgestützt. Der Reifen rollt so auf einer ebenen Fläche ab. Für die verschiedenen Versuchszwecke kann das Stahlband mit

*Safety-Walk*¹ beklebt werden. Im industriellen Umfeld hat sich für die Messung von Reifenkennlinien unter den Flachbahnprüfständen besonders der sogenannte *Flat-Trac* der Firma *MTS* etabliert. Abbildung 2.7 zeigt diesen Prüfstand (*Flat-Trac III CT*), welcher auch für die *Safety-Walk*-Messungen in diesem Forschungsprojekt verwendet wurde [IAB15]. Der Prüfstand eignet sich besonders für die automatisierte Messung von *TIME*²-Messreihen [Kla99].

Bei **Außentrommelprüfständen** rollt der Reifen auf der Außenseite einer rotierenden Stahltrommel ab. Typische Außendurchmesser der Trommeln sind 2,0m im europäischen Raum und 1,71m in Nordamerika. Der Flachbahn-Außentrommelprüfstand *am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)* kombiniert beide Außentrommeloptionen mit der Möglichkeit der Reifenmessung auf der Flachbahn (Abbildung 2.7). Die Trommeln sowie die Stahlbahn können mit *Safety-Walk*-Belag beklebt werden. Außentrommelprüfstände werden vor allem für genormte Rollwiderstandsmessungen (nach ISO 28580) und Reifenverschleißmessungen verwendet.



Abbildung 2.7:

links: *MTS Flat-Trac III CT* [Sch09];

rechts: Außentrommel-Flachbahn-Prüfstand am *KIT*

¹ *3M Safety-Walk*, universeller Antirutschbelag, häufigste Testoberfläche auf industriellen Reifenprüfständen (vgl. Abschnitt 3.3.1)

² Standardisierte Messprozedur zur Messung von Reifen auf Prüfständen (vgl. [Kla99])

Durch die Krümmung der Trommeln verändert sich jedoch das Abrollverhalten der Reifen gegenüber der Messung auf der Ebene. UNRAU erläutert in [Unr12] den Einfluss der Trommelkrümmung auf Rollwiderstand, Schräglaufsteifigkeit und das Rückstellmoment und entwickelt Berechnungsvorschriften zur Korrektur.

Eine dritte Gruppe von Reifenprüfständen bilden die **Innentrommelprüfstände**. Hier rollt der Reifen auf der Innenseite einer großen Stahltrommel ab. In Abbildung 2.8 ist als typischer Vertreter der Innentrommelprüfstand (IPS) am *KIT* dargestellt. Bauartbedingt eignen sich Innentrommelprüfstände besonders dazu, außer der *Safety-Walk*-Oberfläche auch andere, reale Fahrbahnen einzubauen, da die Fahrbahn durch die Fliehkraft nicht nach außen abgeschleudert werden kann.



Abbildung 2.8:

Innentrommelprüfstand am *KIT* mit eingebauter Asphaltfahrbahn
links: 3,8m-Trommel; rechts: Radführung

Der hier gezeigte Prüfstand, auf welchem die im Folgenden erläuterten Versuche durchgeführt wurden, wurde über Jahre hinweg stetig

weiterentwickelt, so dass neben *Safety-Walk* auch reale Fahrbahnen wie Asphalt und Beton installiert werden können. Die Bauart erlaubt es außerdem, Schnee- und Eisfahrbahnen aufzubringen. Eine Bewässerung ermöglicht auch Messungen auf nassen Fahrbahnen.

Neben Prüfstandsversuchen, welche unter Laborbedingungen durchgeführt werden, finden zur Messung von Reifeneigenschaften auch **Außenversuche** unter realen Bedingungen statt. Abbildung 2.9 zeigt hierfür stellvertretend zwei Fahrzeuge zum Vermessen von Reifen auf realen Teststrecken. Der zu vermessende Reifen wird auf eine spezielle Radführung am Messfahrzeug montiert, die es erlaubt, während mit dem Messfahrzeug mit der vorgesehenen Messgeschwindigkeit über die Teststrecke gefahren wird, die gewünschte Radlast sowie den Sturzwinkel und den Schräglaufwinkel einzustellen und so den Reifen zu vermessen.



Abbildung 2.9:
oben: Reifen-Messanhänger von TASS International [TAS15a], [TAS15b];
unten: Reifen-Messfahrzeug Universeller Reibungsmesser (URM) des FKFS [FKF15a], [FKF15b]

2.2.4 Parametrierung von Reifenmodellen

Um Reifenmodelle in der Simulation einsetzen zu können, ist eine Parametrierung derselben notwendig. Je nach Reifenmodell variieren die zu parametrierenden Faktoren, so dass die Messungen an das jeweilige zu parametrierende Reifenmodell angepasst werden müssen.

Bei FEM-Modellen gestalten sich der Modellaufbau und die Parametrierung besonders aufwändig, da zunächst die geometrische Anpassung und die detaillierte Vernetzung des Modells erfolgen müssen. Anschließend werden den einzelnen Reifenbereichen die entsprechenden Materialparameter zugewiesen. Fehlende Informationen über den Reifenaufbau und die Materialeigenschaften erschweren den Aufbau und die Parametrierung von FEM-Reifenmodellen, so dass valide FEM-Modelle in der Regel den Reifenherstellern vorbehalten sind.

Reifenmodelle, wie *Magic Formula Tyre (MF-Tyre)* oder *FTire*, bei welchen zur Parametrierung lediglich Modellfaktoren angepasst werden müssen, werden über spezielle Reifenmessungen (auf Prüfständen oder im Außenversuch) parametriert. Für jedes dieser Reifenmodelle werden angepasste Messprozeduren durchgeführt, um die jeweils benötigten Daten für die Parametrierung zur Verfügung stellen zu können. In der Regel werden diese Messungen auf Prüfständen mit *Safety-Walk*-Oberfläche absolviert.

Die gemessenen Daten werden aufbereitet und in ein für die Parametrierung geeignetes Format überführt. Standardmäßig werden die Daten als TYDEX-Dateien (Tyre Data Exchange Format) exportiert [Oos99]. Über ein Parameter-Fitting werden die passenden Modellparameter identifiziert. Das fertig parametrierte Reifenmodell wird anschließend meist als *.tir-Datei exportiert und kann so direkt für die Simulation verwendet werden.

Für die Parametrierung des Handlingmodells *MF-Tyre* in der Version 5.2 sind hauptsächlich quasistatische Fahrzustände für die Parametrierung relevant. Um die erforderlichen Messdaten für die Seitenkräfte zu erhalten,

eignet sich besonders die Messung mittels der TIME-Messprozedur (**Tire Measurements**) [Kla99]. Diese Messprozedur wurde zur effizienten Ermittlung von Reifenkennlinien auf Prüfständen von der *Universität Karlsruhe*, Firma *TNO* und der *Universität Delft* entwickelt. Zusätzlich wird eine Serie von Umfangskraft-Schlupf-Messungen (mit und ohne Schräglaufwinkel) durchgeführt, um auch Umfangskräfte erfassen zu können. In [TNO13a] werden die erforderlichen Messprozeduren ausführlich beschrieben. Aus den Messungen werden anschließend die erforderlichen Daten extrahiert und das Parameterfitting durchgeführt. Firma *TNO* stellt hierfür ihr umfassendes Software-Werkzeug *MF-Tool* zur Verfügung [TNO08]. Ein Parameterfitting kann jedoch auch durch die Implementierung der Modellgleichungen aus [TNO13b] in einer Berechnungssoftware wie *MATLAB* [The12] durchgeführt werden.

Zur Parametrierung von Reifenmodellen für die Simulation von dynamischen Reifeneigenschaften, wie *MF-Swift* oder *FTire*, sind weitere Untersuchungen notwendig. In der Regel werden dazu Schlagleistenüberfahrten auf Prüfständen durchgeführt. Hierfür wird auf der Prüfstandstrommel eine profilierte Metallleiste (Schlagleiste) in einem Winkel von 90° bzw. 45° zur Fahrtrichtung installiert. Der Reifen rollt darauf ab, das Schwingverhalten des so angeregten Reifens wird anschließend für die Modellparametrierung verwendet. [cos13] erläutert die hierfür notwendigen Messungen.

Um valide Reifenmodelle zu erhalten, ist es bei der Parametrierung unerlässlich, in einem iterativen Prozess einen Abgleich zwischen den realen Messungen und Simulationsergebnissen mit dem parametrierten Reifenmodell durchzuführen. In Abbildung 2.10 zeigt [Ada10] schematisch das Vorgehen bei der Reifenparametrierung. Sollte der Abgleich zwischen Messung und Simulation (Rechnung) nicht zufriedenstellend sein, muss die Parameteridentifikation mit geänderten Einstellungen erneut erfolgen (n.i.O.-Pfad).

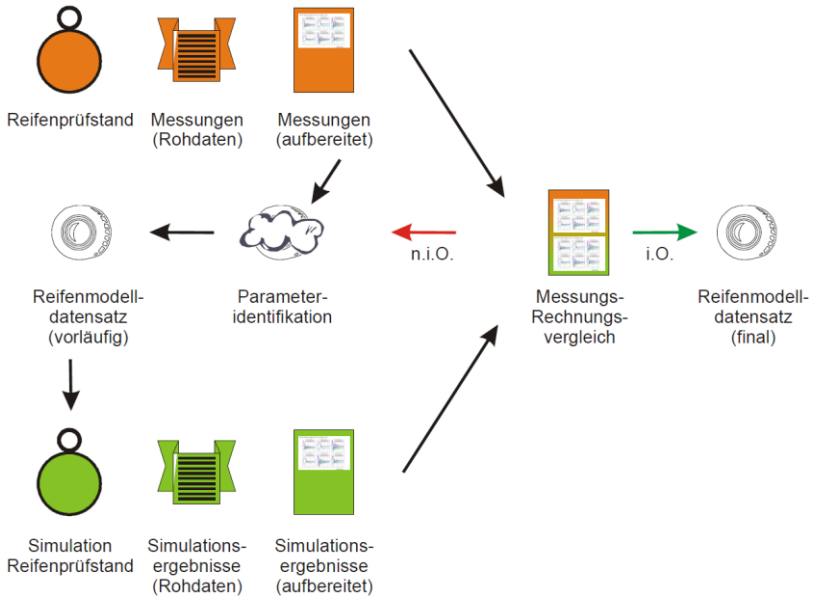


Abbildung 2.10:
Vorgehen bei der Reifenparametrierung [Ada10]

2.2.5 Abbildung verschiedener Fahrbahnen und Fahrbahnzustände

Um verschiedene Fahrbahnen und Fahrbahnzustände simulativ darstellen zu können, ist es notwendig, die Reifenmodelle entsprechend zu parametrieren. Um diese Parametrierung durchführen zu können, ist es in der Regel erforderlich, den Reifen auf der zu simulierenden Fahrbahn zu messen und das Modell anhand der Messdaten zu parametrieren.

Die aufwändigen Messprozeduren sind jedoch meist nur auf Prüfständen mit künstlichen Fahrbahnen darstellbar. Flachbahnprüfstände können bauartbedingt mit keinen realen Fahrbahnoberflächen ausgestattet werden, Außentrommelprüfstände sind ebenfalls nur bedingt geeignet, da durch die Fliehkräfte Asphalt- oder Beton-Fahrbahnen abgeschleudert

werden können. Winterliche Fahrbahnoberflächen, wie Schnee- oder Eisfahrbahnen, sind auf diesen Prüfständen ebenfalls nicht darstellbar. Die Messung auf realen Fahrbahnen ist deshalb in der Regel nur auf Innentrommelprüfständen möglich. Da diese Prüfstände aufgrund der aufwändigen Technik im industriellen Umfeld jedoch kaum eingesetzt werden, fehlt es an Möglichkeiten, um Reifenmodelle auf diesen Prüfständen zu parametrieren.

In der Praxis werden Messungen zur Parametrierung von Reifenmodellen für die Fahrdynamiksimulation deshalb meist auf *Safety-Walk*-Fahrbahn auf Flachbahnprüfständen durchgeführt. Mittels Skalierungsfaktoren werden die Reibwerte der MF-Modelle an die der realen Fahrbahn angepasst. Im Fokus stehen hierbei jedoch in der Regel nur die maximalen Reibwerte zwischen Reifen und Fahrbahn. Das gesamte Modell wird linear im gesamten Bereich skaliert, so dass der maximale Reibwert zwar dem der realen Fahrbahn entspricht, die Charakteristik der Kraftschlusskurven gleicht jedoch immer noch der des Reifens auf *Safety-Walk*.

Während die Unterschiede in der Reifencharakteristik zwischen *Safety-Walk* und Asphalt meist noch zu vernachlässigen sind, sind bereits auf nasser Fahrbahn deutliche Unterschiede zwischen den beiden Fahrbahnen zu erkennen. Werden die Reifen bezüglich ihres Reibwerts noch weiter nach unten skaliert – um beispielsweise Schnee- und Eisfahrbahnen zu simulieren – ändern sich die Reifeneigenschaften so stark, dass ein valides Simulationsergebnis nicht mehr zu erwarten ist (vgl. Abschnitt 5.1). [Gie07] und [Cou09] zeigen deutlich, dass sich die Reifencharakteristik bereits zwischen verschiedenen Schneefahrbahnen stark ändert, so dass eine lineare Skalierung dort keinesfalls zielführend ist.

[Jag96] zeigt eine Methode, Reifenmodelle auf einfache Weise zu korrigieren. Ausgehend vom Prüfstandsversuch wird auf (in [Jag96]) nicht näher spezifizierte reale Fahrbahnen mit höherer Griffigkeit umgerechnet. Die Korrektur bezieht sich dabei lediglich auf reine laterale Reifenkräfte und

Fahrbahnen mit nur wenig erhöhtem maximalen Reibwert. Eine allgemeine Umrechnung auf andere Fahrbahnen ist nicht erläutert.

In [Aro05] wurde untersucht, wie sich die Lambda-Skalierungsfaktoren [Pac12] der Magic Formula auf unterschiedlichen Fahrbahnen verändern. Dabei wurden nasser Asphalt, raue und polierte Eisfahrbahnen sowie Schneefahrbahnen untersucht. Die Skalierungsfaktoren wurden durch ein Parameterfitting so bestimmt, dass die am *Flat-Trac* gemessenen Messkurven bestmöglich auf die Daten der Messungen aus den realen Fahrbahnen passen. Es zeigt sich, dass besonders auf Schnee- und Eisfahrbahnen bei einzelnen Skalierungsfaktoren die Streuung sehr groß ist. Eine eindeutige Skalierung von *Safety-Walk* auf die verschiedenen Fahrbahnen mittels festgelegter MF-Skalierungsfaktoren ist aufgrund der Varianz zwischen den Reifen nicht möglich. Die Einflüsse auf das Rückstellmoment und Sturzmoment wurden in [Aro05] nicht betrachtet.

[Gie11] und [Fis99] untersuchten die Einflüsse der Fahrbahn auf die Reifencharakteristik. [Gie11] beschreibt die maßgeblichen Mechanismen der Kraftübertragung und die sich daraus ergebenden Einflüsse auf die Reifencharakteristik auf Schnee und Eis. Unter anderem werden darin die Einflüsse von Reifenprofilgestaltung (z.B. Anzahl Profilrillen) und Fahrbahneigenschaften (z.B. Fahrbahntemperatur) auf die maßgeblichen Reifencharakteristiken, wie maximaler Umfangskraftbeiwert oder Schräglaufsteifigkeit, untersucht. [Fis99] zeigt, welchen Einfluss die Fahrbahnoberfläche auf das Kraftschlussverhalten auf Hochreibwert hat. Er zeigt den deutlichen Einfluss der Fahrbahntextur auf die Reifencharakteristiken auf verschiedenen Fahrbahnoberflächen und entwickelt Umrechnungsalgorithmen zur Skalierung von gemessenen Reifenkennlinien auf andere Hochreibwertfahrbahnen.

2.2.6 Einordnung der Forschungsarbeit

Beim Vergleich der Ergebnisse der bisherigen Arbeiten wird deutlich, dass eine einfache Skalierung von Reifenmodellen für eine Übertragbarkeit von Hoch- auf Niedrigreibwert nicht ausreichend ist. Gegenwärtig sind in der Literatur und Praxis keine Methoden verfügbar, welche eine Erzeugung oder Umrechnung von validen Reifen-Simulationsmodellen für die Fahrzeug-Handlingsimulation auf Schnee- Eis und nassen Fahrbahnen ohne aufwändige Messprozeduren ermöglichen.

Diese Forschungsarbeit soll die bestehende Lücke zwischen den theoretischen Betrachtungen auf verschiedenen Fahrbahnen und der Erzeugung von Reifenmodellen für die Fahrdynamiksimulation auf Niedrigreibwert in der Praxis schließen. Ausgehend von den theoretischen Grundlagen und umfassenden Untersuchungen auf Prüfständen soll mit dieser Arbeit die Möglichkeit geschaffen werden, anhand einer mit Messungen fundierten statistischen Datenbasis auf einfache Art und Weise valide Reifenmodelle für die Handlingsimulation auf Niedrigreibwert erzeugen zu können.

3 Ermittlung von Reifencharakteristiken durch Einsatz statistischer Methoden

Die Auswirkung von Reifen- und Fahrbahneigenschaften auf die Reifencharakteristik bei den verschiedenen Fahrbahnen ist äußerst komplex. Übliche Methoden der Versuchsplanung und -auswertung zur Ermittlung von Reifencharakteristiken stoßen für die in diesem Forschungsprojekt angedachten Analysen an ihre Grenzen. Um die Komplexität der Aufgabe beherrschbar zu machen, wurden neue methodische Ansätze entwickelt, welche auf statistischen Grundsätzen basieren.

Die in dieser Arbeit detailliert erläuterten Ansätze zum Vorgehen und die zugrundeliegende Methodik bzgl. statistischer Versuchsplanung und Ermittlung von Reifencharakteristiken über statistische Methoden werden ebenfalls zusammengefasst in [Was15] gezeigt.

3.1 Grundprinzip der Erzeugung virtueller Winterreifenmodelle

Das Reifenverhalten auf unterschiedlichen Fahrbahnen hängt von vielen Faktoren ab. Dazu zählen neben den Fahrbahneigenschaften auch Eigenschaften des Reifens. Sämtliche Eigenschaften wechselwirken unterschiedlich miteinander, so dass eine einfache Umrechnung von einer Fahrbahn auf eine andere nicht ohne weiteres möglich ist (vgl. Abschnitt 2.2.5).

Ziel der Forschungsarbeit ist es, valide Reifenmodelle für eine Fahrtdynamiksimulation auf winterlichen Fahrbahnoberflächen zu erzeugen (vgl.

Abschnitt 1.2). Zu diesem Zweck wird ein neuartiges Vorgehen entwickelt, das mittels statistischer Methoden die Erzeugung virtueller Winterreifenmodelle ermöglicht. Die Wirkprinzipien der Kraftübertragung auf den verschiedenen Fahrbahnoberflächen werden über objektive Kennwerte statistisch analysiert und anschließend in ein statistisches Vorhersagemodell umgesetzt (vgl. Abschnitt 3.8), um daraus im nächsten Schritt Reifenmodelle für die Simulation erzeugen zu können.

Das hier beschriebene Vorgehen besteht grundsätzlich aus zwei separaten Modulen. In Abbildung 3.1 ist der gesamte methodische Prozess von der Reifenmessung bis hin zum virtuellen Reifenmodell dargestellt. Innerhalb des in diesem Kapitel erläuterten Moduls 1 wird das statistische Modell anhand einer Messdatenanalyse parametrisiert. Sobald die statistische Basis einmalig als Grundlage geschaffen ist, kann anschließend im Modul 2 (vgl. Kapitel 4) die Erzeugung von virtuellen Reifenmodellen folgen.

Grundlage für Modul 1 bilden Reifenmessungen auf dem Innentrommelprüfstand auf verschiedenen Fahrbahnoberflächen (vgl. Abschnitt 3.3). Auf jede Einzelmessung wird eine mathematische Funktion angepasst und diese im Anschluss analysiert, so dass für jede Messung ein gesamter Parametersatz charakteristischer Kenngrößen erzeugt wird. Anschließend werden für jede der Fahrbahnoberflächen die Parametersätze statistisch ausgewertet. Über die statistische Analyse werden Vorhersagefunktionen erzeugt, die zusammen das statistische Modell ergeben (vgl. Abschnitt 3.8).

Während in [Nie15] allgemein funktionale Reifeneigenschaften für die Fahrdynamik anhand charakteristischer Parameter auf Gesamtfahrzeugebene betrachtet werden, orientiert sich die Ermittlung von charakteristischen Kenngrößen in dieser Arbeit vor allem an der quantitativen Auswertung der Reifeneigenschaften und deren Einflussfaktoren auf Reifenebene.

Dieses statistische Modell muss nur einmalig erzeugt werden und bildet dann die Ausgangsbasis für die Erstellung der virtuellen Reifenmodelle, die anschließend in Modul 2 erstellt werden. Zunächst werden anhand der Vorhersagefunktionen über die Vorgabe von Randbedingungen Stützstellen generiert, an die anschließend mathematische Funktionen angepasst werden. Diese angepassten Funktionen entsprechen in ihrer Form real gemessenen Messkurven, bilden allerdings das Reifenverhalten entsprechend der vorgegebenen Randbedingungen ab.

Auf diese Art und Weise wird ein virtueller Messdatensatz erzeugt, der mittels gewöhnlicher MF-Parametrierung zu einem universell einsetzbaren *Magic Formula Tyre*-Reifenmodell angepasst wird.

Die in diesem Kapitel im Folgenden erläuterten Schritte entsprechen dem in Abbildung 3.1 erläuterten Modul 1 der hier entwickelten Methodik zur Erzeugung virtueller Winterreifenmodelle. Dies umfasst die Schritte bis zur Erzeugung von statistischen Vorhersagefunktionen zur Ermittlung von Reifencharakteristiken. In Kapitel 4 wird im Anschluss Modul 2 erläutert, das sich mit der Erzeugung der Reifenmodelle beschäftigt.

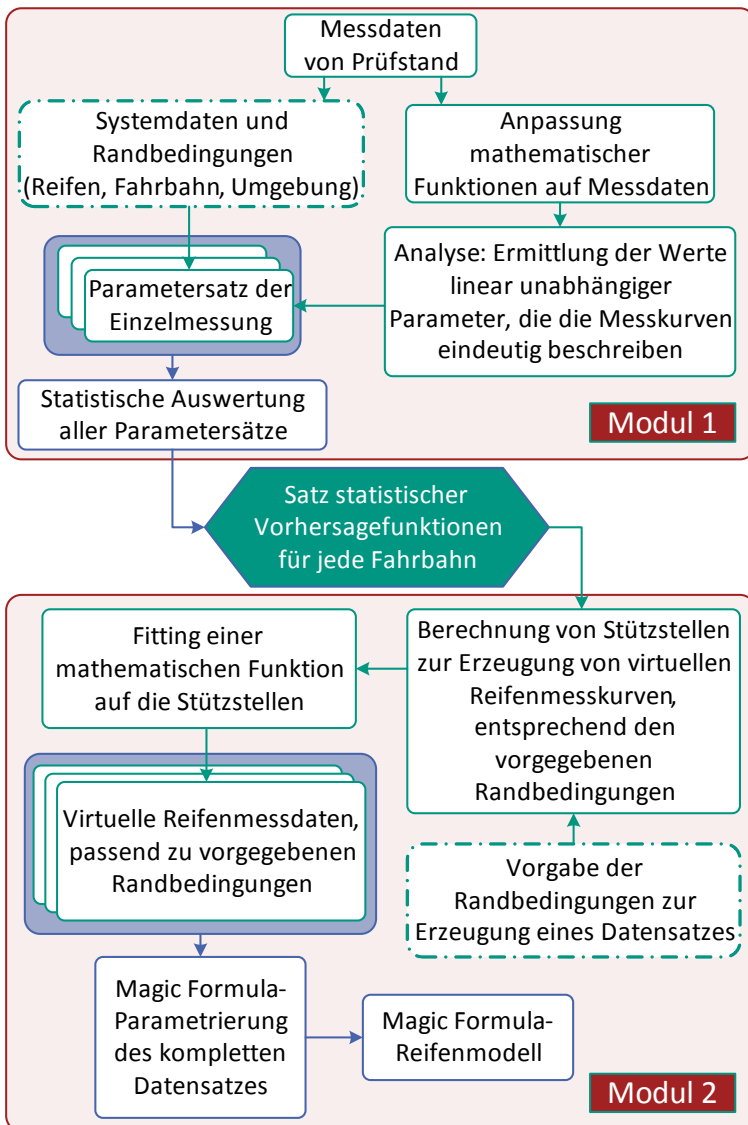


Abbildung 3.1: Schematische Übersicht des Vorgehens zur Erzeugung virtueller Reifenmodelle

3.2 Statistischer Ansatz zur Planung von Reifenmessungen

3.2.1 *Design of Experiments* als Planungsinstrument

Um den Einfluss einzelner Betriebsparameter zu identifizieren, werden Reifen auf Prüfständen vermessen. In der Praxis ist es üblich, dabei in jedem Versuchsdurchlauf nur jeweils einen Betriebsparameter zu verändern. Diese Methode wird als One-factor-at-a-time [Kle11] bezeichnet. Um alle Einflüsse ermitteln zu können werden daher oft vollfaktorielle Versuchspläne verwendet. Diese erfordern allerdings eine sehr hohe Anzahl an Versuchen, um den Einfluss aller Einflussfaktoren quantifizieren zu können.

Bei Schnee- und Eismessungen auf dem IPS wurden bei der Bestimmung des maximalen Kraftschlussbeiwerts Standardabweichungen von $\sigma=0,02 \dots 0,03$ beobachtet. Um mit einer Wahrscheinlichkeit von $P=95\%$ ($z=1,645$) den maximalen Kraftschlussbeiwert mit einem Fehler von $e<0,025$ bestimmen zu können, sind nach Formel 3.1 [Per13] mindestens 4 Wiederholungen n notwendig. z bezeichnet darin den z -Wert der Standardnormalverteilung.

$$n \geq \frac{z^2 \cdot \sigma^2}{e^2} \quad 3.1$$

Sollen beispielsweise für einen Reifen die linearen und quadratischen Einflüsse von Radlast, Sturzwinkel und Schräglaufwinkel auf den maximalen Umfangskraftbeiwert mit der geforderten Genauigkeit ermittelt werden, sind nach der üblichen, vollfaktoriellen $3k$ -Versuchsplanung (3 Ausprägungen je Einflussgröße, ein Zentrumspunkt) 112 Einzelversuche ($n=4 \cdot (3^3+1)$) notwendig.

Diese hohe Anzahl an Messungen ist für die Untersuchung eines einzelnen Reifens auf trockener Fahrbahn – wie *Safety-Walk* oder Asphalt – mit Messprozeduren wie der TIME-Prozedur [Aug97] gerade noch durchführbar. Für die Ermittlung von Reifeneigenschaften auf Schnee- und Eisfahrbahnen ist dies jedoch nicht mehr praktikabel. Hoher Fahrbahnverschleiß reduziert und limitiert die Anzahl möglicher Messungen auf diesen Fahrbahnen.

Sollen zu den drei genannten Parametern noch weitere, wie beispielsweise der Einfluss der Fahrbahntemperatur, Reifentemperatur oder Wechselwirkungen der einzelnen Größen mit untersucht werden, erhöht sich die Anzahl notwendiger Einzelversuche um ein Vielfaches, so dass ein vollfaktorieller Versuchsplan auch auf trockenen Fahrbahnen nicht mehr praktikabel ist.

Ein weiterer Nachteil bei der klassischen Versuchsplanung ist, dass unkontrollierbare, sich aber während eines Messblocks ändernde Umgebungsbedingungen, wie die Luftfeuchtigkeit oder die Umgebungstemperatur, zwar gemessen werden können, aber bei der Auswertung nicht direkt berücksichtigt werden können. Mit Hilfe gespiegelter Versuchspläne und zusätzlicher Referenzmessungen können die stärksten Trends zwar korrigiert werden, Wechselwirkungen können hierbei jedoch nicht berücksichtigt werden. Nichtlinearitäten können nur eingeschränkt ausgewertet werden.

In dieser Forschungsarbeit wird eine Vielzahl an Einflussfaktoren auf unterschiedlichen winterlichen Fahrbahnen untersucht. Herkömmliche Methoden der Versuchsplanung und Auswertung sind aus den oben genannten Gründen nicht geeignet, so dass ein alternativer Ansatz verfolgt wird. Um den Messaufwand zu reduzieren und die Möglichkeiten der anschließenden Datenauswertung zu maximieren, werden Methoden der statistischen Versuchsplanung verwendet. Die statistische Versuchsplanung wird auch als *Design of Experiments (DoE)* bezeichnet.

Die *DoE* erlaubt es, innerhalb einer Messreihe mehrere Parameter gleichzeitig zu ändern und so den Versuchsumfang erheblich zu reduzieren. Gleichzeitig steigen durch die statistische Planung die Analysemöglichkeiten der Messergebnisse, so dass sich dieses Vorgehen optimal eignet, um die Einflüsse auf die Reifeneigenschaften auf winterlichen Fahrbahnen zu untersuchen.

Unter Zuhilfenahme der Statistiksoftware *JMP* [SAS14] ist es möglich, einen optimalen Versuchsplan für die Untersuchung der Einflussgrößen zu erstellen. Es sollen nun beispielhaft (analog zum vorangegangenen Beispiel) ebenfalls die Faktoren Radlast, Sturzwinkel und Schräglaufwinkel untersucht werden. Unter Verwendung der statistischen Versuchsplanung kann erreicht werden, dass nun bereits eine Anzahl von 77 Versuchen ausreichend ist, um mit gleichbleibender Sicherheit dieselben Effekte analysieren zu können wie bei der klassischen Versuchsplanung.

Die statistische Versuchsplanung bietet folgende Vorteile, wenn eine vollfaktorielle Durchführung von Versuchen nicht praktikabel ist:

- Verringerter Versuchsumfang
 - geringerer Reifen- und Fahrbahnverschleiß
 - Steigerung der Qualität der Ergebnisse
- Verbesserte Datenbasis für die Auswertung und Analyse
- Ermöglicht die statistische Auswertung
- Untersuchung und Quantifizierung von Haupteffekten und Wechselwirkungen
- Mögliche Beschreibung von Effekten in mathematischen Modellen

3.2.2 Erstellung von Versuchsplänen für Reifenmessungen

Sämtliche Pläne für Messungen auf dem IPS im Rahmen dieser Forschungsarbeit werden mit den Methoden der statistischen Versuchsplanung erstellt. Zunächst werden für die verschiedenen Fahrbahnen die

relevanten Einflussfaktoren definiert. Die Einflussfaktoren können dabei in zwei Kategorien aufgeteilt werden: messbare, beeinflussbare Faktoren und messbare, nicht (bzw. nur bedingt) zu beeinflussende Faktoren. Zu den direkt beeinflussbaren Faktoren zählen beispielsweise Radlast und Sturzwinkel. Die Fahrbahntemperatur oder die Luftfeuchtigkeit sind dagegen nicht exakt zu beeinflussen. Diese Faktoren ändern sich während eines Messblocks kontinuierlich, so dass diese nicht exakt eingestellt werden können. Da diese Faktoren trotzdem gemessen werden können, werden diese ebenfalls mit in die *DoE*-Planung mit einbezogen.

Die Einflussfaktoren sind für jede Fahrbahn und jeden Versuchstyp separat zu bestimmen. Tabelle 3.1 zeigt die ausgewählten Einflussfaktoren für die untersuchten Fahrbahnen. Messprozeduren werden in Umfangskraft-Schlupf- ($F_x(s)$) und Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Messungen ($F_y(\alpha)$) unterteilt. Die hier als Umfangskraft-Schlupf-Messungen bezeichnete Messungen beinhalten sowohl reine Umfangskraftmessungen bei 0° Schräglaufwinkel, als auch Messungen bei kombinierter Belastung (Umfangskraftmessungen bei konstantem Schräglaufwinkel $\neq 0^\circ$). Bei den Versuchen auf nasser Fahrbahn wird davon ausgegangen, dass die Fahrbahn- und Reifentemperatur während den Messungen aufgrund der konstanten Wassertemperatur und dem kontinuierlichen Kühleffekt konstant bleibt und so keinen Einfluss auf das Messergebnis hat, sie wird deshalb nicht mitgemessen.

Neben diesen ausgewählten Einflussfaktoren werden die drei zu untersuchenden Reifen (siehe Abschnitt 3.4) mit in die *DoE* integriert.

Die Anzahl der maximal durchführbaren Messungen je Messblock hängt stark von der Fahrbahnoberfläche und den durchzuführenden Messprozeduren ab. Dies wirkt sich auf die Erstellung des Messplans aus. Für die Untersuchungen sollte jeder der Messblöcke zwingend in einem Stück und ohne Unterbrechungen durchgeführt werden, um Störeinflüsse durch eventuell veränderte Umgebungsbedingungen zu vermeiden. Auf der Schneefahrbahn können wegen der aufwändigeren Fahrbahnpräparation

pro Messblock maximal 30 Messungen durchgeführt werden, auf nasser Fahrbahn sind dagegen 45 Versuche möglich. Um den Einfluss sich eventuell stetig ändernder Versuchsbedingungen auf die Messungen der einzelnen Reifentypen zu reduzieren, werden die gesamten Versuche in zufälliger Reihenfolge durchgeführt.

Tabelle 3.1:
Auswahlmatrix der Einflussfaktoren

Einflussfaktor	Fahrbahn		Schnee		Eis		Asphalt nass	
	Versuchstyp		$F_X(s)$	$F_Y(\alpha)$	$F_X(s)$	$F_Y(\alpha)$	$F_X(s)$	$F_Y(\alpha)$
Radlast	■	■	■	■	■	■	■	■
Sturzwinkel	■	■	■	■	■	■	■	■
Umgebungstemperatur	□	□	□	□	□	□	■	■
Fahrbahntemperatur	□	□	□	□	□	□		
Reifentemperatur	□	□	□	□	□	□		
Luftfeuchtigkeit	□	□	□	□	□	□		
Schräglaufwinkel	■				■		■	
Schneehärte	□	□						
Mikrorauigkeit							□	□

■ kontrollierbare, messbare Faktoren

□ nicht (bzw. nur bedingt) kontrollierbare, messbare Faktoren

Für jede Fahrbahn und jeden Versuchstyp werden individuelle Versuchspläne mit den entsprechenden Randbedingungen erstellt. Tabelle A.1 im Anhang zeigt einen Ausschnitt aus dem Versuchsplan auf nasser Asphaltfahrbahn für kombinierte Umfangskraft-Schlupf-Messungen. Zugrunde gelegt wird hierbei eine Standardabweichung des Reibwerts von $\sigma=0,03$ und eine zu detektierende Genauigkeit von $e=0,025$. Es werden insgesamt 150 Messungen auf 5 Messblöcke à 30 Messungen geplant. In die DoE werden hierbei nur kontrollierbare Faktoren aufgenommen, um die Güte des Versuchsplans bestimmen zu können. Diese Faktoren werden

während der Versuche mit gemessen und anschließend in die statistische Analyse mit einbezogen. Die Umgebungstemperatur wird als konstant angenommen.

Abbildung 3.2 zeigt die Power-Analyse für den erstellten Versuchsplan. Der Power-Wert gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein vorhandener Effekt mit einer vorgegebenen Mindestgröße mit einem Versuchsplan detektiert werden kann. Der Power-Wert hängt hierbei von der Anzahl der Versuche, der erwarteten Standardabweichung und vom gewählten Signifikanzniveau ab [Pro14]. Die dargestellten Power-Werte zeigen, dass mit dieser Anzahl an Messungen die Einflüsse mit ausreichender Modellgüte beschrieben werden können. Bei einer angenommenen Streuung der Ergebnisse von $\sigma=0,03$ können bei dieser Versuchsplanung und einem 5% Signifikanzniveau die Haupteffekte mit 97,1%, die Nebeneffekte mit mindestens 65,6% Wahrscheinlichkeit detektiert werden.

Power Analysis		
Signifikanz-Niveau	Significance Level	0,05
Erwartete Messungenauigkeit	Anticipated RMSE	0,03
	Parameter	Power
Konstantwert der linearen Regression	Intercept	0,106
Haupteffekte	Radlast	0,971
	Schräglaufwinkel	0,971
	Sturzwinkel	0,971
Nebeneffekte/ Wechselwirkungen	Radlast*Radlast	0,656
	Radlast*Schräglaufwinkel	0,893
	Schräglaufwinkel*Schräglaufwinkel	0,656
	Radlast*Sturzwinkel	0,893
	Schräglaufwinkel*Sturzwinkel	0,893
	Sturzwinkel*Sturzwinkel	0,656

Abbildung 3.2: Analyse des Versuchsplans für Nassmessungen auf Asphaltfahrbahn (kombinierte Umfangskraft-Schlupf-Messungen) mit dem Programm JMP

3.3 Messungen auf dem Reifen-Innentrommelprüfstand

Für die Laboruntersuchungen des Reifenverhaltens wird der Reifen-Innentrommelprüfstand am *FAST* verwendet. Dieser Prüfstand erlaubt es, Untersuchungen auf verschiedenen, realen Fahrbahnoberflächen unter Laborbedingungen durchzuführen.

Der Reifen rollt bei diesem Prüfstand auf der Innenseite einer, im Durchmesser 3,80m großen Trommel ab. Diese Bauart ermöglicht es, neben dem *Safety-Walk*-Belag auch reale Fahrbahnoberflächen, wie Asphalt- oder Betonfahrbahnen, zu installieren. Neben Trockenmessungen sind auf diesen Fahrbahnen ebenfalls Versuche auf nassen Fahrbahnen möglich. Abbildung 3.3 links zeigt den schematischen Aufbau des IPS.



Abbildung 3.3:
Schematische Darstellung des IPS (links); Radführung (rechts)

Der Prüfstand ist von einer Klimakammer umgeben, die mit Hilfe von Klimaanlage bis zu einer Umgebungstemperatur von -20°C heruntergekühlt

werden kann. In der Trommel können so auch winterliche Fahrbahnen wie Schnee und Eis integriert werden.

Der Versuchsreifen wird mittels einer Messfelge über eine 6-Komponenten-Radmessnabe mit der Radführung verbunden. Die Radaufhängung erlaubt die exakte Einstellung von Radlast, Radsturzwinkel, Schräglaufwinkel und Schlupf. Abbildung 3.3 rechts zeigt die Radführung am IPS. Über die Messnabe werden Kräfte und Momente am Reifen in alle drei Raumrichtungen aufgezeichnet. Ein Messrechner speichert die Daten.

Um die Oberflächentemperatur des Reifens während der Messung ermitteln zu können, wird vor dem Reifeneinlauf ein Niedertemperaturpyrometer angebracht. Das speziell kalibrierte Pyrometer kann Temperaturen bis -15°C exakt ermitteln und wird so vor den Reifeneinlauf positioniert, dass der Messfleck die gesamte Breite des Laufstreifens erfasst. Auf diese Weise wird ein integraler Temperaturwert des Laufstreifens ermittelt. Ein weiteres Niedertemperaturpyrometer wird vor dem Einlauf mit Fokus auf die Fahrbahn positioniert und ermittelt die Fahrbahnoberflächentemperatur.

Die Umgebungstemperatur wird mittels eines Widerstandsthermometers direkt über dem Reifen gemessen. Die Luftfeuchtigkeit im Prüfstandsraum wird ebenfalls mit in den Messdaten aufgezeichnet. In Tabelle 3.2 sind die technischen Daten des IPS und des Messsystems aufgelistet.

Tabelle 3.2:

Technische Daten des Innentrommelprüfstands am FAST

Technische Daten des Prüfstands	
Durchmesser der Innentrommel	3,8m
Fahrbahnen	- Schnee - Eis - <i>Safety-Walk</i> - Asphalt - Beton
Maximale Antriebsleistung	310kW
Max. Prüfgeschwindigkeit ³	200km/h
Wasserhöhe bei Nassmessungen	0mm ... 4mm
Umgebungstemperatur	-15°C ... +30°C
Schräglaufwinkel ⁴	-20° ... +20°
Sturzwinkel	-10° ... +20°
Max. Schneehöhe	70mm
Breite der Schneefahrbahn	270mm
Schneehärte (CTI)	80 ... 95

Technische Daten des Messsystems	
Max. Kräfte am Rad	15kN
Max. Antriebs- und Sturzmoment	5500Nm
Max. Rückstellmoment	1500Nm
Messbereich der Niedertemperatur-Pyrometer	-20°C ... 5°C

3.3.1 Fahrbahnen

Die Bauweise des Prüfstands eignet sich in besonderer Weise dazu, auf der Innenseite der Trommel verschiedene Fahrbahntypen und Fahrbahnoberflächen einzusetzen, ohne dass Fahrbahnteile nach außen abgeschleudert werden können. Im Folgenden werden die einzelnen Fahrbahnen näher erläutert.

³ Maximale Prüfgeschwindigkeit auf Schneefahrbahn: 100km/h

Maximale Prüfgeschwindigkeit auf Asphalt-/Betonfahrbahn: 150km/h

⁴ Max. Schräglaufwinkel auf Schneefahrbahn -10° ... +10° wegen limitierter Fahrbahnbreite

3.3.1.1 *Safety-Walk-Fahrbahn*

Der IPS ist standardmäßig mit einem *Safety-Walk*-Belag ausgestattet. Dieser Belag wird bei Reifenmessungen im industriellen Umfeld aufgrund seiner gleichbleibenden Eigenschaften als Standardprüfoberfläche verwendet. Der Belag wird als Band auf die Stahltrommel aufgeklebt und besitzt eine hohe Mikrotextrur, aber nahezu keine Makrotextrur. Der Vorteil dieses Belags ist, dass er äußerst standfest und langlebig ist und sich die Fahrbahn dadurch auch nach vielen Messungen kaum verändert.

Der Fahrbahnbelag eignet sich in erster Linie für Messungen auf trockener Oberfläche. Durch die fehlende Makrotextrur fehlt der Fahrbahn die Drainagemöglichkeit, so dass bei Nassmessungen Aquaplaningeffekte die Messungen übermäßig beeinflussen.

Am IPS wurden auf diesem Belag Vergleichsmessungen zum *Flat-Trac*-Prüfstand durchgeführt, die anschließend als Eingangsparameter für das statistische Modell verwendet werden.

3.3.1.2 *Asphalt nass*

Einzelheiten über die Testmethodik auf nassen Fahrbahnen am IPS und die zugrunde liegende statistische Auswertung von Reifeneigenschaften auf nasser Fahrbahn werden in [Was14] beschrieben.

Die Asphaltfahrbahn (Abbildung 3.5) wird in acht speziell gefertigten Fahrbahnkassetten in der Trommel fixiert, so dass die gesamte Trommel mit einer umlaufenden Fahrbahn ausgekleidet ist. Als reale Straßenoberfläche mit Mikro- und Makrorauigkeit eignet sich der Asphaltbelag besonders für Nassmessungen. Das Wasser wird über einen Wasserzulauf hinter dem Reifenauslauf eingebracht. Durch die aus der Rotation der Trommel resultierende Fliehkraft wird das Wasser gleichmäßig auf der gesamten Fahrbahn verteilt. Vor dem Reifeneinlauf befindet sich ein kapazitiver Wasserstandsmesser, der eine exakte Ermittlung und Regulierung der

Wasserhöhe ermöglicht. Abbildung 3.4 zeigt die Position der Wasserzufuhr sowie die Lage und das Funktionsprinzip des kapazitiven Wasserhöhsensors.

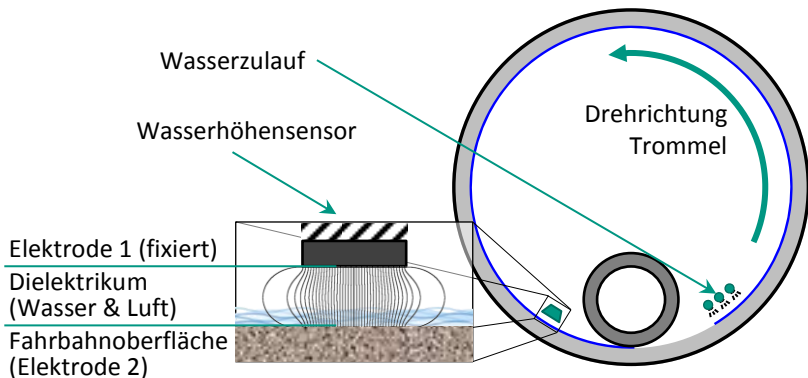


Abbildung 3.4:

Wasserzuführung und Wasserhöhenmessung am Innentrommelprüfstand [Was14]

Durch das fortwährende Abrollen des Reifens kommt es auf der Asphaltfahrbahn zu Poliereffekten. Die Mikrorauigkeit der Fahrbahn sinkt dadurch stetig. Da der Einfluss der Mikrorauigkeit bei den Nassmessungen nicht zu vernachlässigen ist, ist es notwendig, die Oberfläche regelmäßig wieder aufzubereiten und so eine gleichbleibende Oberflächenbeschaffenheit zu gewährleisten. Hierzu wird auf feuchter Oberfläche eine Metallgliederkette über die drehende Fahrbahn gezogen, welche die Fahrbahn aufraut (Abbildung 3.5, links). Auf diese Weise wird die Mikrotexur erhöht, so dass die Griffbarkeit der Fahrbahn wieder auf einen definierten Wert erhöht wird. Die Mikrorauigkeit wird dabei mit einem SRT⁵-Pendel (Abbildung 3.5, rechts) ermittelt.

⁵ Skid Resistance Tester (Abbildung 3.5, rechts)



Abbildung 3.5:
Wiederaufbereitung der Asphaltfahrbahn (links) und
Messung der Mikrorauigkeit bei Nassmessungen (rechts) [Was14]

3.3.1.3 Schneefahrbahn

Für die Messungen auf der Schneefahrbahn wird der IPS mit einer speziellen Methode mit künstlich erzeugtem Schnee ausgekleidet. Im Rahmen der Forschungsarbeit von Bolz [Bol06] wurde das Verfahren zur Herstellung der Schneefahrbahn entwickelt und dokumentiert.

Die Herstellung des Schnees erfolgt direkt im Inneren der Trommel mittels einer im oberen Teil der Trommel angebrachten Schneepistole. In den, vor der Schneeproduktion heruntergekühlten Trommelraum wird über die Düse der Schneepistole ein Gemisch aus Wasser sowie flüssigem und gasförmigen Stickstoff zerstäubt. Der flüssige Stickstoff verdampft sofort und kühlt den Produktionsraum zusätzlich. Das Wasser gefriert, während es zu Boden sinkt, zu Schneekristallen und sammelt sich auf der langsam rotierenden Trommel. Dieser kontinuierliche Prozess wird gestoppt, sobald eine ausreichend hohe Schicht Schnee produziert wurde. Der nun locker in

der Trommel verteilte Schnee muss anschließend über eine Verdichterwalze bis zum gewünschten Grad komprimiert werden, um ein Herausfordern des Schnees und einen übermäßig hohen Fahrbahnverschleiß während der Messungen zu vermeiden. Die Schneekonditionierung orientiert sich am in [Bol06] erläuterten Konzept der Walzenverdichtung. Der Produktionsprozess wird drei bis vier Mal wiederholt, bis die maximale Fahrbahnhöhe von 70 mm (im verdichteten Zustand) erreicht ist. Um eine maximale Höhe der Schneeschicht zu erreichen, wird der Schnee direkt auf die *Safety-Walk*-Fahrbahn aufgebracht. Die Schneefahrbahn wird in der Trommel seitlich von Stützblechen gegen Ausbrechen und Verschieben gesichert. Abbildung 3.6 zeigt den Prüfstand mit eingebrachter Schneefahrbahn sowie die Walze zum Verdichten des losen Schnees.



Abbildung 3.6:
Frisch eingewalzte Schneefahrbahn mit Walze (links);
Fahrbahn kurz vor Ende der nutzbaren Schneeschicht (rechts) [Was15]

Der produzierte Kunstschnee ist mit natürlichem Schnee vergleichbar. Die Korngrößen des am IPS produzierten Schnees befinden sich im Bereich üblicher Korngrößen von älterem Naturschnee. Die hier gebildeten Kornformen kommen ähnlich auch in natürlicher Umgebung vor [Bol06].

Durch das häufige Überrollen derselben Fahrbahn erfährt die Schneedecke eine hohe Belastung. Bei einer Prüfungsgeschwindigkeit von 30km/h wird die Fahrbahn etwa alle 1,5s erneut überrollt. Bei schwach verdichtetem

Schnee stellt sich daher ein sehr hoher Fahrbahnverschleiß ein. Während der Messprozedur wird vor allem bei Schräglauf des Reifens viel Schnee aus der Trommel herausgefördert. Durch Grabeffekte des Reifens im lockeren Schnee und Reibungswärme wird zudem die Oberfläche zerstört, so dass sich die Oberflächencharakteristik ständig verändert. Die Reproduzierbarkeit bei nur mäßig verdichtetem Schnee ist deshalb nicht ausreichend gegeben, so dass die Messungen auf Schneefahrbahnen am IPS im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich auf höher verdichtetem Schnee (hard packed snow, [Gie11]) mit einer Härte von CTI 80 bis CTI 95 stattfanden. Die Schneehärte wurde mit Hilfe eines CTI-Penetrometers (vgl. [Sho93]) gemessen und während den gesamten Messungen dokumentiert.

Fahrbahn-Konditioniereinrichtung für Messungen auf Schnee

Für die Durchführung von reproduzierbaren Messungen auf der Schneefahrbahn ist es notwendig, Maßnahmen zu ergreifen, die eine gleichbleibende und kontrollierbare Oberflächenbeschaffenheit garantieren. Beim Durchführen der Messungen auf der Schneefahrbahn kommt es durch mechanische Beanspruchung zum Verschleiß der Fahrbahnoberfläche. Grabeffekte und lokales Aufschmelzen tragen dazu bei, dass sich die Fahrbahn bei jeder Überrollung des Reifens verändert.

Die Schneefahrbahn muss deshalb vor den Messungen konditioniert werden. Die Aufbereitung der Fahrbahn erfolgt mittels einer scharfen Klinge (Schneehobel), die auf der gesamten Fahrbahnbreite die oberste Schneeschicht abträgt und so die verschlissene Oberfläche entfernt. Auf diese Weise werden Unebenheiten, die durch Grabeffekte entstehen, in der Fahrbahn beseitigt und eventuell aufgeschmolzenes und anschließend festgefrorener Schnee abgetragen.

Bislang wurde diese Aufbereitung der Fahrbahn einmalig direkt vor der Messung durchgeführt. Über einen Hydraulikstempel wurde der Schneehobel manuell zugestellt. Bei Vorversuchen zu dieser Forschungsarbeit zeigte sich jedoch, dass es für eine bessere Reproduzierbarkeit

notwendig ist, die Fahrbahn kontinuierlich auch während der Messung aufzubereiten. Der Fahrbahnverschleiß, der bei jeder Überrollung des Reifens verursacht wird, ist so groß, dass eine einmalige Konditionierung der Fahrbahn vor dem Versuch nicht ausreichend ist.

Um eine kontinuierliche Zustellung des Schneehobels realisieren zu können, wurde der Schneehobel und seine Steuerung im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelt. Die Ansteuerung sollte bestmöglich in die Arbeitsabläufe integriert und automatisiert werden. Hardwareseitig wurde das bislang hydraulische System durch eine elektromechanische Lösung ersetzt. Zum Einsatz kommt nun ein Elektrozyylinder mit einem maximalen Verfahrweg von 150mm, der über einen Steuerrechner angesteuert wird. Bei tiefen Temperaturen ist die Regelung der Zustellung mit der elektromechanischen Lösung besser umsetzbar, da bei Hydraulikzylindern die Viskosität des Öls einen entscheidenden Einfluss auf die Bewegung des Kolbens hat. Bei dieser Art von Elektrozyindern gibt es dagegen keinen nachteiligen Temperatureinfluss. Abbildung 3.7 zeigt den neu entwickelten Abziehhobel im realen Betrieb und als CAD-Einbauskizze.

Die Fahrbahn wird vor allem durch Schräglaufwinkel und Schlupf geschädigt. Vorversuche zeigten, dass dieser Verschleiß der Fahrbahn vor allem von den Parametern Fahrgeschwindigkeit, Radlast und Sturzwinkel abhängig ist. Diese Daten werden als Eingangsparameter in die Steuerung verwendet und so die Zustellgeschwindigkeit entsprechend den Versuchsparametern angepasst. Über einen Trigger wird die Zustellung des Hobels bei Messbeginn automatisch gestartet.

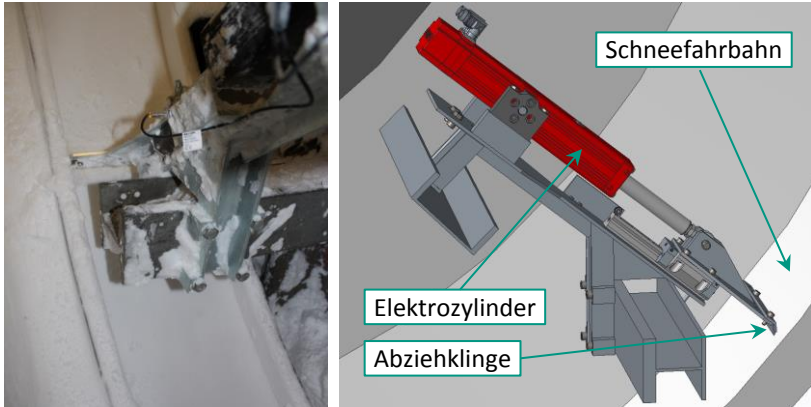
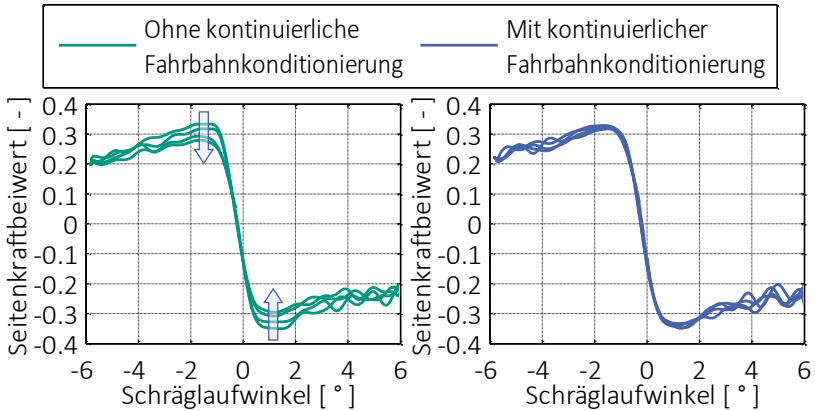


Abbildung 3.7:
Schneehobel zur kontinuierlichen Fahrbahnkonditionierung

Den Einfluss des Fahrbahnverschleißes auf die Messergebnisse zeigt Abbildung 3.8 am Beispiel einer Seitenkraftmessung. Im Bild links wurde die Fahrbahn direkt vor der Messung mit dem Hobel abgezogen. Während der Seitenkraftmessung selbst fand keine Zustellung des Hobels statt. Deutlich ist ein Abfall des Reibwerts über die Messdauer zu erkennen. Eine eindeutige Verbesserung der Messergebnisse ist in Abbildung 3.8, rechts, ersichtlich. Durch die kontinuierliche Zustellung des Schneehobels wird die Fahrbahn auch während der Messung nach jeder Überrollung des Reifens wieder aufbereitet. So kommt es zu weniger Veränderung der Messbedingungen während eines Messdurchlaufs, so dass die Messergebnisse reproduzierbarer sind.

Es hat sich gezeigt, dass ein Fahrbahnabtrag von 1 mm bis 4 mm (abhängig von Radlast und Sturzwinkel) je überrolltem Fahrbahnkilometer ausreichend ist, um bei einer Prüfgeschwindigkeit von 30 km/h solide Ergebnisse zu erreichen.

**Abbildung 3.8:**

Seitenkraftmessung am IPS ohne (links) und mit (rechts) automatischer Zustellung des Schneehobels (zweimaliges Durchfahren des Schräglaufweeps $\pm 6^\circ$)

3.3.1.4 Eisfahrbahn

Die Eisfahrbahn wird ebenfalls direkt auf die *Safety-Walk*-Fahrbahn aufgebracht. An den Seiten der Fahrbahn werden vor der Eisproduktion Leisten montiert, die ein sofortiges Herausfließen des Wassers bei der Eisproduktion verhindern. Nachdem der gesamte Prüfstand heruntergekühlt wurde, wird in die sich langsam drehende Trommel kontinuierlich Wasser eingeleitet. Dieses gefriert auf der Oberfläche und bildet so Schicht für Schicht eine etwa 15 mm dicke Eisfahrbahn.

Die noch unebene Fahrbahn wird im Anschluss mit der in Kapitel 3.3.1.3 erläuterten scharfen Klinge abgezogen, so dass eine ebene Oberfläche entsteht. Die durch das Abhobeln raue Eisfläche wird anschließend mit einem speziellen, sehr fein lamellierten Reifen poliert, so dass eine perfekt glatte und polierte Eisoberfläche für die Messungen zur Verfügung steht. Abbildung 3.9 zeigt die in den IPS eingebrachte Eisfahrbahn.

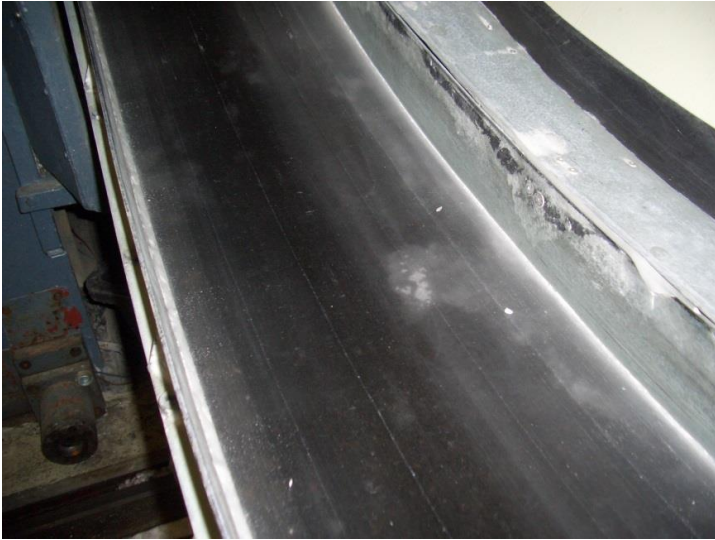


Abbildung 3.9:
Abgeschabte Eisfahrbahn (rau, unpoliert) im Innentrommelprüfstand des KIT [Was14]

3.3.2 Koordinatensysteme

Die Kräfte und Momente werden über die Radmessnabe im radfesten (aber nicht mitrotierenden) Koordinatensystem (KOS) aufgezeichnet. Die Orientierung des KOS entspricht der in [Unr97] festgelegten Definition des TYDEX-C-KOS, wie in Abbildung A.2, im Anhang, gezeigt.

Für die weitere Datenauswertung ist es notwendig, die Daten aus dem radfesten in ein horizontiertes KOS umzurechnen. Das radfeste KOS ist um den Radsturzwinkel γ gegenüber dem horizontierten System verdreht. Diese Verdrehung beeinflusst die Messgrößen Seitenkraft, Radlast und das Rückstellmoment, so dass diese mittels der Formeln 3.2 bis 3.4 in das TYDEX-H-KOS (Abbildung A.3 im Anhang) umgerechnet werden müssen.

$$F_{Y_H} = F_{Y_C} \cdot \cos \gamma - F_{Z_C} \cdot \sin \gamma \quad 3.2$$

$$F_{Z_H} = F_{Y_C} \cdot \sin \gamma + F_{Z_C} \cdot \cos \gamma \quad 3.3$$

$$M_{Z_H} = M_{Y_C} \cdot \sin \gamma + M_{Z_C} \cdot \cos \gamma \quad 3.4$$

Messdaten von Reifenmessungen werden gewöhnlich im TYDEX-H-System angegeben, da diese die resultierenden Momente an der Radnabe beschreiben. Für die Parametrierung von MF-Reifenmodellen sind allerdings die resultierenden Momente im Reifenaufstandspunkt auf der Fahrbahn entscheidend. Es wird deshalb eine weitere Koordinatentransformation in das TYDEX-W-KOS durchgeführt. Abbildung A.4 im Anhang zeigt das in die Fahrbahnebene verschobene KOS.

Die für die Transformation notwendige Verschiebung in Querrichtung berechnet sich über das Produkt aus dem negativen Tangens des Sturzwinkels und dem geometrischen Abrollradius zu e_{γ_W} (Gleichung 3.5). Für positive Sturzwinkel ergibt sich somit ein negativer Wert für e_{γ_W} bei Notation im TYDEX-W-KOS.

$$e_{\gamma_W} = -\tan(\gamma) \cdot r_{geom} \quad 3.5$$

Da es sich bei der Transformation vom TYDEX-H in das TYDEX-W-KOS um eine reine Translation handelt, ergibt sich für die Kräfte am Rad keine Änderung. Infolge der Translation entlang der Z- und Y-Achse ist jedoch eine Transformation aller Momente erforderlich. Die durch die Verschiebung resultierenden Versatzmomente berechnen sich aus dem Kreuzprodukt aus Verschiebevektor \vec{v}_H (Gleichung 3.6) und den dazugehörigen Einzelkräften und werden zu den Momenten des H-Systems hinzu addiert (Gleichung 3.7). Abbildung 3.10 zeigt eine Skizze der durchgeführten KOS-Transformationen.

$$\vec{v}_H = \begin{pmatrix} 0 \\ e_{\gamma W} \\ r_{geom} \end{pmatrix} \quad 3.6$$

$$\vec{M}_W = \vec{M}_H + \vec{v}_H \times \begin{pmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{pmatrix}_H \quad 3.7$$

Gleichungen 3.8 bis 3.10 beschreiben die Umrechnung der Momente vom TYDEX-H-KOS in das TYDEX-W-KOS im Detail.

$$M_{XW} = M_{XH} + e_{\gamma W} \cdot F_{ZH} - r_{geom} \cdot F_{YH} \quad 3.8$$

$$M_{YW} = M_{YH} + r_{geom} \cdot F_{XH} \quad 3.9$$

$$M_{ZW} = M_{ZH} - e_{\gamma W} \cdot F_{XH} \quad 3.10$$

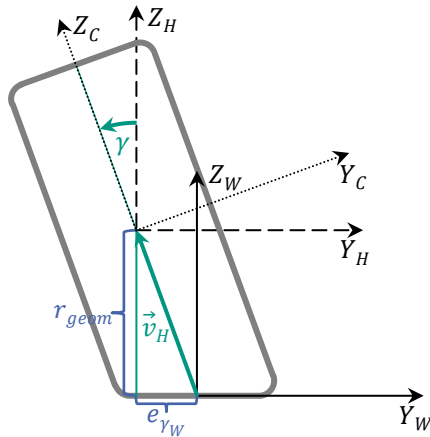


Abbildung 3.10:

Skizze zu den Koordinatentransformationen der verschiedenen TYDEX-Koordinatensysteme

3.3.3 Fahrbahnkrümmung

Bei den Messungen auf Prüfständen mit gekrümmten Fahrbahnen, wie Innen- oder Außentrommelprüfständen, ist zu beachten, dass die Krümmung der Fahrbahn die Messergebnisse beeinflusst. Um die Ergebnisse mit jenen auf ebener Fahrbahn vergleichen zu können, ist eine Umrechnung der Ergebnisse notwendig.

Im Rahmen des TIME-Projekts [Aug97] wurden Berechnungsvorschriften entwickelt, die eine Korrektur der Trommelkrümmung erlauben. Dort wurden zur Korrektur der Schräglaufsteifigkeit und der Rückstellmoment-Steifigkeit Korrekturformeln ermittelt. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Trommelkrümmung auf den gesamten Schlupf- und Schräglaufbereich gleichermaßen auswirkt, so dass Umfangskraft-Schlupf-Messungen ebenfalls mit der Korrekturvorschrift für die Schräglaufsteifigkeit in die Ebene umgerechnet werden.

Die Korrekturformeln geben die prozentuale Abweichung der Schräglauf-, bzw. Rückstellmomentsteifigkeit zwischen gekrümmter und ebener Fahrbahn an. Für die 3,80m-Innentrommel lautet nach [Aug97] der Korrekturfaktor für die Schräglaufsteifigkeit und Schlupfsteifigkeit

$$\Delta CorSti = \left(-32,61 - 0,003569 \cdot F_Z + \frac{1,815 \cdot r_0}{10} \right) \% \quad 3.11$$

und für die Rückstellmomentsteifigkeit

$$\Delta AlignSti = \left(-29,11 - 0,001243 \cdot F_Z + \frac{1,699 \cdot r_0}{10} \right) \% \quad 3.12$$

Hierbei handelt es sich um Zahlenwertgleichungen, in die die Radlast F_Z in N und der Radius r_0 in m einzusetzen ist.

Die Umrechnung von Schräglaufwinkel α und Schlupf s erfolgt nach Gleichung 3.13 und Gleichung 3.14 für jeden Datenpunkt:

$$\alpha_{Ebene} = \alpha_{Trommel} \cdot (100\% + \Delta CorSti) \quad 3.13$$

$$s_{Ebene} = s_{Trommel} \cdot (100\% + \Delta CorSti) \quad 3.14$$

Die Korrektur entspricht somit einer linearen Streckung von Schräglaufwinkel und Schlupf. Allerdings wird das Rückstellmoment nicht nur über die Seitenkraft F_Y (und somit indirekt über den Schräglaufwinkel) beeinflusst, sondern ebenfalls über die Nachlaufstrecke ($M_Z = F_Y \cdot n$). Bei der Korrektur des Rückstellmoments ist deshalb neben der reinen Streckung bzgl. des Schräglaufwinkels zusätzlich zu beachten, dass sich die Höhe des Rückstellmoments ebenfalls ändert. Es muss demnach nach der Streckung der Rückstellmomentenkurve zusätzlich eine Reduktion der Amplitude erfolgen. Die Korrektur wird über die in Gleichung 3.15 beschriebene Beziehung erreicht.




$$M_{Z_{Ebene}} = M_{Z_{Trommel}} \cdot \frac{1 + \Delta CorSti}{1 + \Delta AlignSti} \quad 3.15$$

3.4 Versuchsreifen

Zu Beginn der Forschungsarbeit wurden Räder-Reifen-Kombinationen ausgewählt, welche für alle weiteren Untersuchungen verwendet werden. Bei der Auswahl der Reifen und Räder spielen mehrere Aspekte eine Rolle. Da eine Validierung der Reifenmodelle anhand realer Gesamtfahrzeugmessungen durchgeführt werden soll, ist es notwendig, dass die Reifen zum später verwendeten Versuchsfahrzeug passen. Zudem soll eine möglichst breite Spreizung der Reifeneigenschaften zu einer soliden statistischen Datenbasis beitragen. Beschränkender Faktor bei der Auswahl der Reifen ist die Anzahl der Reifen, die für die Untersuchungen berücksichtigt werden können. Da innerhalb des Forschungsprojekts Reifeneigenschaften auf mehreren verschiedenen winterlichen Fahrbahnen und auf *Safety-Walk*

untersucht werden sollen, wurde die Anzahl der Versuchsreifen auf drei Reifentypen (Winterreifen) beschränkt.

Tabelle 3.3:
Überblick der Versuchsreifen

	Reifen B	Reifen D	Reifen N
Reifeneigenschaft			
Haupteinsatzgebiet	Allrounder	asphaltorientiert	„Nordlandreifen“
Reifenbreite	205 mm	205 mm	225 mm
Querschnittsverhältnis	55	55	45
Bauart	radial	radial	radial
Felgendurchmesser	16“	16“	17“
Tragfähigkeitsindex	91	91	91
Geschwindigkeitsindex	H	H	H
Gummihärte (ShA)	61	67	56
Felgenbreite	7“	7“	8“
Reifenfülldruck (kalt)	2,5 bar	2,5 bar	2,5 bar
Notlaufeigenschaft	ja	ja	ja
Profildesign			

Als Basisreifen wurde Reifen B in der Dimension 205/55 R16 ausgewählt. Dieser Reifen ist der Serien-Winterreifen des Versuchsfahrzeugs und kann als Allroundreifen eingruppiert werden. Als mehr asphaltorientierter Winterreifen wurde Reifen D derselben Dimension ausgewählt. Dieser Reifen zeigt etwas bessere Performance auf trockener Fahrbahn. Neben den beiden 16“-Reifen wurde Reifen N der Dimension 225/45 R17 ausgewählt. Dieser, vor allem in Nordeuropa eingesetzte Reifen bietet durch seine ausgeprägte Lamellierung und die geringere Shore-Härte auf Schnee- und Eisfahrbahnen besonders gute Handlingeigenschaften. Tabelle 3.3 zeigt die Daten der drei ausgewählten Reifentypen im Detail.

Zur Validierung der Methodik wurde ein zusätzlicher Reifen ausgewählt. Reifen P (Tabelle 3.4) wurde hierzu in der Dimension 245/50 R18 auf Schneefahrbahn gemessen, um die Methodik zu validieren.

Tabelle 3.4:
Reifeneigenschaften des Validierungsreifens

Reifen P	
Reifeneigenschaft	
Haupteinsatzgebiet	asphaltorientiert / allround
Reifenbreite	245 mm
Querschnittsverhältnis	50
Bauart	radial
Felgendurchmesser	18"
Tragfähigkeitsindex	100
Geschwindigkeitsindex	H
Gummihärte (ShA)	67
Felgenbreite	8"
Reifenfülldruck (kalt)	2,5 bar
Notlaufeigenschaft	ja
Profildesign	



Alle verwendeten Reifen wurden nach Montage und Auswuchten einer Einfahrprozedur auf *Safety-Walk*-Oberfläche unterzogen. Hierbei werden die Reifen 20 min lang bei einer Radlast von 3500 N und einer Geschwindigkeit von 80 km/h mit einer sinusförmigen Schräglaufwinkelvorgabe von $\alpha = \pm 1^\circ$ eingefahren. Der Sturzwinkel beträgt 0° , die Frequenz der Sinusvorgabe 0,1 Hz.

Damit wird sichergestellt, dass jeder Versuchsreifen bezüglich seiner Oberfläche identisch vorkonditioniert ist. Eventuell vorhandene

Produktionsreste, wie beispielsweise Trennmittel, werden ebenso entfernt wie Gummiüberstände an den Trennstellen der Backformen.

3.5 Messprozeduren

Zur Ermittlung der Messdaten wurden für die einzelnen Fahrbahnen Messprozeduren entwickelt, mit denen neben der Erzeugung hochwertiger Messergebnisse auch die besonders effektive Durchführung der Messungen möglich ist. Die Prozeduren sind in zwei Gruppen zu unterteilen: zum einen in Seitenkraftmessungen und zum anderen in Umfangskraftmessungen, welche wiederum in reine Umfangskraft-Schlupf-Messungen und in kombinierte Umfangskraft-Schlupf-Messungen unterteilt werden (Abbildung 3.11).

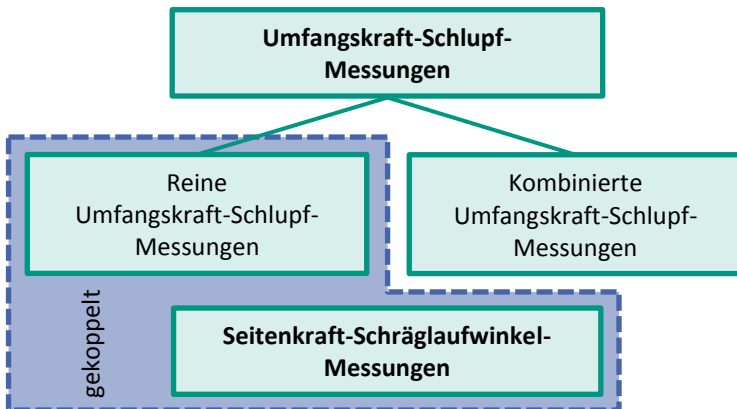


Abbildung 3.11:
Messprozeduren zur Messdatenerfassung

Um einen effizienten Messablauf zu erreichen, ist es bei Messungen auf Schnee- und Eisfahrbahnen aufgrund des geringeren Wärmeeintrags (Aufheizen des Reifens gering) während einer Messung möglich, Seiten- und Umfangskraftmessungen zu koppeln. Hierbei werden die Messungen

direkt nacheinander durchgeführt, ohne dass die Messung dazwischen gestoppt werden muss. Durch den Einsatz des neuen Schneehobels (vgl. Abschnitt 3.3.1.3) ist es nun möglich, auch auf Schneefahrbahnen bei gekoppelten Messungen reproduzierbare Messergebnisse zu erhalten.

Ablauf einer Messung

Zu Beginn jeder Messprozedur wird die Trommel- und Reifengeschwindigkeit auf den gewünschten Wert geregelt und der für die jeweilige Messung vorgesehene Sturzwinkel eingestellt. Der Reifen wird auf die Fahrbahn abgesetzt und die gewünschte Radlast eingestellt. Es ist darauf zu achten, dass das Rad zu diesem Zeitpunkt umfangskraftfrei läuft, um ein unbeabsichtigtes Aufheizen von Reifenlauffläche und Fahrbahn sowie unnötigen Fahrbahnverschleiß zu verhindern.

Die anschließende Durchführung der Messprozedur übernimmt ein Steuerrechner. Mit den darin hinterlegten Messprozeduren werden Schräglaufwinkel, Schlupf und der Trigger des Schneehobels gesteuert. Durch den Einsatz von rechnergesteuerten Prozeduren wird garantiert, dass alle Messungen vergleichbar ablaufen.

In den Messprozeduren wurden vorab Schlupf- und Schräglaufwinkelverläufe programmiert, die während den Messungen automatisch vom Rechner gesteuert werden. Abbildung 3.12 zeigt am Beispiel der gekoppelten Umfangskraft-Seitenkraftmessung den im Steuerrechner programmierten Schlupf- und Schräglaufwinkelverlauf. Um einen sicheren Nullpunktdurchgang zu garantieren wird jeweils kurz in die Gegenrichtung gesteuert. Um eine exakte Messung im linearen Schlupfbereich der Reifenkennlinien zu gewährleisten wird dort mit einem niedrigeren Schlupfgradienten gesteuert. Um den Verschleiß bei höherem Schlupf zu reduzieren wird dieser Bereich mit größerem Schlupfgradienten durchfahren.

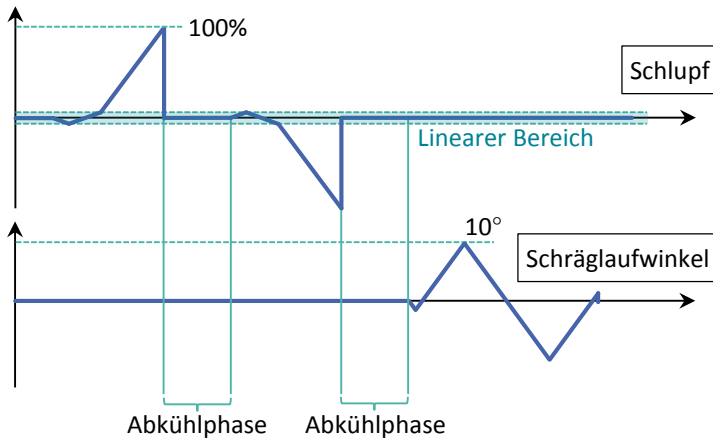


Abbildung 3.12:
Schematische Darstellung des im Steuerrechner programmierten Schlupf- und Schräglaufwinkelverlaufs (Bsp. Messprozedur: gekoppelte Messung)

Auf Schneefahrbahn wird zu Beginn jeder Messung das Triggersignal zum Start des Schneehobels aktiviert. Die Zustellung des Schneehobels beginnt und die durch das reine Rollen des Reifens beschädigte Oberfläche wird entfernt, bevor nach einigen Sekunden die Messung beginnt. Zwischen den einzelnen Phasen der Messung sorgen Abkühlphasen für eine Stabilisierung von Reifen- und Fahrbahntemperatur.

3.6 Auswertung der Messdaten

Bei der Messdatenauswertung wurde besonders auf die Möglichkeit einer automatisierten Erzeugung von statistischen Kenngrößen aus Reifenmessungen Wert gelegt. Die im Folgenden erläuterten Schritte beschreiben den speziell dafür entwickelten Prozess.

3.6.1 Messdatenanpassung vor dem Fittingprozess

Bei Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Messungen haben Ungleichförmigkeiten an Rad und Reifen einen deutlichen Einfluss auf die Messergebnisse. Vor allem bei Messungen mit niedrigem Reibwert (Eis- und Schneemessungen) wirkt sich dieser Effekt stark aus, wie Abbildung 3.14 zeigt. Beim Betrachten der Rohmessdaten sind die Schwankungen in der Seitenkraft deutlich erkennbar. Die Auswertung einer Frequenzanalyse (Fast Fourier Transformation, FFT) des Seitenkraftsignals zeigt im gewählten Beispiel (Abbildung 3.13) einen deutlichen Amplitudenanstieg zwischen 4 Hz und 5 Hz. Bei der Messgeschwindigkeit von 32 km/h und einem dynamischen Rollhalbmesser von 0,307 m ergibt sich für diesen Fall eine Raddrehfrequenz von 4,61 Hz. Die berechnete Raddrehfrequenz fällt deutlich mit der aus der FFT ermittelten Amplitudenerhöhung zusammen. Dies zeigt, dass die Schwankungen im Messsignal exakt in der Raddrehfrequenz auftreten. Für die Auswertung werden die Messsignale der Seitenkraftmessung deshalb mit einem Tiefpassfilter unterhalb der Raddrehfrequenz geglättet. In Abbildung 3.14 ist die Glättung des Messsignals deutlich erkennbar.

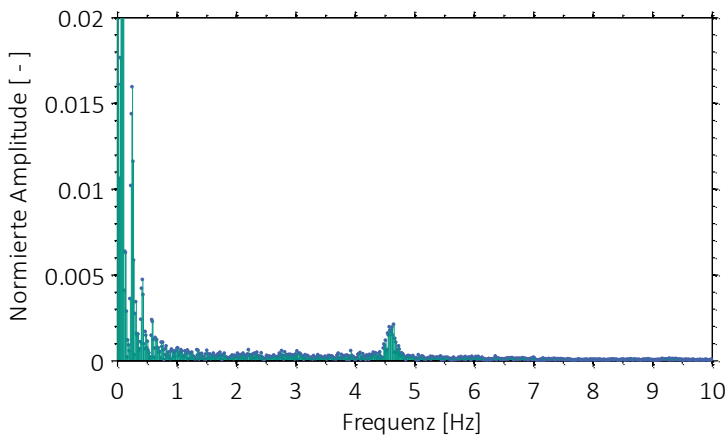


Abbildung 3.13:
Normiertes Amplitudenspektrum für Seitenkraftbeiwerte einer Seitenkraftmessung

Bei Umfangskraft-Schlupf-Messungen ist eine Filterung der Messdaten vor dem Fittingprozess nicht notwendig, da das Durchfahren des Schlupfes, im Gegensatz zur Verstellgeschwindigkeit des Schräglaufwinkels bei Seitenkraftmessungen, sehr schnell erfolgen muss, um einen übermäßigen Wärmeeintrag und den Fahrbahnverschleiß auf Schnee und Eis zu begrenzen. Das Durchfahren des gesamten Schlupfbereichs findet innerhalb weniger Sekunden statt. Störungen im Bereich der Raddrehfrequenz haben deshalb kaum Einfluss auf die Messergebnisse.

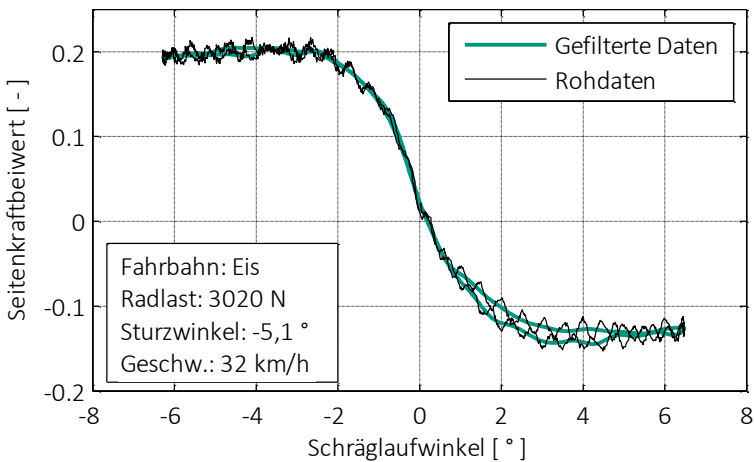


Abbildung 3.14:

Vergleich: Rohdaten und gefilterte Seitenkraftbeiwerte einer Eismessung

Durch das zügige Durchfahren des Schlupfes stehen bei $F_x(s)$ -Messungen für das Fitting insgesamt jedoch auch weniger Datenpunkte zur Verfügung. Um solide Fittingergebnisse zu erhalten, muss deshalb die Fittingprozedur gegenüber den $F_y(\alpha)$ -Messungen angepasst werden. Um ein gleichmäßiges Fitting über das gesamte Schlupfintervall zu gewährleisten, wird jeder Datenpunkt vor dem Fitting anhand der Punktedichte in seinem umgebenden Schlupfbereich gewichtet.

Für jede Einzelmessung wird dazu die Schlupfintervallbreite berechnet, die für die Ermittlung der Gewichtungsfaktoren verwendet wird. Dazu wird der mittlere Abstand zwischen allen Messpunkten bestimmt. Der gesamte Schlupfbereich wird daraufhin in gleiche Intervalle dieser Breite eingeteilt. Für jedes dieser Intervalle wird anschließend separat bestimmt, wie viele Messdatenpunkte enthalten sind. Auf diese Weise wird jeder Messwert im Schlupfbereich gemäß der Anzahl der darin enthaltenen Messpunkte gewichtet. Der Gewichtungsfaktor errechnet sich für jedes Teilintervall i als reziproker Wert der Anzahl der Messdatenpunkte gemäß Gleichung 3.16.

$$\text{Gewichtungsfaktor}_i = \frac{1}{\text{Anzahl Messpunkte}_i} ; i = 1, 2, \dots, k \quad 3.16$$

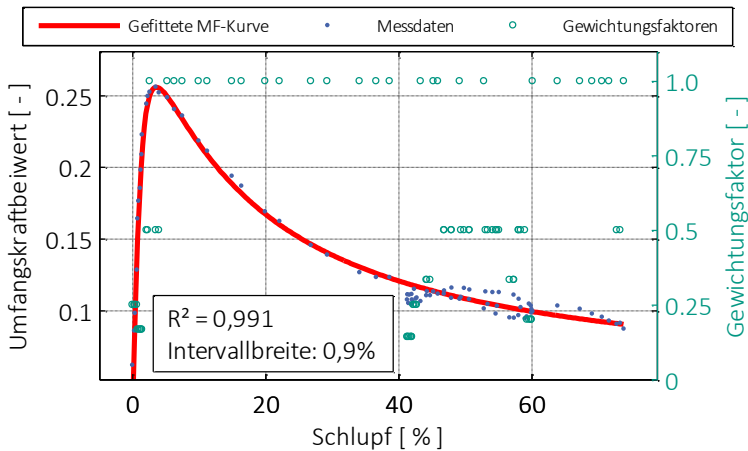


Abbildung 3.15:
Gewichtung der Datenpunkte bei Umfangskraft-Schlupf-Messungen

Beim anschließenden Fitting (über die Methode der kleinsten Fehlerquadrate) werden die Datenpunkte gemäß ihrer Gewichtung berücksichtigt. Abbildung 3.15 zeigt eine μ -Schlupf-Kurve auf Schneefahrbahn mit den dazu gehörigen Gewichtungsfaktoren. Im linearen Bereich der Kurve und

zwischen 40% und 60% Schlupf werden einige Datenpunkte weniger gewichtet, um die höhere Anzahl an Messpunkten in diesem Bereich auszugleichen. Durch diese Maßnahme wird besonders bei Datensätzen, in denen Messpunkte ungleich über den Schlupf verteilt sind, die Fittingqualität erheblich gesteigert.

3.6.2 Magic Formula-Fitting

Um eine statistische Analyse durchführen zu können, müssen zunächst Kennwerte aus den einzelnen Messungen extrahiert werden. Für die Ermittlung dieser Kennwerte hat sich gezeigt, dass sich eine Analyse von Messdaten auf Basis von diskreten Werten im Zeitbereich, besonders auf der Schneefahrbahn, als sehr fehleranfällig erweist. Reibwertschwankungen durch Fahrbahnverschleiß und Temperaturänderungen während der Messung wirken sich aufgrund des niedrigen Reibwertniveaus besonders stark auf die Messdaten aus. Da bei der hohen Anzahl an durchgeführten Messungen nur eine automatisierte Auswertung in Frage kommt, muss ein robustes Auswerteverfahren die Konsistenz und Validität der Ergebnisse garantieren.

Um dies zu gewährleisten, werden auf alle aufgezeichneten Rohdaten aus den Messungen Magic Formula-Kurven angepasst. Durch den robusten Fittingprozess wird der Einfluss von Ausreißern minimiert und durch die Beschreibung der Kurven als mathematische Funktion wird die anschließende Analyse der Daten erheblich verbessert.

Für das Fitting wird die Magic Formula (Gleichung 3.17) in ihrer Grundform mit sechs Parametern verwendet, wie sie PACEJKA in [Pac12] beschreibt.

Die in Gleichung 3.17 dargestellte Magic Formula in ihrer Grundform ermöglicht es, sämtliche Messkurven darzustellen, wie sie bei Reifenmessungen vorkommen. Durch Anpassung der Parameter lassen sich damit

Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kurven, Umfangskraft-Schlupf-Kurven, Rückstellmoment-Schräglaufwinkel-Kurven und auch Sturzmoment-Schräglaufwinkel-Kurven darstellen.

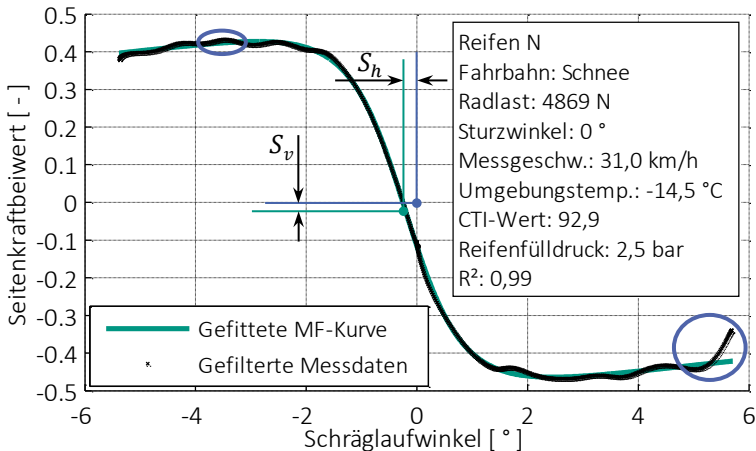
$$y(x) = D \sin\{C \arctan[Bx - E(Bx - \arctan Bx)]\} \quad 3.17$$

$$Y(X) = y(x) + S_v \quad 3.18$$

$$x = X + S_h \quad 3.19$$

Für die weitere Analyse der Messdaten werden MF-Kurven an alle ermittelten Messkurven angepasst. Die Vorteile dieses Vorgehens werden in Abbildung 3.16 deutlich. Durch Reibwertschwankungen sind das Seitenkraftmaximum und der zugehörige Schräglaufwinkel aus den Rohdaten nur schwer korrekt zu ermitteln. Bei herkömmlicher Analyse würde in diesem Beispiel das Maximum insgesamt einen höheren Wert bei einem (betragsmäßig) zu großen Schräglaufwinkel erreichen. Durch das Fitting der MF-Kurve an die Messdaten wird eine glatte Kurve erzeugt, die in der folgenden Analyse problemlos analytisch ausgewertet werden kann. Ausreißer, wie sie in Abbildung 3.16 beispielsweise bei großem Schräglaufwinkel zu sehen sind, werden durch den robusten Fittingprozess ebenfalls eliminiert.

Ein Vorteil des Fittings ist, dass Maxima und Minima der Messkurven exakt abgebildet werden können. Bei herkömmlichen Analysemethoden, bei denen die Kurven mittels Filterung und gleitender Mittelung stark geglättet werden, kommt es in jedem Fall zu einer Reduzierung des Minimal- und Maximalwerts. Bei Umfangskraft-Schlupf-Messungen mit einem sehr spitzen Umfangskraft-Maximum tritt bei herkömmlicher Auswertung zudem eine Verrundung der Messkurve um das Maximum ein. Die Kurvencharakteristik würde dadurch erheblich verändert werden.

**Abbildung 3.16:**

Magic Formula-Fitting einer Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Messung (nach [Was15])

Bei der Auswertung von Umfangskraft-Schlupf-Messungen wird ein weiterer Vorteil des Magic Formula-Fitting deutlich. Bei diesen Messungen steht, wie zuvor beschrieben, für die Auswertung nur eine beschränkte und über dem Schlupf ungleich verteilte Anzahl an Messdatenpunkten zur Verfügung. Eine herkömmliche Auswertung der Daten auf Basis diskreter Messdaten wäre aufgrund der wenigen Datenpunkte sehr fehlerbehaftet. Eine exakte Bestimmung der Schlupfsteifigkeit wäre automatisiert nur schwer durchführbar, da im linearen Bereich der Kurven nur wenige Datenpunkte verfügbar sind. Durch die mathematische Beschreibung der Kurven anhand der Magic Formula ist dagegen die exakte analytische Ermittlung von Umfangskraftmaxima und der Schlupfsteifigkeit möglich. Abbildung 3.17 zeigt eine mittels MF angepasste Umfangskraft-Schlupf-Messung auf Eis.

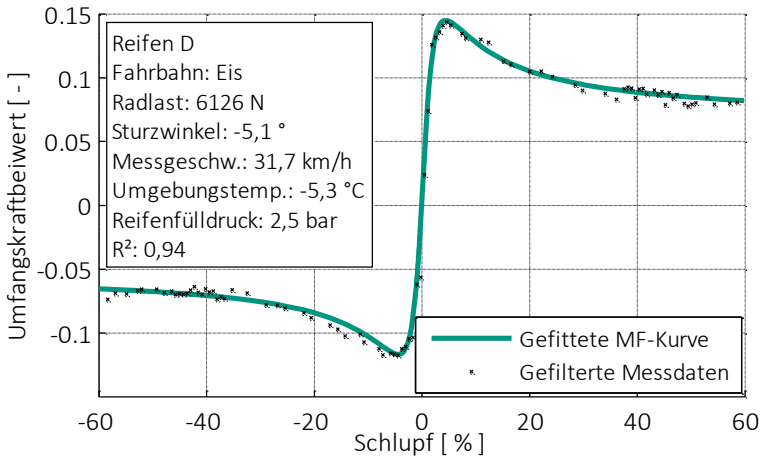


Abbildung 3.17:
Magic Formula-Fitting einer Umfangskraft-Schlupf-Messung

Um beim Fittingprozess korrekte Ergebnisse zu erhalten, ist es notwendig, dass die Parameter nur innerhalb festgelegter Grenzen angepasst werden können. Um diese ermitteln zu können, wird die Magic Formula-Gleichung im Folgenden näher betrachtet.

Parameter B , der maßgeblich die Steigung im Ursprung beeinflusst und für die Streckung der Kurve in Abszissenrichtung verantwortlich ist, wird in zwei zulässige Intervalle aufgeteilt. Ausgehend vom TYDEX-H-Achsensystem (vgl. Abschnitt 3.3.2) ergibt sich für Seitenkraft- und Sturzmomentmessungen eine negative Steigung, für Umfangskraft- und Rückstellmomentmessungen dagegen eine positive Steigung im Ursprung des Graphen. Die Intervalle für den Parameter B ergeben sich analog dazu zu $B < 0$ für Messungen, bei denen im Graphen die Steigung im Ursprung negativ ist, zu $B > 0$ für Messungen mit positiver Steigung.

Um das zulässige Intervall für den Parameter C , der für die Form der Kurve entscheidend ist, bestimmen zu können, wird in Gleichung 3.17 zunächst betrachtet, an welche Asymptote sich die Kurve annähert. Geht x gegen

unendlich, nimmt die äußere Arkustangensfunktion den Wert $\frac{\pi}{2}$ an. Es ergibt sich folgende Gleichung 3.20 für den Asymptotenwert y_a :

$$y_a = D \cdot \sin\left(C \cdot \frac{\pi}{2}\right) \quad 3.20$$

Wird diese Formel nach Parameter C aufgelöst erhält man zwei Lösungen, wie in Gleichung 3.21 dargestellt.

$$C_{1,2} = 1 \pm \left(1 - \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{y_a}{D}\right) \quad 3.21$$

Wird berücksichtigt, dass die Arkussinusfunktion nur Werte zwischen $-\frac{\pi}{2}$ und $\frac{\pi}{2}$ annehmen kann, beschränkt sich der Bereich gültiger Werte von C auf das Intervall $[-1; 3]$. Damit der Spitzenwertfaktor D korrekt dem Maximum der Kurve (im Grenzfall die Asymptote) entsprechen kann, muss zudem gelten: $C \geq 1$ (vgl. Gleichung 3.20). Durch Bilden der Schnittmenge schränkt sich der gültige Wertebereich von C demnach auf das Intervall $[1; 3]$ ein.

Der Spitzenwertfaktor D ist ausschließlich vom maximalen Reibwert bzw. dem max. Moment bei den Rückstell- und Sturzmomentenkurven abhängig. Da D grundsätzlich als Absolutwert betrachtet wird, kann dieser Faktor auf $D > 0$ eingeschränkt werden.

Der als Krümmungsfaktor bezeichnete Parameter E erzeugt für Werte $E > 1$ unrealistische Kurven [Pac12]. Werte von $E < -1$ erzeugen in der MF-Kurve im Bereich zwischen Ursprung und Maximum eine unplausible Krümmung in die Gegenrichtung, wie Abbildung 3.18 zeigt. Der Wertebereich von E wird demnach auf $[-1; 1]$ beschränkt.

Tabelle 3.5 zeigt zusammengefasst die gültigen Intervalle der einzelnen Parameter für das MF-Fitting der Messdaten.

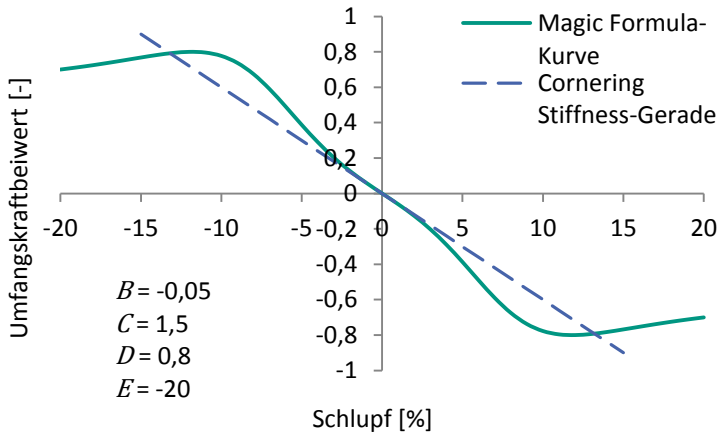


Abbildung 3.18:

Einfluss des MF-Parameters E : Werte $E < -1$ führen zu unrealistischer Krümmung zwischen Ursprung und Maximum

Tabelle 3.5:

Magic Formula-Parameter und ihre zulässigen Intervalle

Parameter	Beschreibung	Zulässiger Bereich
B	Steifigkeitsfaktor	Steigung $< 0 \Rightarrow B < 0$ Steigung $> 0 \Rightarrow B > 0$
C	Formfaktor	$1 \leq C \leq 3$
D	Spitzenwertfaktor	$D > 0$
E	Krümmungsfaktor	$-1 \leq E \leq 1$
S_h^6	Horizontale Verschiebung	$]-\infty, +\infty[$
S_v^7	Vertikale Verschiebung	$]-\infty, +\infty[$

⁶ Bei Antriebs- und Bremschlupfmessungen: $S_h = 0$

⁷ Bei Antriebs- und Bremschlupfmessungen: $S_v = 0$

3.6.3 Analyse der Seitenkräfte bei kombinierten Umfangskraft-Schlupf-Messungen

Für die statistische Analyse ist es notwendig, auch die Seitenkräfte bei kombinierten Umfangskraft-Schlupf-Messungen auszuwerten. Da Seitenkraft-Schlupf-Kurven nicht mittels der Magic Formula (in ihrer Grundform) darstellbar sind, wurde ein anderer Ansatz gewählt, um die Kurvenform mathematisch darstellen zu können. Ausgangsbasis hierfür ist die Kosinusversion der Magic Formula (Gleichung 3.22), die PACEJKA in [Pac12] beschreibt.

$$G(x) = D_{cos} \cdot \cos[C_{cos} \cdot \arctan(B_{cos}x)] \quad 3.22$$

Diese ähnelt in ihrer Kurvenform (ähnlich den in Abbildung 3.19 dargestellten Kennlinien) stark den gemessenen Kennlinien und eignet sich deshalb für ein Fitting. Der Koeffizient D_{cos} beschreibt dabei den Spitzenwert der Funktion, Faktor C_{cos} beeinflusst die Höhe der Asymptote, an die sich die Kurve annähert. Als Faktor x wird je nach Verwendung der Schlupf s (bei Umfangskraft-Schlupf-Kurven) oder der Schräglaufwinkel α (bei Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kurven) eingesetzt. Der Koeffizient B_{cos} beeinflusst maßgeblich die Kurvenform. Die Höhe der Asymptote G_α wird nach Gleichung 3.23 bestimmt.

$$G_\alpha = D \cdot \cos\left[C_{cos} \cdot \frac{\pi}{2}\right] \quad 3.23$$

Die Kosinusform der Magic Formula (Gleichung 3.22) wird für gewöhnlich als Gewichtungsfunktion, die mit reinen Schlupf- oder Seitenkraftmessungen multipliziert wird, eingesetzt. Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Gleichung allerdings direkt auf Messdaten angepasst werden soll, muss die Formel geringfügig angepasst werden. Ausgehend von der allgemeinen Kosinusversion der MF wurde empirisch Gleichung 3.24 entwickelt, die sich bei dem durchgeführten Fittingprozess als zielführend herausgestellt hat.

$$F_{y\alpha} = A_y + D_y \cdot \cos[\arctan(B_y x)] \quad 3.24$$

Der Unterschied zur in Gleichung 3.22 dargestellten Kosinusversion der Magic Formula ist eine Fixierung des Faktors C_{\cos} auf den Wert 1 und das Hinzufügen eines Offsetfaktors A_y . Mit diesem Ansatz wird ein robusteres Fitting ermöglicht, da der Faktor C_{\cos} innerhalb der Kosinusfunktion nicht mit angepasst werden muss. Zudem ist so die Höhe der Asymptote nicht mehr als Kosinusfunktion gegeben, sondern kann direkt als Faktor A_y abgelesen werden. Das Maximum der Kurve berechnet sich als die Summe der Faktoren A_y und D_y (Gleichung 3.25). Den Abfall der Kurve bestimmt maßgeblich Faktor B_y . Abbildung 3.19 zeigt beispielhaft die Bedeutung und Haupteinflüsse der einzelnen Faktoren.

$$F_{y\alpha, \max} = A_y + D_y \quad 3.25$$

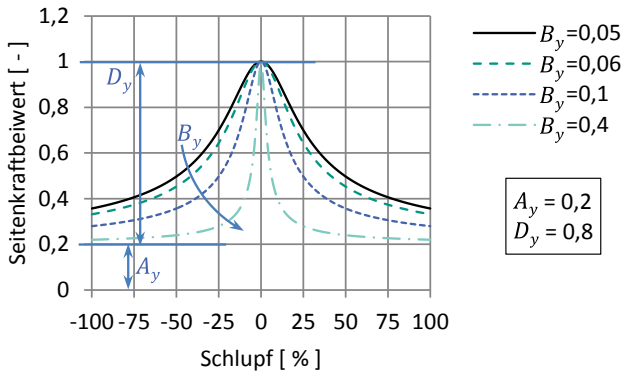


Abbildung 3.19:

Bedeutung der Faktoren in Gleichung 3.24 bei kombinierten Umfangskraft-Schlupf-Messungen (exemplarisch)

Je nach Vorzeichen des Schräglaufwinkels und Schlupfrichtung verlaufen die Seitenkraft-Schlupf-Kurven in unterschiedlichen Quadranten. In

Abbildung 3.20 sind exemplarisch die Lagen der Kurven in den jeweiligen Quadranten dargestellt, wie sie im TYDEX-W-KOS (vgl. Abschnitt 3.3.2) liegen.

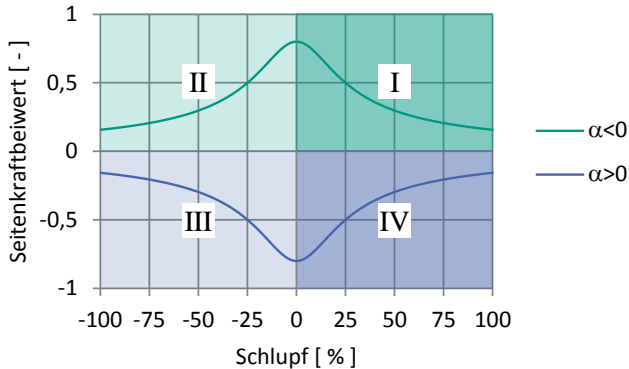


Abbildung 3.20:
Unterteilung des Koordinatensystems in Quadranten

Um den automatisierten Fittingprozess zu vereinfachen werden alle Bremsschlupfmessungen entlang der Ordinate gespiegelt. Messkurven, die in Quadrant II und III liegen, werden somit in die Quadranten I und IV gespiegelt. Somit müssen für den Fittingprozess statt vier nur noch zwei Fälle unterschieden werden: Messungen mit positivem Schräglaufwinkel und Messungen mit negativem Schräglaufwinkel. Für jeden dieser Fälle werden die Intervallgrenzen der zu fittenden Parameter separat festgelegt. Da so das Fitting nicht im gesamten Parameterraum erfolgt, ist auf diese Weise ein robusteres Fitting möglich.

Bei jeder kombinierten $F_x(s)$ -Messung werden vier unabhängige Fittings durchgeführt. Es werden zwei Fittings für die Messungen mit positivem Schräglaufwinkel (Antreiben und Bremsen) und zwei Fittings für die Messungen mit negativem Schräglaufwinkel (Antreiben und Bremsen) durchgeführt. Die für das Fitting verwendeten Parameterintervalle sind in

Tabelle 3.6 aufgelistet. Abbildung 3.21 zeigt exemplarisch die auf die Messdaten angepassten Kurven für die vier beschriebenen Fälle.

Tabelle 3.6:

Parametergrenzenintervalle für das Fitting der Seitenkräfte bei kombinierten Messungen

	$\alpha < 0$	$\alpha > 0$
A_y	$]-\infty; \infty[$	$]-\infty; \infty[$
D_y	$]0; \infty[$	$]-\infty; 0]$
B_y	$]-\infty; 0]$	$]-\infty; 0]$

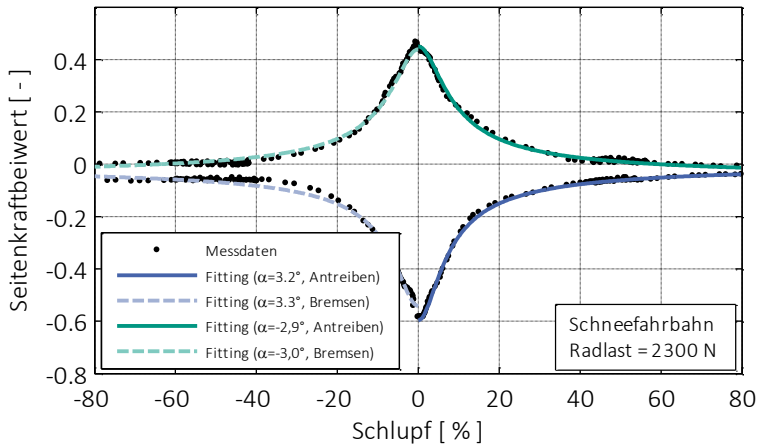


Abbildung 3.21:

Exemplarisches Fitting der Seitenkräfte bei kombinierten Umfangskraft-Schlupf-Messungen

Bei den kombinierten Umfangskraft-Schlupf-Messungen werden unabhängig voneinander Umfangskraftbeiwerte und die Seitenkraftbeiwerte angepasst. Für jede der beiden Richtungen stehen demnach mathematische Funktionen für deren Auswertung zur Verfügung. Um dieses Vorgehen in einem weiteren Schritt zu verifizieren, eignet sich die Darstellung der resultierenden Kräfte bzw. deren Reibwerte in einem Seitenkraft-Umfangskraft-Diagramm. Abbildung 3.22 zeigt die sehr gute Übereinstimmung des

aus angepassten Einzelkurven ermittelten Zusammenhangs zwischen Seitenkraft- und Umfangskraftbeiwert und den Ergebnissen der kombinierten Umfangskraft-Schlupf-Messung.

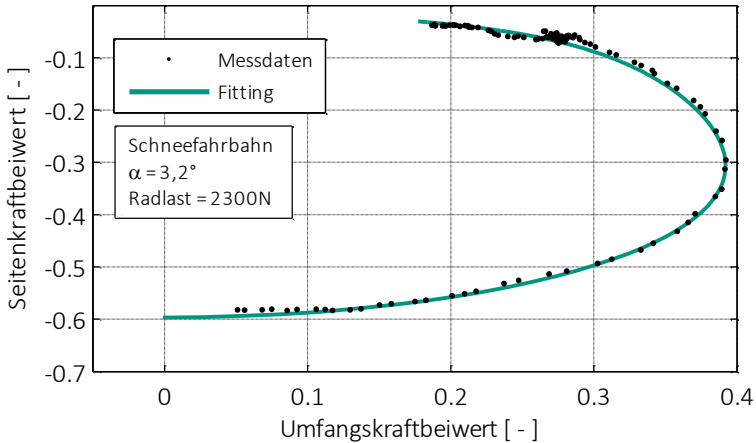


Abbildung 3.22:

Vergleich des Zusammenhangs von angepassten Seitenkraft- und Umfangskraftbeiwerten und gemessenen bei kombinierter Umfangskraft-Schlupf-Messung

3.6.4 Qualität der gefitteten Daten

Die Qualität der angepassten Daten wird bezüglich des Bestimmtheitsmaßes R^2 beurteilt (Gleichung 3.26). In [Was15] wird gezeigt, dass auch auf Schnee-, Eis- und nasser Fahrbahn ein MF-Fitting ohne Einschränkungen anwendbar ist. Wie in Abbildung 3.23 dargestellt, wird bei dem Fittingprozess bei 93% aller Messungen mindestens ein Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,8$ erreicht.

Es wurden mehr als 3500 Kennlinien analysiert, welche aus den (reinen und kombinierten) Seiten- und Umfangskraft-Messungen, sowie Sturz- und Rückstellmoment-Messungen gewonnen wurden. Die Kennlinien wurden anhand der in Tabelle 3.1 erläuterten Versuchstypen und in

Abbildung 3.11 gezeigten Messprozeduren im Rahmen des Forschungsprojekts ermittelt.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \frac{\text{durch MF-Modell erklärte Variation}}{\text{Gesamtvariation}} \quad 3.26$$

mit n : Anzahl Messpunkte, y : Messwert, \bar{y} : Mittelwert der Messwerte,
 \hat{y} : mit MF ermittelte Werte

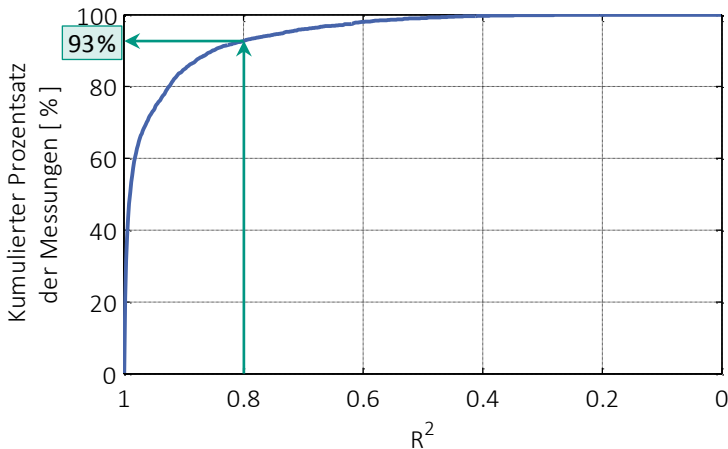


Abbildung 3.23:

Kumulierte Häufigkeitsverteilung der Fittingqualität (nach [Was15])

Eine eingehendere Untersuchung von Messungen, bei welchen niedrige R^2 auftraten, zeigte, dass es sich dabei um fehlerbehaftete Messungen aufgrund von Ausreißern (z.B. fehlerhafte Fahrbahnkonditionierung oder Sensorkalibrierung) handelte. Im Folgenden wurden deshalb ausschließlich Messungen in die weitere Analyse einbezogen, welche ein $R^2 > 0,8$ aufweisen.

3.7 Ermittlung spezifischer Kenngrößen

Die Messdaten liegen nach dem MF-Fitting in einer mathematischen und somit für die Analyse idealen Form vor. Das Ziel ist anschließend die Ermittlung von eindeutigen Kennwerten, welche die Messkurve in ihrer Form beschreiben und sich so für eine statistische Auswertung eignen.

3.7.1 Analytische Ermittlung von spezifischen Reifenparametern aus Magic Formula-Kennlinien

Die Verwendung aller, während des Fittingprozesses ermittelten MF-Parameter ist nicht zielführend, da diese nicht linear unabhängig voneinander sind und so keine statistische Analyse zulassen. Es wurden deshalb neue Kennwerte definiert, welche die Kurvenform der MF-Kurven so beschreiben, dass sie für eine statistische Untersuchung heran gezogen werden können.

Von den während des Fittings ermittelten Parametern werden allerdings die Parameter S_h und S_v für die weitere Auswertung berücksichtigt. Diese beschreiben die horizontale und vertikale Verschiebung der symmetrisch gefitteten Kurve gegenüber dem Ursprung (Abbildung 3.16 illustriert die beiden Parameter). **Die gesamte weitere Auswertung erfolgt an der im Ursprung punktsymmetrischen MF-Kurve.**

Die Analyse der Umfangskraft- und Seitenkraftkurven erfolgt **ausschließlich auf Basis von Reibungskoeffizienten**. Die gemessenen Kräfte in Längs- und Querrichtung werden hierzu durch die Radlast dividiert. Auf diese Weise werden Einflüsse von Radlaständerungen während der Messprozeduren minimiert und eine Analyse des Radlasteinflusses auf die Messergebnisse vereinfacht.

Um die Messkurven analysieren zu können, werden charakteristische (Stütz-)Punkte ermittelt. Die Punkte werden in dieser Arbeit mit

Punkt Pkt_{\blacksquare} bezeichnet. Anhand jener Punkte, den Abständen (geometrisch betrachtet) zwischen diesen (Bezeichnet mit Δ_{\blacksquare}) und der Krümmung der Kurve (Bezeichnet mit Kr_{\blacksquare}) an bestimmten Punkten kann die Kurvengeometrie eindeutig beschrieben werden. Im Folgenden wird die Beschreibung der charakteristischen Stützpunkte sowie die Ermittlung der Kenngrößen näher erläutert. Abbildung 3.24 zeigt die nachfolgend erläuterten Kenngrößen.

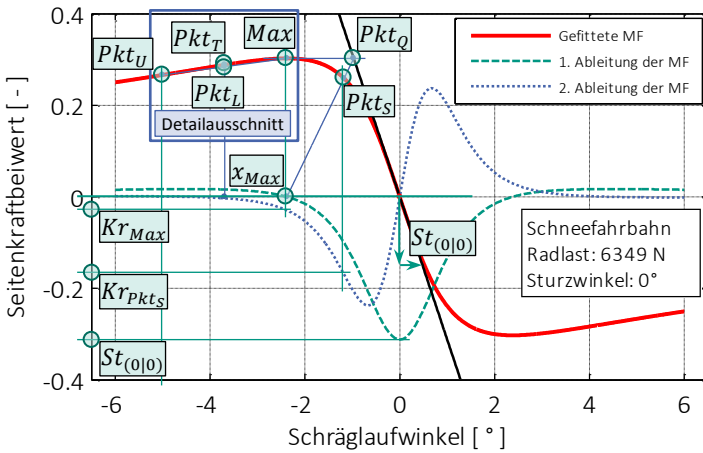


Abbildung 3.24:
Analyisierte Kenngrößen am Beispiel einer Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Messung

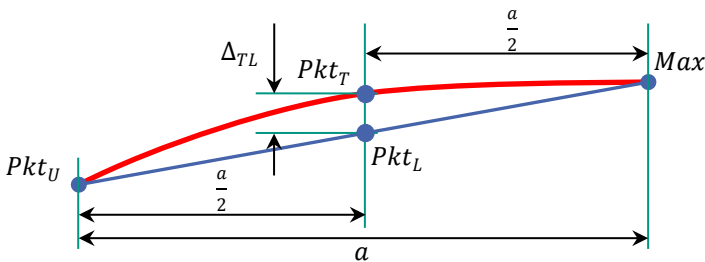


Abbildung 3.25:
Detailausschnitt aus Abbildung 3.24, Definition der Kenngröße Δ_{TL}

Aus den angepassten MF-Kurven werden die charakteristischen Hauptkenngrößen Kurvenmaximum (Max), der dazu korrespondierende Schräglaufwinkel, bzw. Schlupf (x_{Max}), sowie die Steigung im Ursprung ($St_{(0|0)}$) ermittelt. Max und x_{Max} können dabei direkt aus der MF ermittelt werden, die Steigung im Ursprung wird mittels der 1. Ableitung der Magic Formula berechnet.

Um den Abfall der Kurve nach dem Maximum zu beschreiben, wird bei Umfangskraft-Schlupf-Kurven der Kurvenwert bei 50% Schlupf, bei Seitenkraft- bzw. Sturzmoment-Schräglaufwinkel-Kurven bei -5° Schräglaufwinkel, ermittelt. Bei Rückstellmoment-Schräglaufwinkel-Kurven wird der Kurvenwert bei 5° Schräglaufwinkel berechnet. Der so ermittelte Punkt wird als Punkt Pkt_U bezeichnet.

Um den Kurvenverlauf nach dem Maximum besser beschreiben zu können, wurde eine weitere Kenngröße Δ_{TL} , (geometrisch betrachtet) als Abstand der Punkte Pkt_T und Pkt_L definiert. Punkt Pkt_L liegt auf der Mitte der Verbindungsgeraden zwischen Punkt Pkt_U und Max . Der Schnittpunkt der senkrechten Geraden durch Punkt Pkt_L mit der MF wird als Punkt Pkt_T bezeichnet. Dabei wird das Vorzeichen von Δ_{TL} wie folgt definiert: $|Pkt_L| > |Pkt_T| \Rightarrow \Delta_{TL} > 0$.

Ein weiteres wesentliches Merkmal der Kurvengeometrie ist der Kurvenverlauf am Maximum. Um diesen genau beschreiben zu können, wird als Hilfspunkt der Punkt Pkt_Q definiert. Er wird als Schnittpunkt der horizontalen Tangente am Maximum und der Steigungsgeraden durch den Ursprung konstruiert. Ausgehend von diesem Punkt wird der Punkt Pkt_S als Schnittpunkt der Gerade $\overline{Pkt_Q x_{Max}}$ mit der Magic Formula-Kurve definiert. Als weitere Merkmale werden (geometrisch betrachtet) der Abstand zwischen den Punkten Pkt_Q und Max (Δ_{QMax}), sowie der Abstand zwischen Punkt Pkt_Q und Punkt Pkt_S (Δ_{QS}) bestimmt. Diese Kenngrößen weisen stets Werte größer null auf. An den Punkten Max und Pkt_S werden

zudem anhand der 2. Ableitung der Magic Formula die Krümmung Kr_{Max} und Kr_{Pkt_S} berechnet.

Eine Übersicht der charakteristischen Punkte ist in Tabelle 3.7 aufgelistet und in Abbildung 3.24 dargestellt.

Tabelle 3.7:

Kenngrößen und charakteristische Punkte der Magic Formula-Analyse

Bezeichnung	Erklärung
S_h	Horizontale Verschiebung der Magic Formula-Kurve
S_v	Vertikale Verschiebung der Magic Formula-Kurve
$St_{(0 0)}$	Steigung der Kurve im Ursprung (Schräglaufsteifigkeit, Schlupfsteifigkeit)
Max	Maximaler Reibbeiwert bzw. maximales Moment
x_{Max}	Zum max. Reibbeiwert bzw. Moment korrespondierender Schräglaufwinkel bzw. Schlupfwert
Pkt_Q	Schnittpunkt aus der Cornering Stiffness-Geraden und der horizontalen Asymptote an Max
Pkt_S	Schnittpunkt zwischen Magic Formula-Kurve und Verbindungsgerade zwischen Pkt_Q und x_{Max}
Pkt_U	Wert der Magic Formula-Kurve bei 50% Schlupf bzw. bei -5° Schräglaufwinkel
Pkt_L	Punkt, der die Verbindungsgerade zwischen Max und Pkt_U halbiert
Pkt_T	Schnittpunkt zwischen der senkrechten Gerade durch Pkt_L und Magic Formula-Kurve
Kr_{Max}	Krümmung der Magic Formula-Kurve in Max
Kr_{Pkt_S}	Krümmung der Magic Formula-Kurve in Pkt_S
Δ_{QS}	Abstand zwischen Pkt_Q und Pkt_S (geom. betrachtet)
Δ_{QMax}	Abstand zwischen Pkt_Q und Pkt_{Max} (geom. betrachtet)
Δ_{TL}	Abstand zwischen Pkt_T und Pkt_L (geom. betrachtet)

Die Analyse erfolgt für alle angepassten Magic Formula-Kurven automatisiert und auf dieselbe Art und Weise. Unterschiede bestehen lediglich in der Auswertung von Punkt Pkt_U . Damit die Auswertung der Kurven immer

auf der Seite des Maximums durchgeführt wird, liegt die Auswertung von Punkt Pkt_{ij} bei Seitenkraft- und Sturzmomentenkurven bei $\alpha = -5^\circ$ Schräglaufwinkel, bei Rückstellmomentenkurven bei $\alpha = 5^\circ$. Umfangskraftkurven werden bei einem Schlupf von $s = 50\%$ ausgewertet. Aufgrund der Punktsymmetrie der Magic Formula-Kurven ist es ausreichend, die Auswertung lediglich mit dem positiven Ast der Kurve durchzuführen. Antreiben und Bremsen werden jeweils separat betrachtet und gehen unterschiedlich in die Faktoren der statistischen Auswertung mit ein, die Auswertung der Kurven erfolgt jedoch identisch.

Die Ermittlung der gezeigten Kenngrößen erfolgt für Sturzmomenten- und Rückstellmomentenmessungen analog. Bei den Seitenkraftmessungen der kombinierten Manöver ist keine separate Ermittlung von weiteren Kenngrößen erforderlich. Die in Abschnitt 3.6.3 erläuterten Kennwerte, die beim Fitting ermittelt werden, können direkt für die statistische Auswertung verwendet werden, da die hier ermittelten Parameter linear unabhängig voneinander sind.

3.7.2 Auswertung von Reifenprofilkenngrößen aus Reifenprofilabdrücken

Wie vorab in Abschnitt 2.1 erläutert, hängt das Reifenverhalten neben den Eigenschaften der Fahrbahn vor allem von den Eigenschaften des zweiten Reibpartners – dem Reifen – ab. Der Einfluss des Reifens muss deshalb zwingend in der statistischen Auswertung mit berücksichtigt werden. Hierfür müssen passende Kenngrößen ermittelt werden.

Für die Kraftübertragung des Reifens spielt neben der Gummizusammensetzung die Profilgestaltung eine besonders große Rolle. Vor allem auf winterlichen Fahrbahnoberflächen wird der Profileinfluss deutlich. Reifen mit *M+S*-Kennzeichnung besitzen hier durch ihre Profilgestaltung erheblich bessere Fahreigenschaften als Sommerreifen. Beispielsweise ist durch

die stärkere Lamellierung des Laufstreifens bei Winterreifen auf Schneefahrbahn eine bessere Verzahnung des Reifens möglich.

Um den Einfluss des Profils analysieren zu können, werden Reifenfootprints analysiert und daraus Kennwerte extrahiert. Diese Kennwerte werden ebenso wie die Daten der Magic Formula-Analysen bei der statistischen Auswertung mit berücksichtigt.

Erzeugung von Reifenprofilabdrücken

Die Erzeugung von Reifenprofilabdrücken, die auch als Footprints bezeichnet werden, wird in der Praxis meist auf Reifenprüfständen durchgeführt. Der Reifen wird dabei auf den gewünschten Fülldruck aufgepumpt und anschließend mit der vorgegebenen Radlast auf eine ebene Oberfläche gedrückt. Der zuvor mit Farbe bestrichene Reifen erzeugt auf dem untergelegten Blatt Papier so den typischen Reifenprofilabdruck.

Eine Auswertung dieser Footprints ist umständlich, da diese vor der Analyse zuerst digitalisiert werden müssen. Zudem ist es notwendig, dass für jede Radlast und jeden Fülldruck ein separater Footprint erzeugt wird. Um umfangreichere Untersuchungen des Einflusses des Reifenprofils durchzuführen, ist diese Prozedur zu aufwändig. Es wurde deshalb eine neue Methode entwickelt, Footprints auf einfachere Art und Weise erzeugen zu können.

Auf Grundlage der Arbeiten von GANDER [Gan11], XU [Xu12] und BLEIMUND [Ble11] wurde der hier vorgestellte Ansatz einer grafischen Erzeugung und Auswertung von Footprints entwickelt. Die auf diese Art und Weise erzeugten Reifenprofilabdrücke werden im Folgenden als grafische Footprints bezeichnet.

Ausgangsbasis für die Erzeugung grafischer Footprints bildet ein speziell angefertigtes, digitales Reifenfoto (Abbildung 3.26). Vor der Aufnahme

wird der Reifen auf den $ETRTO^8$ -Nenndruck aufgepumpt. Anschließend wird die zu analysierende Reifenlauffläche mit Tafelkreide eingerieben. Lose Kreiderückstände in Profiltrillen und zwischen Lamellen werden anschließend ausgeblasen. Der Einsatz von Kreide schafft den notwendigen Kontrast zum Profilgrund, um anschließend qualitativ hochwertige Analyseergebnisse zu gewährleisten.

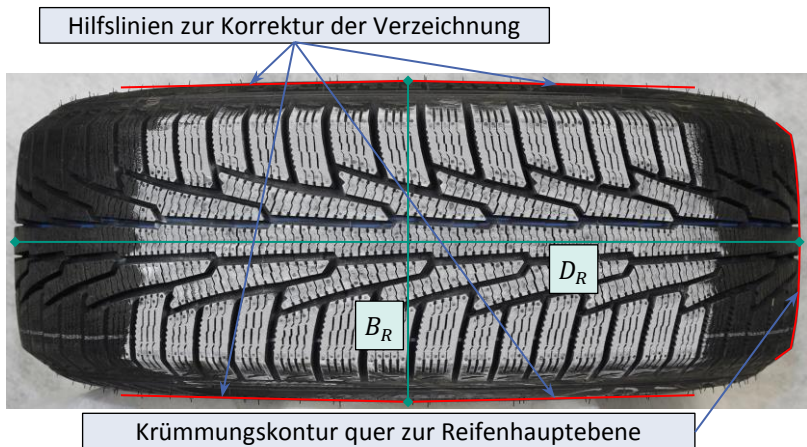


Abbildung 3.26:

Foto eines mit Kreide vorbereiteten Reifens mit Parametern zur Berechnung der abgewickelten Reifenlauffläche

Über geometrische Transformation wird anhand des Reifenfotos eine abgewickelte Fläche des Reifenprofils erzeugt. Zur Identifikation der geometrischen Größen ist es notwendig, in der im Rahmen dieser Arbeit speziell dafür programmierten Auswertesoftware im Reifenfoto sowohl den Reifendurchmesser als auch die Reifenkrümmung in Querrichtung einzzeichnen. Mittels vier einzuziehenden Hilfsgeraden wird zudem die optische Verzerrung des Bilds durch die Kameraoptik (Verzeichnung) herausgerechnet. Über die Krümmung der Lauffläche in Längs- und Querrichtung

⁸ *European Tyre and Rim Technical Organisation*

wird ein topografisches Relief der Reifenlauffläche erstellt. Je nach vorgegebenen Fülldruck und Radlast lassen sich anschließend, ausgehend von der abgewickelten Fläche und der Reifentopografie, auf einfache Weise die Form und Größe des Footprints ermitteln. Abbildung 3.27 zeigt die anhand des Reifenfotos aus Abbildung 3.26 generierte Reifentopografie mit den rot markierten Umrissen der sich ergebenden Footprintfläche für verschiedene Radlasten.

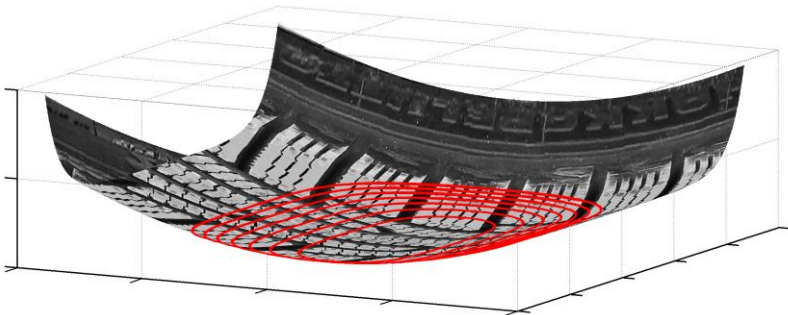


Abbildung 3.27:

Aus 2D-Foto generiertes 3D-Modell des Reifenlaufstreifens (Reifentopografie)

Der Reifen kann wegen seines Aufbaus nicht als ideale Luftfeder betrachtet werden. Die Radlast resultiert bei Einfederung des Reifens größtenteils durch die Luftfeder, zusätzlich trägt aber auch die Karkassen- bzw. Gürtelsteifigkeit zur Radlast bei. Besonders bei Betrachtung von Reifen mit Notlaufeigenschaften ist der Anteil der Reifensteifigkeiten nicht gänzlich vernachlässigbar. Die Radlast F_z ergibt sich als Parallelschaltung der beiden Kräfte aus Luftfeder F_L und Reifenfeder F_R (Gleichung 3.27).

$$F_z = F_R + F_L \quad 3.27$$

Um den Anteil der Reifenfeder quantifizieren zu können wurden die statischen Vertikalsteifigkeiten von drucklosen Reifen mit herausgeschraubtem Ventil auf dem IPS gemessen. Für die Untersuchungen wurde in die

gekrümmte Trommel ein ebenes Fahrbahnstück eingelegt, um den Einfluss der Trommelkrümmung auszuschließen.

Beim Vergleich zwischen Reifen mit und ohne Notlaufeigenschaften zeigt sich ein deutlicher Unterschied in den Kennlinien. Abbildung 3.28 zeigt einen Vergleich zweier Reifen mit und ohne Notlaufeigenschaften gleicher Dimension (205/55 R16) und gleichem Lastindex (LI 91). Während der Standardreifen eine fast lineare Kennlinie zeigt, besitzt der Runflat-Reifen eine deutlich progressive Steifigkeitskennlinie.

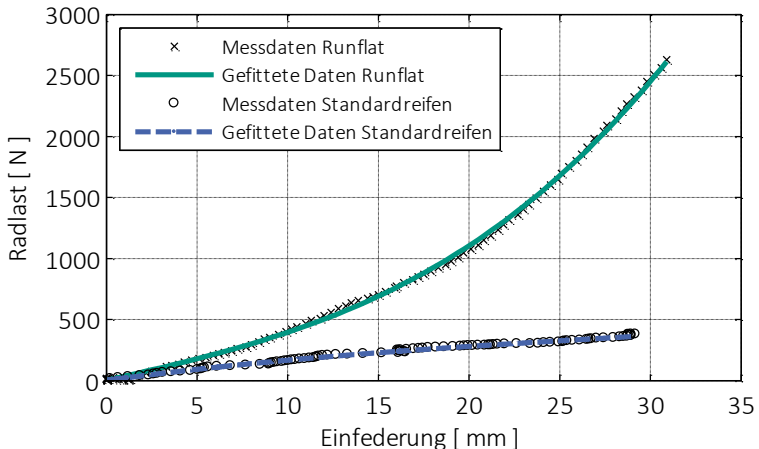


Abbildung 3.28:

Vergleich der statischen Vertikalsteifigkeitskennlinien von Reifen (205/55 R16) mit und ohne Notlaufeigenschaften (drucklos, ohne Ventil)

Für die Berechnung des Profilabdrucks kann nun mittels der ermittelten Kennlinien der exakte Radlastanteil F_R , der durch den Reifenaufbau verursacht wird, berücksichtigt werden.

Näherungsweise wird davon ausgegangen, dass sich die Luftfeder ideal verhält. Das bedeutet, dass die Flächenpressung, die aus dem Traganteil der Luftfeder resultiert, nur durch den Fülldruck p_L vorgegeben wird. Die

Footprintfläche A_{FP} muss damit proportional zum Radlastanteil der Luftfeder F_L sein (Gleichung 3.28).

$$p_L = \frac{F_L}{A_{FP}} \quad 3.28$$

Über eine iterative Berechnung wird der Anteil der Luftfeder F_L ermittelt. Schrittweise wird dabei die Einfederung erhöht. Bei jedem Iterationsschritt wird aus der Kennlinie der zur Einfederung korrespondierende Radlastanteil F_R ermittelt. Aus der zuvor erstellten Höhenkarte (Reifentopografiemodell) wird die zur Einfederung resultierende Reifenaufstandsfläche A_{FP} ermittelt. Aus dem vorgegebenen Fülldruck p_L und A_{FP} wird mittels Gleichung 3.28 der resultierende Radlastanteil der Luftfeder F_L berechnet. Die so berechneten Radlastanteile F_R und F_L werden addiert und mit der vorgegebenen Radlast verglichen. Dies wird iterativ so lange wiederholt bis die berechnete Radlast der vorgegebenen gleicht. Die Größe und Form des Footprints können so für jeden gegebenen Fülldruck und Radlast ermittelt werden.

Grafische Analyse von Reifenprofilabdrücken

Für die weitere Laufflächenanalyse wird der Footprint in ein Schwarz/Weiß-Bild umgewandelt. Ein Beispiel für einen auf diese Weise erzeugten Reifenabdruck des Versuchsreifens N zeigt Abbildung 3.29, links. Um Informationen über die Profilgeometrie zu erhalten, wird der zuvor grafisch erzeugte Profilabdruck mittels eines speziell entwickelten, im folgenden erläuterten Auswertalgorithmus analysiert.

Um für die Auswertung Pofilblöcke und Lamellen voneinander trennen zu können, werden in einem teilautomatisierten Schritt die schmalen Zwischenräume zwischen den Lamellen geschlossen. Durch diesen Schritt kann der Algorithmus zwischen Lamelle und Profilblock unterscheiden und so den Footprint korrekt analysieren. Abbildung 3.29, Mitte zeigt den Profilabdruck nach dem Schritt der Lamellenentfernung. Es werden nur noch

die Profilblöcke ohne Lamellen dargestellt. Abbildung 3.29, rechts zeigt den Reifenabdruck mit den bei der Analyse automatisiert identifizierten Lamellen und Profilblöcken.

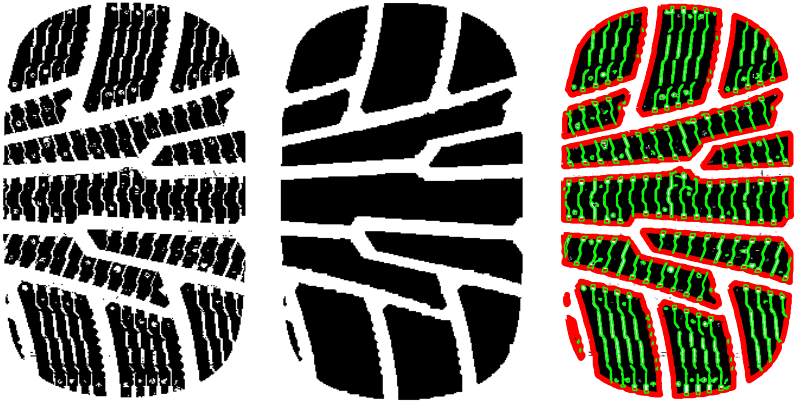


Abbildung 3.29:

Aus Reifenfoto erzeugt Reifenfootprint. Links: mit Lamellen, mitte: nach der Lamellenentfernung, rechts: identifizierte Lamellen (grün) und Profilblöcke (rot)

Reifenprofilparameter

Für die Verzahnung des Reifens mit der Schneeoberfläche ist die Profilgestaltung bezüglich der Lamellen und Profilblöcke besonders wichtig. MUNDL [Mun95] und GIEBLER [Gie11] beschreiben den Einfluss der Mischungshärte und Profilgeometrie auf die Kraftübertragung von Reifen auf Schneefahrbahnen. Als Kennwert der Verzahnungseigenschaften wird der von [Mun95] beschriebene Strukturfaktor berechnet. Entscheidend für den Kantengriff ist die effektive Kantenlänge längs und quer zum Gleitgeschwindigkeitsvektor \vec{v} des Reifenlatschs.

Um diesen Kennwert zu berechnen, wird für jeden Winkel τ zwischen der Reifenmittenebene und gedachtem Gleitgeschwindigkeitsvektor die Summe der, auf eine dem Geschwindigkeitsvektor senkrecht stehenden

Projektionsgeraden, projizierten Kantenlängen berechnet. Die aufsummierten Werte werden anschließend durch die umgrenzende Footprintfläche dividiert, um einen von der Footprintfläche unabhängigen Kennwert zu erhalten. Die berechneten Werte werden in einem Polargraphen für sämtliche Winkel τ dargestellt. Abbildung 3.30 zeigt das Prinzip der Erzeugung der Strukturfaktoren aus dem erzeugten Footprint und den entstehenden Polarplot mit den Lamellen- und Stollenstrukturfaktoren des Versuchsreifens N. Für jeden der Versuchsreifen wurden auf diese Weise die Lamellen- und Profilstollenstrukturfaktoren berechnet.

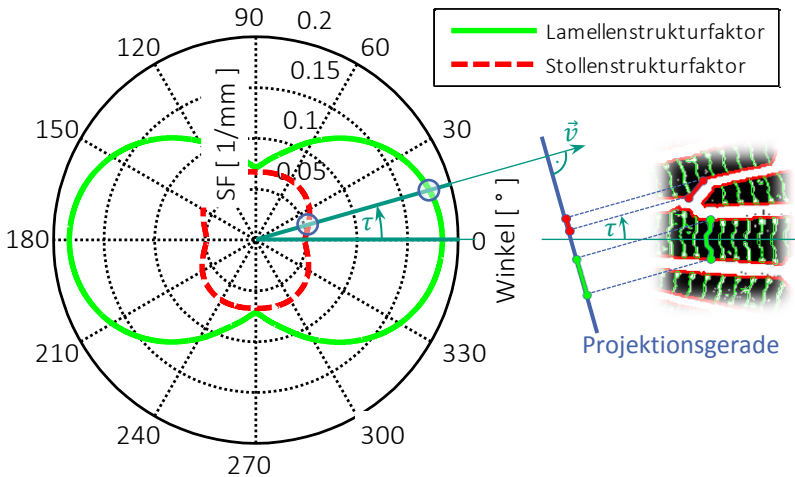


Abbildung 3.30:
Aus Abbildung 3.29, rechts ermittelte Strukturfaktoren (relative, projizierte Kantenlängen) für Versuchsreifen N

Um eine Kenngröße für die Profilsteifigkeit im Latsch zu erhalten, wird zusätzlich zu den Strukturfaktoren für die Lamellen- und Stollenkantenlänge ein Strukturfaktor für das Flächenträgheitsmoment (FTM) ermittelt. Für die Untersuchung des FTM wird vereinfachend angenommen, dass sich bei Belastung jede Lamelle unabhängig von den benachbarten verformt. Der Gesamtfootprint wird damit als Parallelschaltung von Profillamellen

(in Abbildung 3.29 und Abbildung 3.30 grün umrandete Lamellen) betrachtet.

Hierzu wird für jede detektierte Lamelle das Flächenträgheitsmoment bezüglich ihres Flächenschwerpunkts berechnet. Jede Lamelle besteht aus einer, durch einen geschlossenen Polygonzug begrenzten Fläche. Nach DANKERT [Dan13] werden anhand Gleichungen 3.29, 3.30 und 3.31 die Flächenträgheitsmomente und Flächendeviationsmomente der **Einzellamellen** berechnet. Der Index i bezeichnet die einzelnen Eckpunkte des Polygonzugs der Lamelle, x und y bezeichnen die Koordinaten der jeweiligen Eckpunkte. Die einzelnen Flächenträgheitsmomente (I_{xx} , I_{yy} und I_{xy}) werden anschließend zu einem Gesamtflächenmoment 2. Grades aufsummiert [Dan13].

$$I_{xx} = \frac{1}{12} \sum_i [y_{i+1}^2 + (y_i + y_{i+1})y_i] (y_{i+1}x_i - y_i x_{i+1}) \quad 3.29$$

$$I_{yy} = \frac{1}{12} \sum_i [x_{i+1}^2 + (x_i + x_{i+1})x_i] (y_{i+1}x_i - y_i x_{i+1}) \quad 3.30$$

$$I_{xy} = \frac{1}{12} \sum_i \left[\frac{1}{2} x_{i+1}^2 y_i^2 - \frac{1}{2} x_i^2 y_{i+1}^2 - (y_{i+1}x_i - y_i x_{i+1})(x_i y_i + x_{i+1} y_{i+1}) \right] \quad 3.31$$

Ähnlich den Strukturfaktoren für die Kantenlängen kann das Flächenträgheitsmoment für jeden beliebigen Winkel bestimmt werden. Hierzu wird das Achsensystem um den Winkel τ gedreht und für das gedrehte Bezugskordinatensystem gemäß Gleichungen 3.32, 3.33 und 3.34 die transformierten Flächenträgheitsmomente berechnet.

$$I_{xx}(\tau) = \frac{1}{2}(I_{xx} + I_{yy}) + \frac{1}{2}(I_{xx} - I_{yy}) \cos 2\tau + I_{xy} \sin 2\tau \quad 3.32$$

$$I_{yy}(\tau) = \frac{1}{2}(I_{xx} + I_{yy}) - \frac{1}{2}(I_{xx} - I_{yy}) \cos 2\tau - I_{xy} \sin 2\tau \quad 3.33$$

$$I_{xy}(\tau) = -\frac{1}{2}(I_{xx} - I_{yy}) \sin 2\tau + I_{xy} \cos 2\tau \quad 3.34$$

Trägt man über sämtliche Winkel das ermittelte Flächenträgheitsmoment $I_{yy}(\tau)$ auf, ergibt sich ein Polargraph, der bezüglich der Winkel das korrespondierende Flächenmoment 2. Grades zeigt. Abbildung 3.31 zeigt die für den Versuchsreifen N errechneten Flächenträgheitsmomente. Es ist erkennbar, dass das Profil des Reifens N durch seine ausgeprägte Querlamellierung in Längsrichtung ein wesentlich niedrigeres Flächenträgheitsmoment als in Querrichtung aufweist.

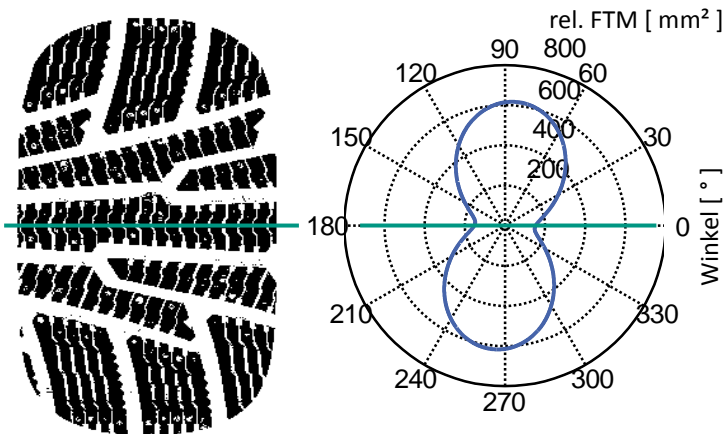


Abbildung 3.31:

Ermitteltes relatives Flächenträgheitsmoment (Summation der Einzel-FTMe der Lamellen bezogen auf die Footprintfläche) am Beispiel des Versuchsreifens N

Die Biegesteifigkeit des gesamten Footprints für jeden Winkel τ lässt sich daraus direkt über die Beziehung

$$\text{Biegesteifigkeit}(\tau) = E_R \cdot I_{yy}(\tau) \quad 3.35$$

berechnen.

Die Biegesteifigkeit wird demnach neben dem Flächenmoment 2. Grades vom Elastizitätsmodul E_R des Reifenmaterials beeinflusst. KUNZ schildert in [Kun06], wie der E-Modul aus dem Shore-A-Wert von Gummi ermittelt werden kann (Gleichung 3.36). μ bezeichnet darin die Poissonzahl, R den Radius des Teststempels. C_1 , C_2 und C_3 sind dimensionshaftete, systembedingte Konstanten und hängen von der Form des Prüfstempels ab.

$$E_R = \frac{1 - \mu^2}{2 \cdot R \cdot C_3} \cdot \frac{C_1 + C_2 \cdot Sh_A}{100 - Sh_A} \cdot (2,6 - 0,02 \cdot Sh_A) \quad 3.36$$

mit $\mu = 0,5$, $R = 0,395\text{mm}$, $C_1 = 0,549\text{N}$, $C_2 = 0,07516\text{N}$, $C_3 = 0,025$

Über diese Beziehungen lassen sich Aussagen über die Profilsteifigkeit des Footprints treffen. Diese Kennwerte werden in der statistischen Analyse mit berücksichtigt.

3.7.3 Weitere Kenngrößen zur statistischen Auswertung

Fahrbahnunabhängige Reifeneigenschaften, wie zum Beispiel Nullseitenkräfte, werden aus den *Flat-Trac*-Messungen auf *Safety-Walk* ausgewertet. Hierzu werden die auf diese Messungen angepassten Magic Formula-Modelle ausgewertet.

Neben den aus den Messdaten ermittelten fahrbahn- und reifenabhängigen Kenngrößen werden weitere Kennwerte wie beispielsweise Schnee- harte, Fahrbahn- und Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit, Profiltiefe

und der Zustand des Reifens (neu, abgefahren oder ausgeprägter Sägezahn) mit in der statistischen Auswertung betrachtet.

3.8 Erzeugung von statistischen Vorhersagefunktionen / -modellen

Der Generierung von Kennwerten und Parametern folgt die statistische Auswertung aller Daten. Ziel ist es, die Abhängigkeiten von Ein- und Ausgangsgrößen statistisch zu beschreiben und so die Erzeugung von virtuellen Reifenmodellen zu ermöglichen. Durch eine statistische Analyse ist es möglich, Vorhersagemodelle zu generieren, mit welchen im Anschluss durch Einsetzen der gewünschten Randbedingungen und Systemparameter (Einflussgrößen) virtuelle Messdatensätze und damit virtuelle Reifenmodelle generiert werden können, wie in Abbildung 3.32 schematisch dargestellt.

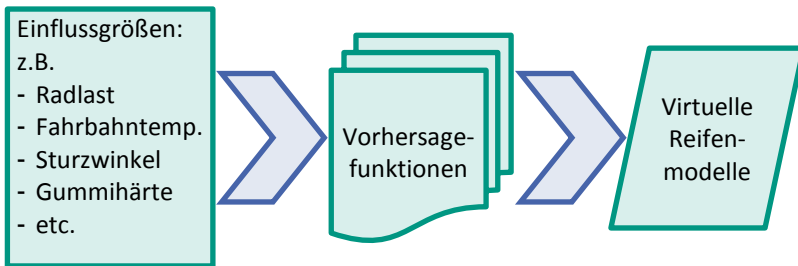


Abbildung 3.32:

Erzeugung von virtuellen Reifenmodellen über statistisch ermittelte Vorhersagefunktionen (=Datenbasis aus Messungen)

Verwendete Software

Für die Erzeugung der Versuchspläne sowie für die gesamte statistische Auswertung wird das Statistikprogramm *JMP 11 Pro* der Firma *SAS Institute Inc.* verwendet. Die Software ist ein umfassendes

Statistikprogramm, das neben einer Graphical User Interface (GUI)-basierten Steuerung auch die Steuerung über Skripte ermöglicht. Dies ermöglicht eine teilautomatisierte Auswertung und Protokollierung der Modellerstellung. Die in *JMP* erzeugten Vorhersagemodelle werden für die weitere Verwendung automatisch als Textdateien exportiert.

3.8.1 Struktur der Vorhersagemodelle

Grundlage der hier beschriebenen statistischen Modellbildung ist die multiple lineare Regressionsanalyse. Dieser liegt die Annahme zu Grunde, dass jeder Modelleffekt Y aus einer Linearkombination bekannter Parameter X_i erklärt werden kann [Ize08], [Ste07]. Die bei Betrachtung einer Stichprobe auftretenden Streuungen werden durch den Störterm ϵ_i berücksichtigt. Die Linearkombinationen bestehen aus p Einflussparametern X_i , deren zugehörige Faktoren β_i den linearen Einfluss der Parameter bestimmen. Die Linearität des Modells wird über den linearen Zusammenhang der Parameter garantiert, die Parameterfunktionen X_i selbst können durchaus nichtlinearen Charakter besitzen oder aus nichtlinearen Funktionen bestehen [Ize08]. Gleichung 3.37 zeigt den Aufbau der Modellgleichungen, welcher auch in [Was15] beschrieben ist. Gleichung 3.39 zeigt beispielhaft eine darauf basierende Modellgleichung bzw. Vorhersagefunktion für μ_{pktU} .

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i X_i + \epsilon_i \quad 3.37$$

Mittels der Kleinste-Quadrate-Methode [Ste07] werden die Modellfaktoren β_i so angepasst, dass der Störterm minimal wird und so eine möglichst gute Übereinstimmung der Modellfunktion auf die Daten gewährleistet ist.

3.8.2 Ermittlung signifikanter Einflussfaktoren

Bevor die Regressionskoeffizienten β_i berechnet werden können, müssen die signifikanten Parameter X_i für jeden Modelleffekt ermittelt werden. Sind für einen Effekt alle Einflussgrößen bekannt, können diese direkt übernommen werden. Meist sind in der Praxis jedoch nicht alle Einflüsse und Wechselwirkungen bekannt, so dass diese auf einem anderen Weg ermittelt werden müssen.

Durch die Methode der schrittweisen Regression lassen sich statistisch signifikante Modellparameter identifizieren. Mittels einer Statistiksoftware werden alle möglichen Parameter bis zur gewünschten Potenz und samt ihrer Wechselwirkungen automatisiert einzeln zum Modell hinzugefügt und das BAYESIAN Information Criterion (BIC) ermittelt. Der BIC-Wert ist ein Maß für die Modellgüte. Er berücksichtigt neben der reinen Abweichung des Modells zu den Messwerten zusätzlich die Anzahl der im Modell vorhandenen Parameter. KUHA erläutert in [Kuh04], dass sich über das BIC das „wahre Modell“ besser ermitteln lässt, als dies bei Verwendung des AKAIKE'S Information Criterion (AIC) der Fall ist. Während das AIC oft zu sehr großen Modellen führt und sich besonders für die Vorhersage von neuen Daten eignet, zeichnet sich das BIC besonders für die Ermittlung des „wahren Modells“ aus [Kuh04].

Das BAYESIAN Information Criterion berechnet sich nach [SAS14] wie folgt:

$$BIC = m \cdot \left(\ln \left(2\pi \cdot \frac{SSE}{m} \right) + 1 \right) + k \cdot \ln(m) \quad 3.38$$

- k : Anzahl der Parameter im Modell
 m : Stichprobenumfang (Anzahl der Messungen)
 SSE : Sum of Squared Errors (Fehlerquadratsumme)

Die Ermittlung der geeigneten Modellparameter über das BIC erfolgt automatisiert innerhalb der Statistiksoftware *JMP*. Hierzu werden

nacheinander Parameter zum Modell hinzugefügt oder entfernt. Ist der BIC-Wert nach dem Hinzufügen eines Parameters größer als bei der vorhergegangenen Berechnung, wird der Parameter wieder entfernt und der nächste eingefügt. Diese Prozedur wiederholt sich so lange, bis nach dem Testen aller Möglichkeiten der BIC-Wert ein Minimum annimmt.

Um die Sicherheit der Vorhersage zu steigern, wird zur Ermittlung der Einflussparameter zusätzlich die Methode der Kreuzvalidierung angewendet. Bei der Durchführung der schrittweisen Regression werden die Daten zufällig in eine festlegbare Anzahl gleich großer Teilmengen aufgeteilt. Eine Teilmenge wird hierbei jeweils als Validierungsdatensatz verwendet, mit dem das mittels der verbleibenden Datensätze erzeugte Modell validiert wird. Bei der schrittweisen Regression werden nun nacheinander so viele Modelle berechnet, wie es Teilmengen gibt, jeweils mit einem anderen Validierungsdatensatz. Das Modell, das die besten Validierungsergebnisse erreicht, wird anschließend für die weitere Analyse verwendet [SAS14].

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Modellparameter mittels einer vorwärts gerichteten schrittweisen Regression und einer 5-fachen Kreuzvalidierung ermittelt.

Eine anschließende Prüfung auf Plausibilität der Parameter ist aufgrund des rein statistischen Vorgehens unbedingt notwendig. Die mittels schrittweiser Regression ermittelten Parameter wurden deshalb anhand in der Literatur bereits bekannter Einflüsse, physikalischer Überlegungen, sowie Erfahrungswerten nochmals überprüft.

3.8.3 Ermittlung von Reifen- und Fahrbahncharakteristiken aus statistischen Vorhersagemodellen

Die hier gezeigte Methodik zur Erzeugung von virtuellen Reifenkennlinien bietet neben der Möglichkeit zur anschließenden Magic Formula-Parametrierung außerdem die Möglichkeit, gezielt Reifencharakteristiken und

Einflüsse auf das Reifenverhalten zu untersuchen. Der Vorteil dieser statistischen Betrachtungsweise ist, dass ein einziger, über *DoE* erzeugter und durchgeführter Versuchsplan ausreicht, um sämtliche darin berücksichtigte Effekte getrennt voneinander auswerten zu können. Bei herkömmlicher Herangehensweise müssten zur Ermittlung eines einzigen Effekts während der Messungen alle anderen Parameter konstant gehalten werden. Dies ist auf winterlichen Fahrbahnen zum einen schwer darzustellen, zum anderen würde der Messaufwand enorm steigen, wenn mehrere Effekte betrachtet werden sollen (vgl. Abschnitt 3.2.1).

Die statistische Auswertung ermöglicht es, die Einflussgrößen und Effekte vollständig voneinander zu trennen. Am folgenden Beispiel von Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Messungen auf nassem Asphalt (Wasserhöhe <1 mm) wird die grundsätzliche Vorgehensweise bei der statistischen Analyse erläutert.

Es soll beispielsweise der Einfluss der Mikrorauigkeit (gemessen als SRT-Wert) auf den Seitenkraftbeiwert bei einem Schräglaufwinkel von -5° (vgl. Punkt Pkt_U in Abschnitt 3.7.1) ermittelt werden. Als Haupteinflussgrößen wurden mittels schrittweiser Regression der Profilm negativanteil, die Radlast und die Mikrorauigkeit ermittelt. Gleichung 3.39 zeigt die ermittelte Vorhersagefunktion (vgl. Gleichung 3.37).

$$\begin{aligned} \mu_{Pkt_U} = & -0,1940 \\ & - 1,3473 \cdot 10^{-5} \cdot F_Z \\ & + 6,8245 \cdot 10^{-3} \cdot SRT \\ & + 1,4978 \cdot \text{Profilmnegativanteil} \end{aligned} \quad 3.39$$

Es fällt auf, dass sich der erwartete Einfluss des Sturzwinkels auf μ_{Pkt_U} in diesem ermittelten Modell als nicht signifikant herausstellt. Dies wird dadurch erklärt, dass der Sturzeinfluss maßgeblich über die Vertikalverschiebung S_v der gemessenen Kurve abgebildet wird (vgl. Kapitel 3.7.1). Da die weitere Auswertung der Messkurven und die Generierung der Vorhersagefunktionen anhand der in dieser Arbeit gezeigten Methodik auf der

symmetrischen Magic Formula-Kurve basiert, besitzt der Sturzwinkel für die Ermittlung der Vorhersagefunktionen keinen signifikanten Einfluss.

Abbildung 3.33 zeigt für dieses Beispiel die Güte des ermittelten linearen Regressionsmodells. Darin sind die real gemessenen Werte über die mit dem Modell ermittelten Werte aufgetragen. Das Vorhersagemodell besitzt ein Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,93$ und einen mittleren quadratischen Fehler von $RMSE=0,0197$.

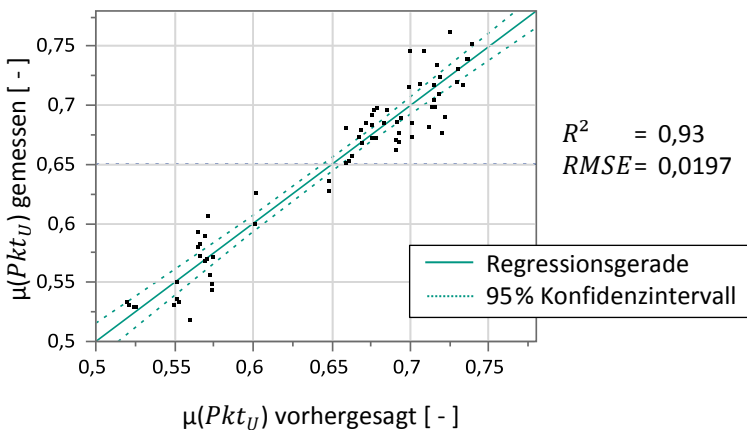


Abbildung 3.33:

Vorhersagegüte des Gesamtmodells zur Ermittlung des Seitenkraftbeiwerts am Punkt Pkt_U auf nasser Fahrbahn

Effekt-Einfluss-Graphen (Bsp. Abbildung 3.34) zeigen zusätzlich den Einfluss der einzelnen Effekte auf das Gesamtmodell. Anhand dieser Darstellung ist es möglich, den Effekteinfluss einzelner Parameter zu beschreiben, Fälle von Multikollinearität von Effekten zu erkennen, und falsche Modellannahmen festzustellen [SAS14]. Die Identifikation von Korrelationen von Einflussfaktoren untereinander (Multikollinearität) ist zur Identifikation valider Modelle besonders wichtig, da sonst die eindeutige Ermittlung der Regressionskoeffizienten nicht mehr möglich ist.

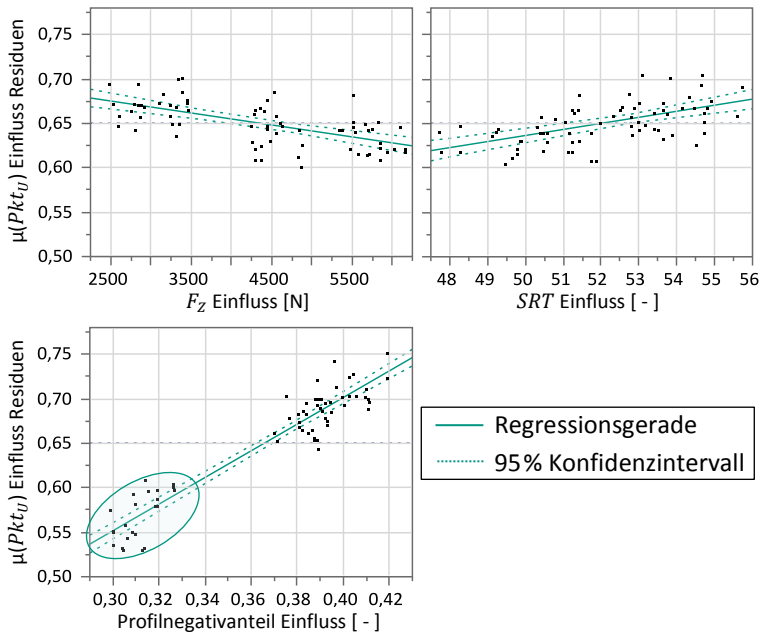


Abbildung 3.34:
Effekt-Einfluss-Diagramme

Der Einfluss des SRT-Werts auf den Seitenkraftbeiwert am Punkt Pkt_U ist durch die Steigung der Regressionsgeraden in Abbildung 3.34 in der Mitte erkennbar. Die gleichmäßige Streuung entlang der gesamten Geraden und die engen Grenzen des 95%-Konfidenzintervalls bestätigen die Signifikanz des Einflusses. Jeder Einzeleffekt besitzt Signifikanzwerte von $P < 0,0001$, bei einem Stichprobenumfang von 71 Messungen. Der P -Wert gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass die Hypothese („Die Vorhersageformel liefert ein mit der Messung vergleichbares Ergebnis.“) fälschlicherweise als richtig angenommen wird. Bei einem Signifikanzwert von $P < 0,0001$ werden die Modellannahmen als bestätigt signifikant angesehen.

Deutlich erkennbar ist ein Einfluss des Profilnegativanteils auf den Seitenkraftbeiwert. Bei genauer Auswertung der einzelnen Datenpunkte ist festzustellen, dass die in Abbildung 3.34, unten, umrandeten Punkte alle vom gleichen Versuchsreifen mit niedrigerem Negativanteil stammen. Aufgrund der geringeren Drainagewirkung kann dieser auf nasser Fahrbahn nur geringere Seitenkräfte übertragen.

3.8.4 Vergleich von Reifeneigenschaften anhand statistischer Auswertung

Mit Hilfe der statistischen Auswertung sind neben einer allgemeinen Betrachtung der Einflussfaktoren eine Ermittlung von Reifenkennwerten und ein direkter Vergleich von am Prüfstand gemessenen Reifen umsetzbar. Beispielsweise ist es auf einfache Weise möglich, den maximalen Umfangskraftbeiwert μ_{Max} verschiedener Reifen zu ermitteln und zu vergleichen.

Die verschiedenen gemessenen Reifen werden dazu bei der Auswertung gesamtlich als kategoriale (voneinander unabhängige) Faktoren im Modell berücksichtigt. Alle weiteren reifenabhängigen Faktoren, wie beispielsweise die Reifenbreite, werden somit nicht einzeln berücksichtigt. Auf diese Weise lassen sich mehrere Reifen bezüglich ihres Verhaltens direkt miteinander vergleichen, auch wenn nicht alle Reifen bei exakt diesen Bedingungen gemessen wurden. Abbildung 3.35 zeigt den Vergleich der maximalen Umfangskraftbeiwerte (Antreiben) der gemessenen Versuchsreifen, abhängig von mehreren Einflussparametern. Bei den einzelnen Reifen sind neben unterschiedlichen Kraftschlussbeiwerten auch Unterschiede in den Verläufen erkennbar. Die verschiedenen Einflussfaktoren haben auf die Reifencharakteristik unterschiedlichen Einfluss.

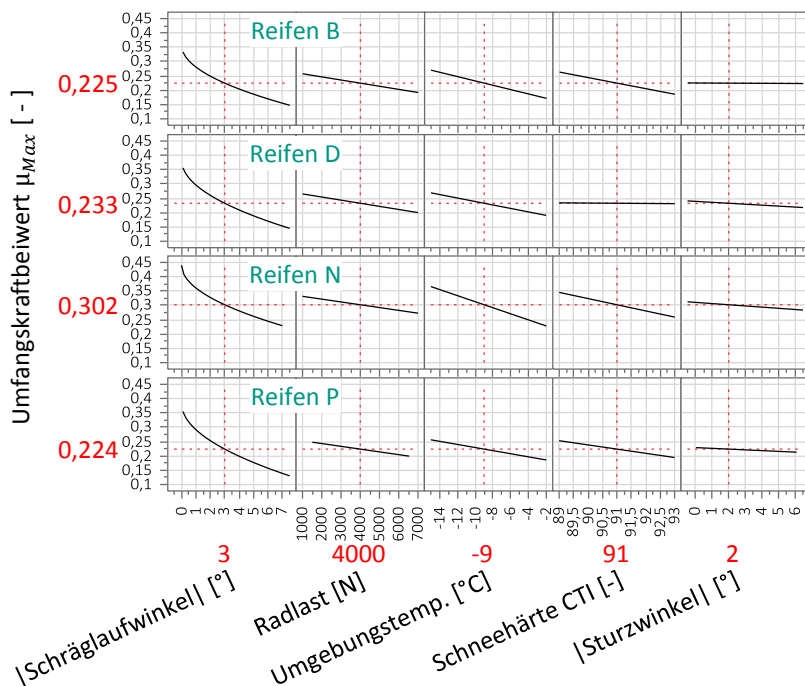


Abbildung 3.35:

Vergleich der Einflussfaktoren auf die maximalen Umfangskraftbeiwerte für den Antriebsfall der verschiedenen Versuchsreifen auf der Schneefahrbahn

Für einen bestimmten Betriebszustand ist es auf diese Weise möglich, einen Vergleich verschiedener Reifen zu erzeugen. Abbildung 3.36 zeigt das zusammengefasste Ranking für die vier Versuchsreifen für den maximalen Umfangskraftbeiwert (Antreiben) bei den gewählten Randbedingungen.

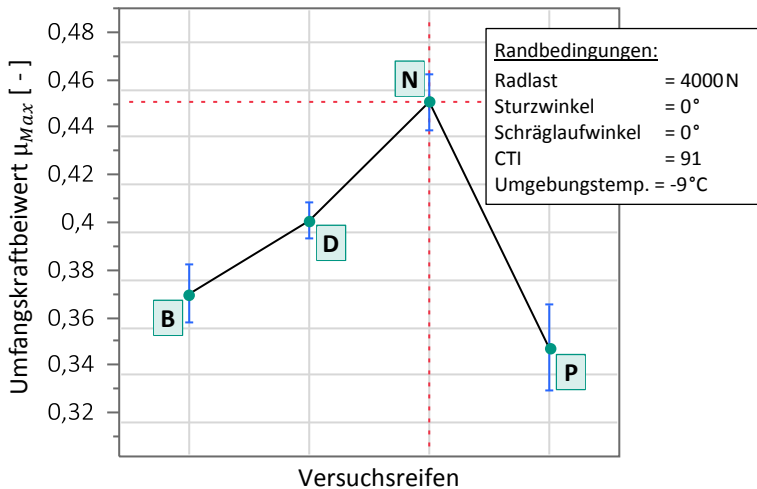


Abbildung 3.36:

Vergleich der maximalen Umfangskraftbeiwerte (Antriebsfall) der Versuchsreifen auf Schneefahrbahn

3.8.5 Reifencharakteristiken auf winterlichen Fahrbahnen

Die Ermittlung von Reifencharakteristiken und die Möglichkeit eines direkten Vergleichs von Reifeneigenschaften auf verschiedenen Fahrbahnen sind Anwendungsfälle für die statistische Auswertung. Sie ermöglicht eine umfangreiche Bewertung und Objektivierung von Reifeneigenschaften auf verschiedenen Fahrbahnen.

Den anschließenden Auswertungen liegen hierbei folgende

Randbedingungen zu Grunde:

- CTI = 91 (bei Schneefahrbahnen)
- Radlast = 4000 N
- Schräglaufwinkel = 0° (bei Eigenschaften in Umfangersichtung)
- SRT = 51 (bei nasser Asphaltfahrbahn)

- Sturzwinkel = 0°
- Umgebungstemperatur = -9°C (bei Schnee- und Eisfahrbahn)

Die eingetragenen Vertrauensintervalle in den folgenden Graphen zeigen die 95%-Konfidenzintervalle für den jeweiligen Faktor. Die dargestellten Einflussfaktoren besitzen innerhalb der hier gemessenen Gültigkeitsintervalle (Tabelle 3.8) linearen Charakter.

Reifen P wurde im Rahmen dieser Arbeit im Rahmen der Modellierungsvalidierung ausschließlich auf der Schneefahrbahn gemessen, für die weiteren Fahrbahnen sind für diesen Reifen deshalb keine Messdaten und keine statistischen Auswertungen verfügbar.

Tabelle 3.8:
Gültigkeitsintervalle

	Schnee	Asphalt nass	Eis
Radlast [N]	[1500, 6500]	[2500, 6500]	[2500, 6500]
Sturzwinkel [°]	[-6, +3]	[-3, +6]	[-6, +3]
Schräglaufwinkel [°]	[-7, +7]	[-7, +7]	[-7, +7]
Umgebungstemperatur [°C]	[-15, -1]	-	[-15, -1]
CTI-Wert	[85, 95]	-	-
SRT-Wert	-	[45, 56]	-

3.8.5.1 Reifencharakteristiken in Umfangsrichtung

Die vorab beschriebene statistische Auswertung der Reifeneigenschaften auf verschiedenen Fahrbahnen wird im Folgenden für die Versuchsreifen detailliert dargestellt. Die Reifencharakteristiken in Längs- und Querrichtung sind zur besseren Übersichtlichkeit getrennt ausgewertet. Die nachfolgenden Betrachtungen zeigen ausgewählte Reifencharakteristiken, welche die Eigenschaften in Umfangskraftrichtung beschreiben.

Maximaler Umfangskraftbeiwert

In Abbildung 3.37 sind die in Abbildung 3.36 dargestellten maximalen Umfangskraftbeiwerte zusätzlich für die verschiedenen Fahrbahnen und für den Antriebs- und Bremsfall dargestellt. Im Mittel liegen die maximalen Reibwerte im Antriebsfall auf Eis bei $\mu_{max}=0,15$, auf Schneefahrbahn bei $\mu_{max}=0,40$ und auf nasser Asphaltfahrbahn bei $\mu_{max}=0,67$.

Sehr deutlich ist zu erkennen, dass sich die Bewertungs-Reihenfolge der Reifen zwischen den Fahrbahnen ändert. Besonders ausgeprägt ist dies beim Versuchsreifen N, der über eine besonders gute Kraftübertragung auf der Eis- und Schneefahrbahn verfügt, auf nasser Fahrbahn jedoch am schlechtesten abschneidet.

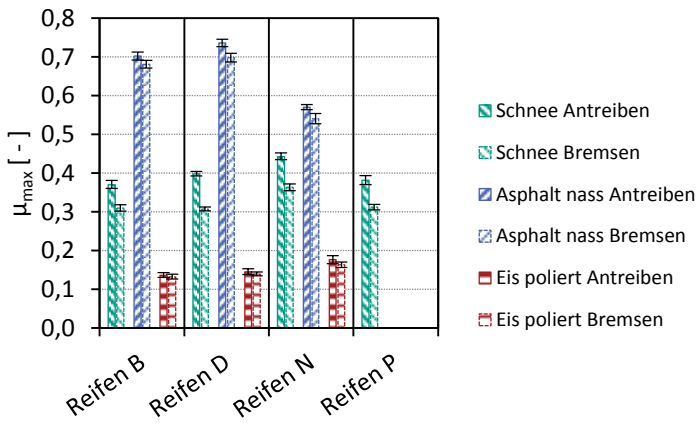


Abbildung 3.37:

Vergleich der maximalen Umfangskraftbeiwerte auf unterschiedlichen Fahrbahnen

Auf der Schneefahrbahn sind die Unterschiede zwischen Antriebs- und Bremsfall am deutlichsten erkennbar. Der maximale Umfangskraftbeiwert beim Bremsen beträgt hier im Mittel bei allen vier untersuchten Reifen 81%, verglichen mit dem Antriebsfall. Bei nasser und eisbedeckter

Fahrbahn sind die Unterschiede geringer, bei allen Reifen ist jedoch ein niedrigerer maximaler Reibwert beim Bremsfall erkennbar. Der durchschnittliche maximale Reibwert beim Bremsen auf nasser Fahrbahn liegt bei 96% gegenüber dem Antrieben, auf Eisfahrbahn beträgt er im Mittel 95% verglichen mit dem Antriebsfall. Da sich hier jedoch die Konfidenzbereiche überschneiden, kann hier lediglich die Tendenz, jedoch kein signifikanter Unterschied belegt werden.

Radlasteinfluss auf den maximalen Umfangskraftbeiwert

Neben objektiven Vergleichen von Reifenkennwerten, wie beispielsweise dem maximalen Reibbeiwert, ist auch ein Vergleich der Einflussfaktoren auf diese Kennwerte möglich. Durch den Einsatz der statistischen Versuchsplanung und der systematischen Auswertung ist dies detailliert auswertbar. Beispielsweise ist ein Vergleich des Einflusses der Radlast auf den Reibwert verschiedener Reifen und Fahrbahnen möglich (Radlastdegression). Der in Abbildung 3.38 gezeigte Radlast-Einflussfaktor beschreibt beispielsweise, wie der maximale Umfangskraftbeiwert auf Radlaständerungen reagiert.

Abbildung 3.38 zeigt den Radlasteinfluss auf den maximalen Umfangskraftbeiwert der einzelnen Reifen. Der Einfluss der Radlast auf den Reibwert ist sehr klein, so dass signifikante Aussagen schwer zu treffen sind. Tendenziell ist jedoch erkennbar, dass der Einfluss der Radlast auf das Reibwertmaximum im Bremsfall stärker ausfällt als im Antriebsfall. Anders formuliert bedeutet dies, dass die Radlastdegression beim Bremsen höher ist als im Antriebsfall. Der Versuchsreifen N bildet hierbei eine Ausnahme, vermutlich sind die sehr weiche Gummimischung und das in Umfangsrichtung weiche Profildesign für dieses abweichende Verhalten auf nasser Fahrbahn verantwortlich.

Auf der Schneefahrbahn ist der Einfluss der Radlast für den Antriebsfall im Mittel bei $-1,1E-05 \frac{1}{N}$, im Bremsfall bei $-1,4E-05 \frac{1}{N}$. Auf nasser Fahrbahn

liegen die Werte im Mittel bei $-1,1E-05 \frac{1}{N}$ (Antreiben) und $-1,2E-05 \frac{1}{N}$ (Bremsen). Auf der Eisfahrbahn konnte aufgrund der geringen Reibbeiwerte keine signifikante Radlastdegression ermittelt werden.

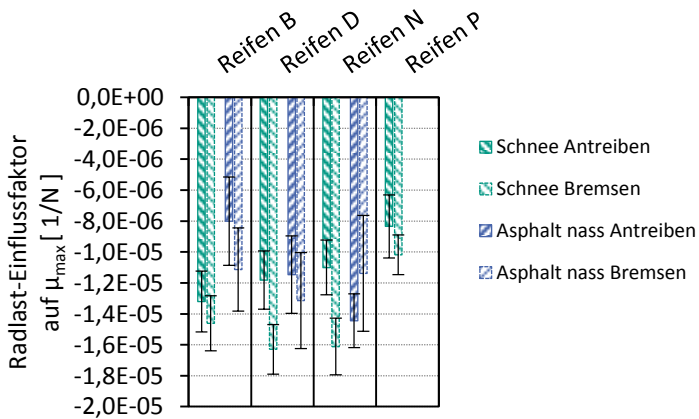


Abbildung 3.38:
Radlasteinfluss auf den maximalen Umfangskraftbeiwert

Im Gegensatz zur Radlastdegression auf trockenen (Hochreibwert-) Fahrbahnen zeigt sich auf den winterlichen Fahrbahnen ein wesentlich geringerer Einfluss der Radlast auf den maximalen Reibwert. Da sich die Effekte der Kraftübertragung auf den unterschiedlichen Fahrbahnen stark unterscheiden (vgl. Abschnitt 2.1) können Theorien, die die Radlastdegression auf Hochreibwert erklären (Haupteinfluss Flächenpressung, [Hak15]) auf Niedrigreibwert nicht äquivalent angewendet werden.

Einfluss der Mikrorauheit und der Schneehärte auf den maximalen Umfangskraftbeiwert

Zu den in dieser Arbeit maßgeblichen Auswertungen zählt auch die Ermittlung der Effekte der Fahrbahneigenschaften auf die Reifencharakteristik.

Auf nasser Fahrbahn konnte der Einfluss der Mikrorauigkeit (SRT-Wert) ermittelt werden. Auf der Schneefahrbahn konnte ein Einfluss der Schneehärte (CTI-Wert) auf den Reibwert erkannt werden.

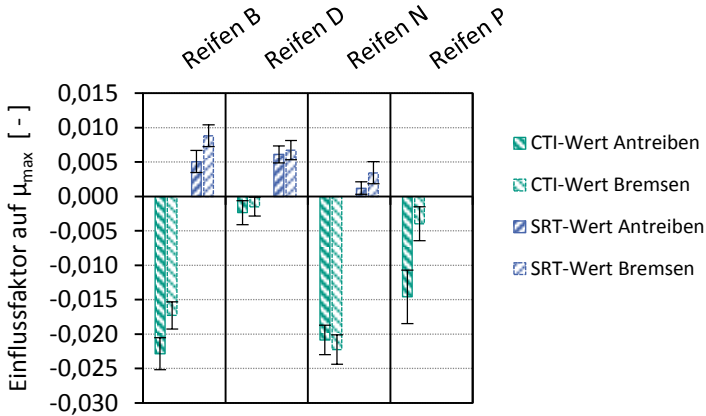


Abbildung 3.39:

Einfluss der Mikrorauigkeit und der Schneehärte auf den maximalen Umfangskraftbeiwert

Abbildung 3.39 zeigt den Vergleich der Reifen. Es ist erkennbar, dass ein höherer SRT-Wert stets zu einem höheren maximalen Umfangskraftbeiwert führt. Die Steigerung hängt jedoch stark vom Reifen ab. Im Mittel (Antreiben und Bremsen) bewirkt eine Steigerung eines SRT-Punktes eine Erhöhung des Umfangskraftbeiwertes um 0,0052. Auf der Schneefahrbahn ist der Effekt umgekehrt. Hier ist erkennbar, dass härterer Schnee die maximale Kraftübertragung grundsätzlich vermindert. Zwischen den einzelnen Reifentypen gibt es allerdings starke Unterschiede in der Höhe des Einflussfaktors. Da die Reifen sich bezüglich ihrer Dimension nicht unterscheiden ist dies vor allem durch die stark unterschiedlichen Reifenprofilierungen und Shore-Härten der Reifen begründet. Im Mittel (Antreiben und Bremsen) liegt die Höhe des CTI-Einflusses bei -0,013.

Einfluss der Temperatur auf den maximalen Umfangskraftbeiwert

Als ein weiterer Einflussfaktor auf Schnee- und Eisfahrbahn wurde die Umgebungstemperatur ermittelt. Der Vergleich der Versuchsreifen in Abbildung 3.40 zeigt den Temperatureinfluss auf den maximalen Umfangskraftbeiwert im Antriebs- und Bremsfall.

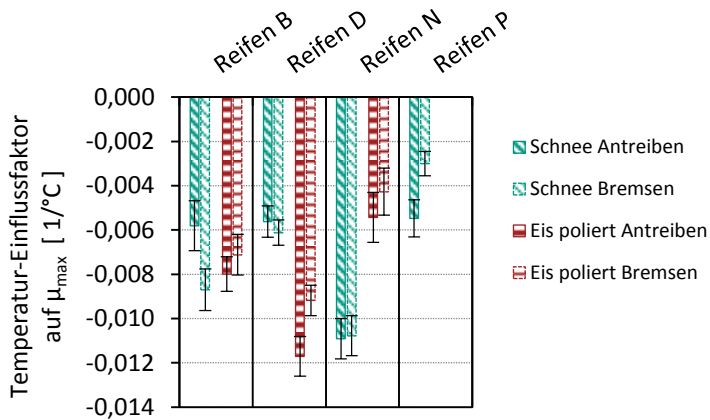


Abbildung 3.40:

Einfluss der Temperatur auf den maximalen Umfangskraftbeiwert auf Schnee- und Eisfahrbahn

Deutlich ist zu sehen, dass ein Temperaturanstieg in jedem Fall mit einem Abfall der maximal übertragbaren Kraft einhergeht. Wie stark sich der Einfluss auf den verschiedenen Fahrbahnen auswirkt, hängt wiederum stark vom Reifen und seiner Gummimischung und Profilgestaltung ab. Über alle dargestellten Reifen und Fahrbahnen gemittelt beträgt der Temperatureinfluss auf den maximalen Umfangskraftbeiwert $-7,29\text{E-}03 \frac{1}{^\circ\text{C}}$.

Schlupfsteifigkeit von Winterreifen auf verschiedenen Fahrbahnen

Als weitere Reifencharakteristik wurde die Schlupfsteifigkeit auf verschiedenen Fahrbahnen verglichen. Als Schlupfsteifigkeit wird die Steigung der Umfangskraft-Schlupf-Kurve (normiert auf die Radlast) im Ursprung bezeichnet. Hier zeigt sich, dass die Schlupfsteifigkeit stark von der Fahrbahn und dem Reifen gleichermaßen abhängig ist. Wie in Abbildung 3.41 dargestellt, zeigen die Versuchsreifen auf der Eisfahrbahn niedrigere Schlupfsteifigkeiten verglichen mit den anderen Fahrbahnen.

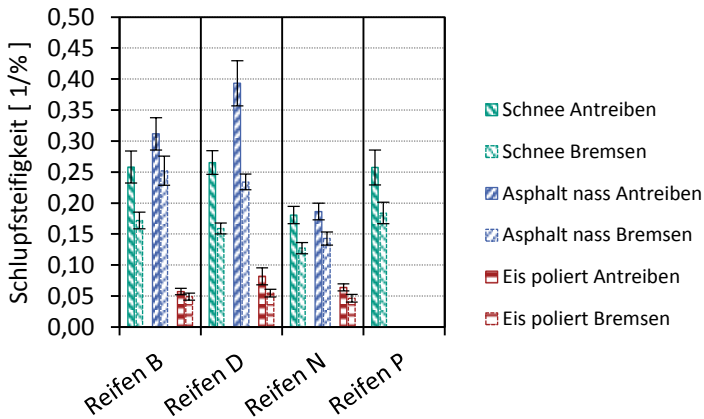


Abbildung 3.41:

Schlupfsteifigkeit auf verschiedenen Fahrbahnen

Durch Unterschiede in der Profilgestaltung und verschiedenen Mechanismen der Kraftübertragung auf den jeweiligen Fahrbahnen lassen sich die Unterschiede der Schlupfsteifigkeiten auf verschiedenen Fahrbahnen der einzelnen Reifen erklären. Es wird angenommen, dass sich die Biegesteifigkeit der Profilelemente des Reifens mit der Temperatur ändert. Die Messungen auf der Eisfahrbahn fanden bei sehr niedrigen Temperaturen unter dem Gefrierpunkt, die Schneemessungen bei etwas höheren statt. Auf der nassen Asphaltfahrbahn wurden die Reifen bei wesentlich

höheren Temperaturen (etwa Raumtemperatur) gemessen. Es ist deutlich erkennbar, dass die Schlupfsteifigkeit proportional zur Temperatur und somit umgekehrt proportional zur Biegesteifigkeit der Profilelemente zunimmt.

Die Schlupfsteifigkeit auf der Eisfahrbahn ist im Vergleich am geringsten. Die Profilelemente verformen sich aufgrund der höheren Biegesteifigkeit nicht so stark und über die Reibkräfte (maßgeblich Adhäsion) kann so nur sehr wenig Kraft übertragen werden. Auf Schnee ist die Schlupfsteifigkeit wesentlich höher, da aufgrund der Scherkräfte durch die Verzahnung mit dem Schnee mehr Kraft übertragen werden kann. Die niedrigere Biegesteifigkeit begünstigt dabei die Verzahnung mit der Schneeoberfläche. Auf der nassen Asphaltfahrbahn ist eine noch etwas höhere Schlupfsteifigkeit zu beobachten als auf Schnee. Durch die höheren übertragbaren Reibkräfte und die reduzierte Biegesteifigkeit können sich die Profillamellen vermehrt gegenseitig abstützen (Schließen der Zwischenräume im Profil), auf diese Weise kann schon früh mehr Kraft übertragen werden.

Reifen N besitzt beispielsweise ein sehr weiche Gummimischung (Shore-Härte). Durch seine starke Querlamellierung ist dieser Reifen in Umfangsrichtung bereits strukturell weicher als die anderen (vgl. Flächenträgheitsmoment in Kapitel 3.7.2). Zusammen führt dies zu einem niedrigen Wert für die Schlupfsteifigkeit.

Auf Eis sind zwischen den Reifen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Reifen messbar.

Signifikant unterschiedlich dagegen sind die Schlupfsteifigkeiten zwischen Antreiben und Bremsen. Hier sind die Schlupfsteifigkeiten im Bremsfall auf Schnee um 33%, auf nasser Fahrbahn um 29% und auf Eisfahrbahn um 26% niedriger gegenüber dem Antriebsfall.

Lage des Umfangskraftmaximums auf verschiedenen Fahrbahnen

Von besonders großer Bedeutung für die Abstimmung von Fahrdynamikregelsystemen, wie Anti-Blockier-System (ABS) und Antriebs-Schlupf-Regelung (ASR), ist die Lage des Kraftschlussmaximums in Umfangskraft-richtung, so dass dies hier näher beleuchtet wird.

Wie in Abbildung 3.42 dargestellt, ist die Lage des Maximums für jeden Reifen stark fahrbahnabhängig. Zur besseren Übersichtlichkeit werden hier die Absolutwerte der Schlupfwerte aus Antreiben und Bremsen verglichen. Es zeigt sich, dass auf der Schneefahrbahn mit einem CTI-Wert von 91 bei den Versuchsreifen das Reibwertmaximum im Antriebsfall im Mittel bei 5,4% (im Bremsfall bei 6,0%) Schlupf erreicht wird. Auf nassem Asphalt treten die maximalen Kräfte erst bei höheren Schlupfwerten auf. Hier wird im Antriebsfall im Mittel der maximale Reibwert bei 8,0% Schlupf erreicht (Bremsen bei 9,4%). Auf poliertem Eis befinden sich die Maxima im Antriebsfall im Mittel bei 7,5% Schlupf. Im Bremsfall sind die Maxima im Mittel bei 9,5%.

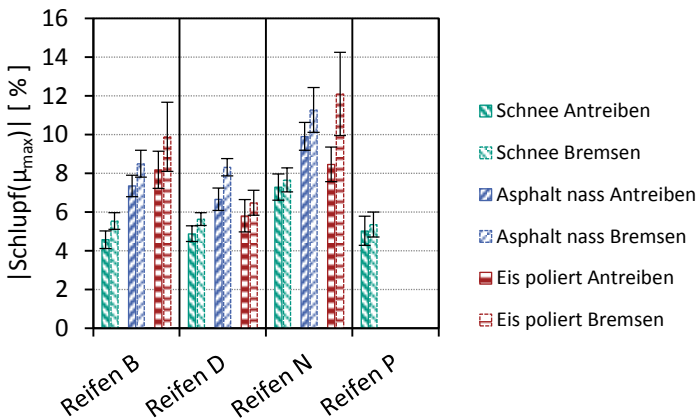


Abbildung 3.42:
Lage des Umfangskraftmaximums auf verschiedenen Fahrbahnen

Bei detaillierter Betrachtung ist erkennbar, dass die Lage des Umfangskraftmaximums zwischen den Reifen auf den unterschiedlichen Fahrbahnen stark variiert. Besonders beim Vergleich zwischen Asphalt nass und der Eisfahrbahn gibt es Unterschiede, die vor allem durch unterschiedliche Gummimischungen der Hersteller erklärt werden können.

Es sind deutliche Unterschiede zwischen Antreiben und Bremsen erkennbar. Im Bremsfall werden die maximalen Umfangskraftbeiwerte auf allen Fahrbahnen erst bei höheren Schlupfwerten erreicht. Im Mittel sind im Bremsfall die Maxima auf der Schneefahrbahn um 0,6%, auf der nassen Fahrbahn um 1,4% und auf der Eisfahrbahn um 2,0% zu höheren Schlupfwerten verschoben.

Einfluss der Radlast auf die Lage des Kraftschlussmaximums

Auf nasser Asphaltfahrbahn und auf der Eisfahrbahn konnte ein signifikanter Einfluss der Radlast auf die Lage des Umfangskraftmaximums ermittelt werden. So zeigt sich, dass eine Erhöhung der Radlast immer mit einer Verschiebung des Maximums hin zu geringeren Schlupfwerten einhergeht. Eine Radlasterhöhung von 2000 N verschiebt auf der Eisfahrbahn beim Reifen N im Bremsfall das Maximum beispielsweise um 3,2% hin zu niedrigeren Schlupfwerten. Auf der Schneefahrbahn hingegen konnte kein signifikanter Einfluss festgestellt werden. Abbildung 3.43 zeigt die Ergebnisse der statistischen Auswertung. Bezüglich der Lage des Reibwertmaximums sind in den meisten Fällen ebenfalls signifikante Unterschiede zwischen Antreiben und Bremsen zu identifizieren. Während auf nasser Fahrbahn die Radlast im Antriebsfall einen größeren Einfluss hat (eine Ausnahme bildet hier erneut Reifen N), kehrt sich dies auf der Eisfahrbahn um.

Es zeigt sich, dass Höhe und Lage des Umfangskraftmaximums jeweils von der Radlast beeinflusst wird. Werden die Ergebnisse aus Abbildung 3.38 und Abbildung 3.43 zusammengefasst, zeigt sich, dass sich das Reibwertmaximum in Umfangskraftrichtung mit steigender Radlast reduziert und

sich bezüglich seiner Lage geringfügig hin zu niedrigeren Schlupfwerten verschiebt.

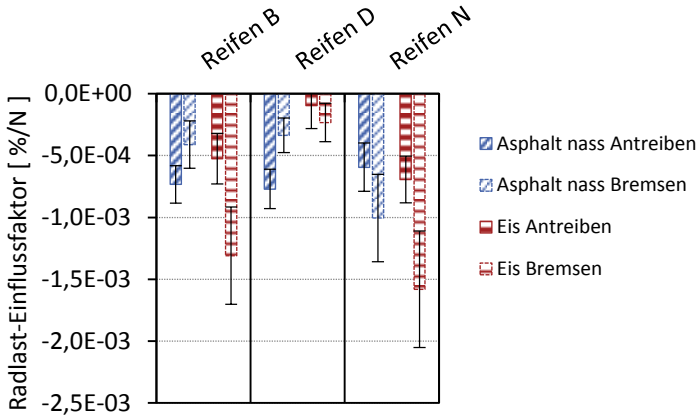


Abbildung 3.43:
Einfluss der Radlast auf die Lage des Umfangskraftmaximums

Einfluss der Schneehärte und der Umgebungstemperatur auf die Lage des Umfangskraftmaximums auf der Schneefahrbahn

Die Auswertung zeigte weitere Einflüsse auf die Lage des Kraftschlussmaximums auf der Schneefahrbahn. Zum einen hat die Umgebungstemperatur einen signifikanten Einfluss, zum anderen beeinflusst die Schneehärte die Lage des Maximums. In Abbildung 3.44 ist der umgekehrt proportionale Einfluss der Schneehärte und der proportionale Einfluss der Umgebungstemperatur dargestellt. Zwischen Antreiben und Bremsen konnten hierbei keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden. Die Einflüsse werden deshalb zusammengefasst ermittelt.

Es kann gezeigt werden, dass der Temperatureinfluss bei allen Versuchsreifen etwa gleich groß ist. Eine Erhöhung der Temperatur führt in allen Fällen zu einer Verschiebung der Lage des maximalen

Umfangskraftbeiwerts hin zu höheren Schlupfwerten. Im Mittel beträgt der Faktor 0,28. Fünf Grad Celsius Temperaturerhöhung führt beispielsweise beim Reifen N zu einer Verschiebung der Position des Maximums um 1,3% nach oben.

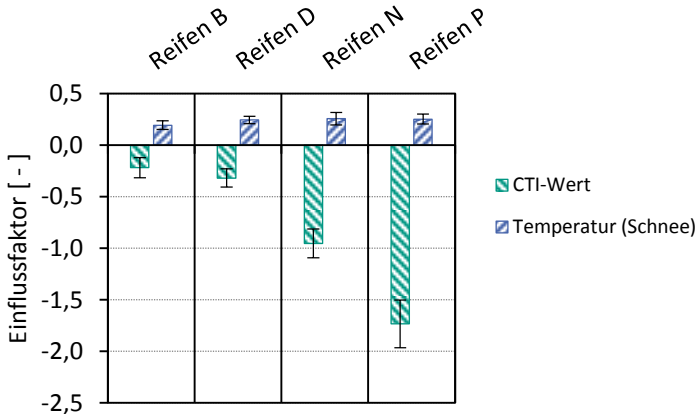


Abbildung 3.44:

Einfluss der Schneehärte und der Umgebungstemperatur auf die Lage des Umfangskraftmaximums

Eine Erhöhung der Schneehärte hat einen umgekehrt proportionalen Effekt auf die Lage des Maximums. Härterer Schnee führt zu einer Verschiebung der Lage des Maximums hin zu niedrigeren Werten. Hier sind deutliche Unterschiede zwischen den Reifen erkennbar. Während bei Reifen B und Reifen D die Schneehärte kaum einen Einfluss hat, ist der Einfluss bei den beiden anderen Reifen stärker ausgeprägt.

Vergleich der Umfangkraftschlussbeiwerte bei 50% Schlupf

Anhand der statistischen Auswertung können beliebige Punkte und charakteristische Kenngrößen miteinander verglichen werden. Als Beispiel

werden hier die Kraftschlusswerte bei einem Schlupf von 50% (vgl. Punkt Pkt_U in Abschnitt 3.7.1) analysiert.

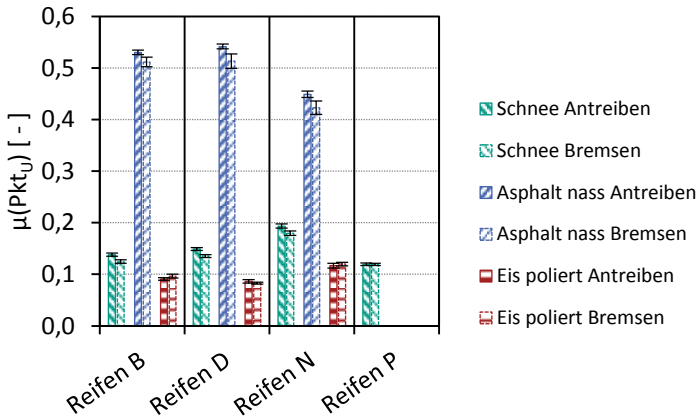


Abbildung 3.45:
Vergleich der Umfangskraftschlussbeiwerte bei 50% Schlupf

In Abbildung 3.45 sind die Kraftschlussbeiwerte der Versuchsreifen auf verschiedenen Fahrbahnen gegenübergestellt. Im direkten Vergleich mit den maximalen Kraftschlussbeiwerten in Abbildung 3.35 ist zu erkennen, dass der Reibwertabfall (zwischen dem Maximum und dem Punkt Pkt_U) auf der Schneefahrbahn am höchsten ist. Im Antriebsfall fällt hier im Mittel der Reibwert auf 38% des Maximums ab (Bremsen auf 43%). Auf der nassen Asphaltfahrbahn fällt der Reibwert am Punkt Pkt_U dagegen im Antriebs- und Bremsfall im Mittel gleichermaßen nur auf 76% des Maximums ab. Auf Eis fällt der Reibwert im Antriebsfall auf 64%, im Bremsfall auf 69% des Maximums ab. Dass der Abfall auf der Schneefahrbahn höher ausfällt als auf den anderen Fahrbahnen lässt sich maßgeblich durch die strukturellen Eigenschaften der Schneefahrbahn erklären. Bis zum Reibwertmaximum wird der Großteil der Kraft über Scherung der Profilblöcke mit der Fahrbahn übertragen. Zu höheren Schlupfwerten (nach dem

Reibwertmaximum) dominiert vermehrt der Grabeffekt. Der Schnee hält der zunehmenden Scherkraft nicht mehr stand und bricht lokal aus. Dadurch kann wesentlich weniger Kraft übertragen werden. Auf den anderen Fahrbahnen sind solche Änderungen der Kraftübertragungsmechanismen nicht zu beobachten, weshalb hier der Reibwertabfall über dem Schlupf nicht so deutlich ausfällt.

Im Punkt Pkt_U sind auf nasser und Schneefahrbahn signifikante Unterschiede zwischen Antriebs- und Bremsfall zu erkennen. So zeigt sich, dass auf der Schneefahrbahn der Reibwert am Punkt Pkt_U beim Bremsen um 6,9% gegenüber dem Antreiben abfällt, auf nasser Fahrbahn um 4,8%. Auf Eis sind die messbaren Reibwertunterschiede zu gering.

Einfluss der Mikrorauheit auf den Kraftschluss bei 50% Schlupf

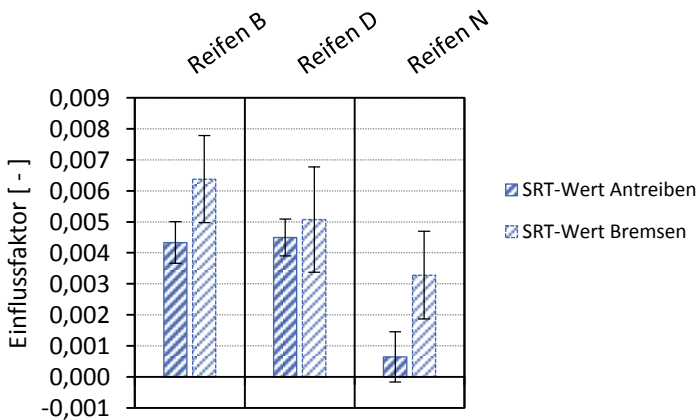


Abbildung 3.46:

Einfluss der Mikrorauheit auf den Kraftschluss bei 50% Schlupf

Vergleichbar mit den Einflüssen auf das Kraftschlussmaximum können die Einflüsse auf den Reibwert am Punkt Pkt_U analysiert werden. Das Beispiel

zeigt die Auswertung des Einflusses des SRT-Wertes auf den Kraftschlussbeiwert am Punkt Pkt_U . Der Graph (Abbildung 3.46) zeigt qualitativ vergleichbare Ergebnisse mit jenen aus Abbildung 3.39. Quantitativ ist erkennbar, dass der SRT-Wert einen etwas geringeren Einfluss auf den Kraftschluss am Punkt Pkt_U hat als am Kraftschlussmaximum.

Temperatureinfluss auf den Kraftschlussbeiwert bei 50% Schlupf

Vergleichbar mit der in Abbildung 3.40 dargestellten Auswertung ist auch der Einfluss der Umgebungstemperatur auf den Umfangskraftbeiwert am Punkt Pkt_U statistisch analysierbar. Alle Versuchsreifen zeigen hier bei einer Erhöhung der Umgebungstemperatur eine Verringerung des Kraftschlussbeiwerts (siehe Abbildung 3.47). Im direkten Vergleich des Temperatureinflusses zeigt sich jedoch, dass die Umgebungstemperatur am Punkt Pkt_U einen um etwa die Hälfte geringeren Einfluss auf den Kraftschlussbeiwert hat als am Maximum.

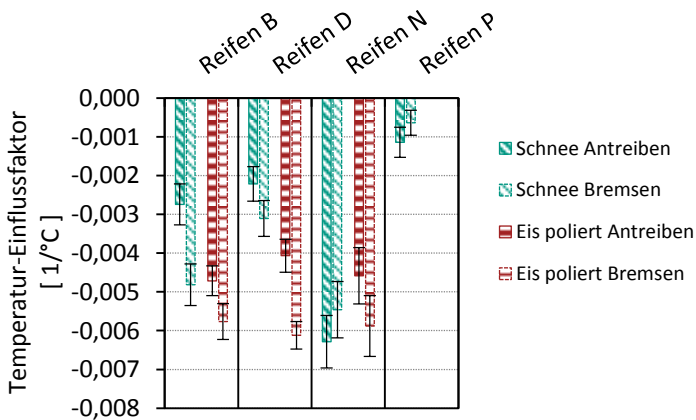


Abbildung 3.47:
Einfluss der Temperatur auf den Umfangskraftbeiwert bei 50% Schlupf

3.8.5.2 Reifencharakteristiken in Seitenkraftrichtung

Die folgenden Auswertungen zeigen Reifencharakteristiken, welche Eigenschaften in Seitenkraftrichtung beschreiben.

Maximaler Seitenkraftbeiwert

Der Vergleich der maximalen Seitenkraftbeiwerte der Versuchsreifen auf den verschiedenen Fahrbahnen in Abbildung 3.48 zeigt ein zu den maximalen Umfangskraftbeiwerten in Abbildung 3.37 vergleichbares Ergebnis. Es ist deutlich zu erkennen, dass Reifen D auf nasser Asphalt-Fahrbahn wiederum am besten abschneidet, Reifen N auf Schnee jedoch die beste Performance zeigt. Auf der Eisfahrbahn sind Unterschiede zwischen den Versuchsreifen kaum messbar. Im Mittel liegen die maximalen Reibwerte auf Eis bei $\mu_{max}=0,19$, auf Schneefahrbahn bei $\mu_{max}=0,33$ und auf nasser Asphaltfahrbahn bei $\mu_{max}=0,65$.

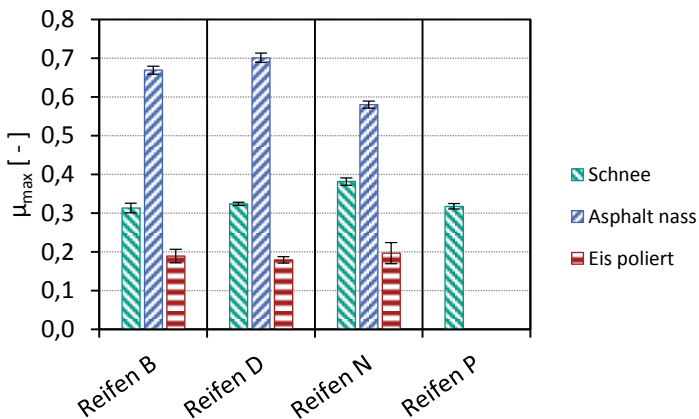


Abbildung 3.48:

Vergleich der maximalen Seitenkraftbeiwerte auf unterschiedlichen Fahrbahnen

Nun wird der hier ermittelte maximale Seitenkraftbeiwert mit den im vorherigen Abschnitt gezeigten maximalen Umfangskraftbeiwerten verglichen. Der maximale Seitenkraftbeiwert auf Schnee liegt im Mittel über alle Reifen bei 84% des maximalen Umfangskraftbeiwerts im Antriebsfall. Auf der nassen Asphaltfahrbahn kann mit 97% (Mittelwert) fast genauso viel Kraft in Querrichtung (Seitenkraft) übertragen werden wie in Umfangsrichtung (Umfangskraft) im Antriebsfall. Auf der Eisfahrbahn konnte in Querrichtung mehr Kraft übertragen werden als in Umfangsrichtung (im Mittel 124% der maximalen Umfangskraft im Antriebsfall).

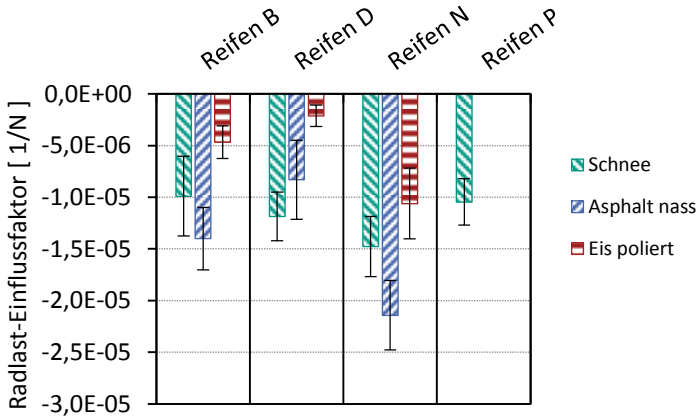


Abbildung 3.49:
Einfluss der Radlast auf den maximalen Seitenkraftbeiwert

In Abbildung 3.49 ist der Einfluss der Radlast auf den maximalen Seitenkraftbeiwert abgebildet. Die mittlere Radlastdegression des maximalen Seitenkraftbeiwerts auf Schnee hat mit einem Einflussfaktor von $-1,174E-05 \frac{1}{N}$ einen größeren Effekt (6%) als in Umfangsrichtung (Antriebsfall). Auf nasser Asphaltfahrbahn liegt der mittlere Einfluss der Radlast bei einem Wert von $-1,457E-05 \frac{1}{N}$ und besitzt damit einen um 29% stärkeren Effekt als in Umfangskrafttrichtung (Antriebsfall). Im Gegensatz zur

Umfangskraftrichtung konnte auf Eisfahrbahn ein signifikanter Einfluss der Radlast ermittelt werden. Im Mittel liegt der Radlasteinfluss bei $-5,80E-06 \frac{1}{N}$.

Es wird deutlich, dass die Radlastdegression stark reifen- und fahrbahnabhängig ist und so keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden können.

Einfluss der Mikrorauheit auf den maximalen Seitenkraftbeiwert auf nasser Asphaltfahrbahn

In Abbildung 3.50 ist die Abhängigkeit des maximalen Seitenkraftbeiwerts von der Mikrorauigkeit der nassen Asphaltfahrbahn abgebildet. Auffallend ist, dass der Einfluss in Seitenkraftrichtung im Vergleich mit der Umfangsrichtung (Antriebsfall) im Mittel um 51% größer ist ($6,232E-03$). Reifen N zeigt, vergleichbar mit der Umfangsrichtung, den geringsten Einfluss des SRT-Werts auf den maximalen Seitenkraftbeiwert.

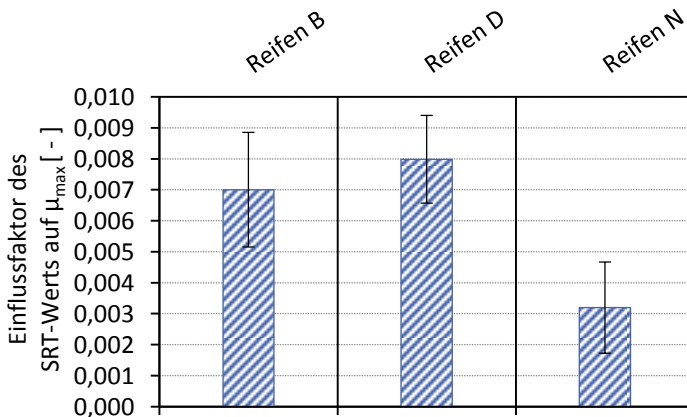


Abbildung 3.50:

Einfluss der Mikrorauheit der nassen Asphaltfahrbahn auf den maximalen Seitenkraftbeiwert

Ein Einfluss der Schneehärte auf den maximalen Seitenkraftbeiwert auf Schneefahrbahn konnte somit nicht signifikant nachgewiesen werden.

Temperatureinfluss auf den maximalen Seitenkraftbeiwert auf Schnee- und Eisfahrbahnen

Auf der Schneefahrbahn konnte ein signifikanter Einfluss der Temperatur auf den maximalen Seitenkraftbeiwert nachgewiesen werden. Der Temperatureinfluss ist um etwa 29% ausgeprägter als in Umfangsraftrichtung (Antreiben) und beträgt im Mittel $-9,0E-03 \frac{1}{^\circ C}$. Der mittlere Temperatureinfluss auf der Eisfahrbahn liegt bei $-6,64E-03 \frac{1}{^\circ C}$ und ist somit etwa 20% schwächer als der Einfluss in Umfangsrichtung (Antreiben). Abbildung 3.51 zeigt die Ergebnisse der statistischen Analyse. Die Höhe des Temperatureinflusses ist stark von Reifen und Fahrbahnen abhängig, eine Temperaturerhöhung führt jedoch in jedem Fall zu einem Absinken des maximalen Seitenkraftbeiwerts.

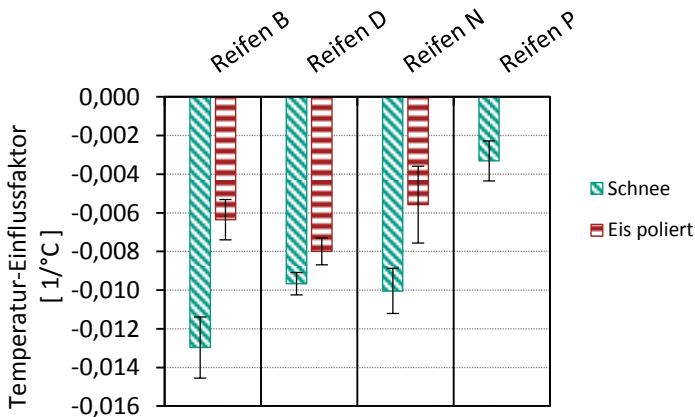


Abbildung 3.51: Einfluss der Temperatur auf den maximalen Seitenkraftbeiwert auf Schnee- und Eisfahrbahn

Schräglaufsteifigkeit auf verschiedenen Fahrbahnen

Einen Vergleich der Schräglaufsteifigkeiten der verschiedenen Versuchstreifen auf unterschiedlichen Fahrbahnen zeigt Abbildung 3.52.

Die größere Schräglaufsteifigkeit auf Schnee ist unter anderem durch die niedrige Temperatur (-9°C auf Schnee) und die sich dadurch verändernden Gummieigenschaften zu erklären. Der Reifengummi wird bei tiefen Temperaturen härter, dies resultiert in einer höheren Biegesteifigkeit der Profilblöcke und somit auch in einer größeren Schräglaufsteifigkeit. Zudem bewirkt der bessere Formschluss (Verzahnung der Lamellen) auf der Schneefahrbahn eine höhere Schräglaufsteifigkeit.

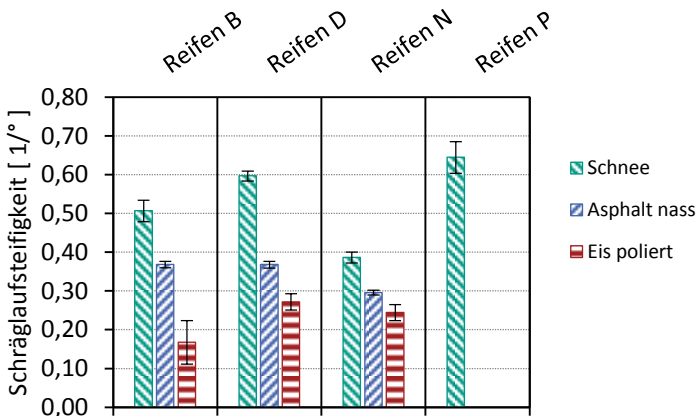


Abbildung 3.52:
Schräglaufsteifigkeit auf verschiedenen Fahrbahnen

Aufgrund der unterschiedlichen Profileigenschaften (z.B. unterschiedlich große Profilsteifigkeiten in Längs- und Querrichtung) kommt es auf den unterschiedlichen Fahrbahnen im Gegensatz zur Umfangsrichtung (Schlupfsteifigkeit, vgl. Abbildung 3.41) bei der Schräglaufsteifigkeit zu Differenzen.

Auf der Eisfahrbahn ist die Schräglaufsteifigkeit trotz der niedrigen Temperatur niedriger als auf den anderen Fahrbahnen. Durch den sehr niedrigen Haftbeiwert gleiten die Profilblöcke, ohne sich mit der Oberfläche zu verzahnen, sofort auf der Eisoberfläche ab, so dass auch die Schräglaufsteifigkeit abnimmt.

Schräglaufwinkel maximaler Seitenkraftbeiwerte auf verschiedenen Fahrbahnen

Ein Vergleich der Schräglaufwinkel, an denen der maximale Seitenkraftbeiwert gemessen wird, ist in Abbildung 3.53 dargestellt. Es ist eindeutig zu sehen, dass auf Schneefahrbahn das Reibwertmaximum bereits bei sehr kleinen Schräglaufwinkeln erreicht wird (im Mittel bei $-1,9^\circ$), auf nasser Asphaltfahrbahn bei $-6,1^\circ$ und auf Eis bei $-4,9^\circ$. Es wird deutlich, dass sich der Schräglaufwinkel, an dem das Reibwertmaximum gemessen wird, auf unterschiedlichen Fahrbahnen bei jedem Reifen unterschiedlich verändert.

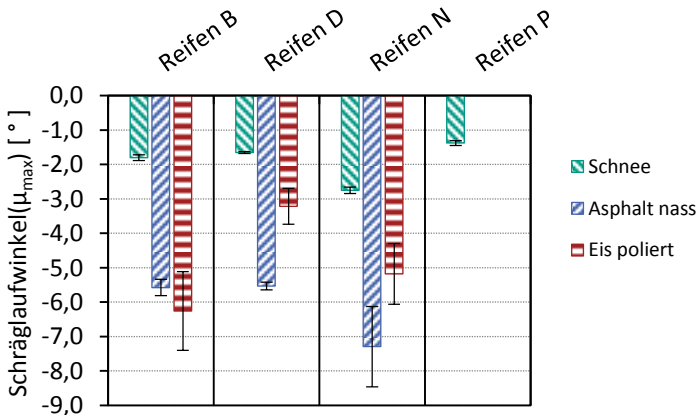


Abbildung 3.53:
Lage des Seitenkraftmaximums auf verschiedenen Fahrbahnen

Im Vergleich mit der Umfangkraftrichtung (Abbildung 3.42) zeigt sich (unter Berücksichtigung der Streuung auf der Eisfahrbahn) für die Lage des Reibwertmaximums in Seitenkraftrichtung ein vergleichbares Ergebnis für jeden einzelnen Versuchsreifen auf den verschiedenen Fahrbahnen. Bei separater Betrachtung jedes Reifens ist die Lage des maximalen Seiten- und Umfangkraftbeiwerts bzgl. der Reihenfolge der Lage von maximaler Seiten- bzw. Umfangskraft identisch. Beim Reifen D in aufsteigender Reihenfolge (Absolutwerte) entsprechend Schnee-, dann die Eisfahrbahn, gefolgt von Asphalt nass.

Im Gegensatz zum Einfluss auf die Lage des Umfangskraftmaximums konnten Einflüsse der Radlast, der Mikrorauheit oder der Schneehärte auf den Schräglaufwinkel maximaler Seitenkraft nicht signifikant nachgewiesen werden.

Einfluss der Temperatur auf den Schräglaufwinkel maximaler Seitenkraft

Ein signifikanter Einfluss auf den Schräglaufwinkel, an dem die maximale Seitenkraft herrscht, konnte für die Temperatur nachgewiesen werden. Auf Schneefahrbahn liegt dieser Einfluss im Mittel bei 0,05 und fällt damit geringer aus als der Einfluss auf Eisfahrbahn (0,35). Eine um 5°C höhere Temperatur führt somit auf Eis im Mittel um eine Verschiebung des Seitenkraftmaximums um 1,75° hin zu (absolut gesehen) höheren Werten. Es zeigt sich, dass die Temperatur qualitativ den gleichen Einfluss auf die Lage der Maxima in Längs- und Querrichtung (vgl. Abbildung 3.40) hat.

In diesem Abschnitt wurden ausgewählte Reifeneigenschaften und Einflussfaktoren gezeigt. Diese Einflussfaktoren können nun zusammengefasst für jeweils einen Reifen dargestellt werden. Tabelle 3.9 zeigt beispielsweise die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Einflussfaktoren auf Umfangskraft-Schlupf-Kurven im Antriebsfall für den Versuchsreifen B.

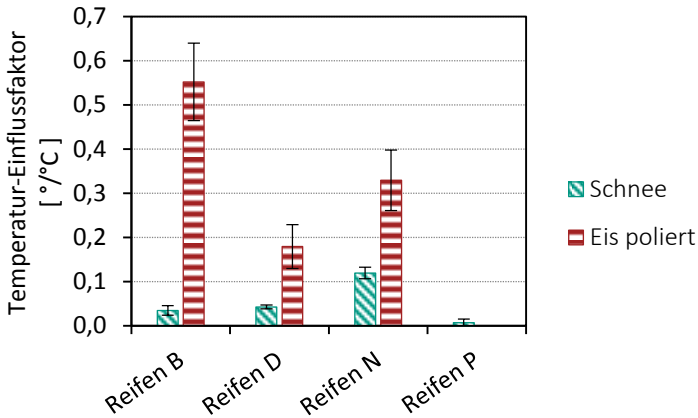


Abbildung 3.54:
Einfluss der Temperatur auf die Lage des Seitenkraftmaximums auf Schnee- und Eisfahrbahn

Tabelle 3.9:
Zusammengefasste, ausgewählte Einflussfaktoren für den Versuchsreifen B
Auswertepremissen: Schräglaufwinkel = 0°, Sturzwinkel = 0°, Radlast = 4000N,
CTI = 91, SRT = 51, Temperatur = -9°C

Einflussfaktor	Fahrbahn	Einfluss auf ...		
		μ_{Max}	Schlupf(μ_{Max})	$\mu(Pkt_U)$
Radlast	Schnee	-1,32E-05 [$\frac{1}{N}$]	*	-5,49E-06 [$\frac{1}{N}$]
	Asphalt nass	-8,00E-06 [$\frac{1}{N}$]	-7,33E-04 [$\frac{\%}{N}$]	-1,35E-05 [$\frac{1}{N}$]
	Eis poliert	*	-5,25E-04 [$\frac{\%}{N}$]	-3,07E-06 [$\frac{1}{N}$]
SRT-Wert	Asphalt nass	0,005 [-]	*	0,004 [-]
CTI-Wert	Schnee	-0,023 [-]	-0,217 [%]	-0,011 [-]
Temperatur	Schnee	-0,006 [$\frac{1}{°C}$]	0,194 [$\frac{\%}{°C}$]	-0,003 [$\frac{1}{°C}$]
	Eis poliert	-0,008 [$\frac{1}{°C}$]	*	-0,005 [$\frac{1}{°C}$]

* kein signifikanter Einfluss

4 Erzeugung virtueller Winterreifenmodelle

Nachdem in Kapitel 3 die Methodik zur Ermittlung von Reifencharakteristiken und Erzeugung statistischer Vorhersagefunktionen erläutert wurde, folgt nun in Kapitel 4 die Weiterführung der Methodik. Ausgehend von den statistisch ermittelten Reifeneigenschaften wird hier die Methodik bis hin zum fertigen Winterreifensimulationsmodell erläutert.

Basis für den hier erläuterten Prozess bilden die anhand der in Kapitel 3 beschriebenen Methodik erzeugten statistischen Vorhersageformeln. Diese müssen lediglich einmalig ermittelt werden, anschließend können mit Hilfe dieser Formeln virtuelle Winterreifenmodelle erzeugt werden.

Um die virtuellen Reifenmodelle zu generieren, wird ein zweistufiger Prozess verwendet. Im ersten Schritt wird gemäß Abschnitt 4.1.1 anhand der zuvor ermittelten statistischen Vorhersagefunktionen ein kompletter virtueller Messdatensatz aus einzelnen Messschrieben erzeugt. Die virtuell erzeugten Messdaten sind hierbei in ihrem Aufbau identisch zu jenen von realen Prüfstandsmessungen. Anhand dieser virtuell erzeugten Messdateien wird anschließend ein MF-Fitting durchgeführt (Schritt zwei).

4.1 Erzeugung virtueller Messdaten aus statistischen Vorhersagemodellen

Der komplette virtuelle Messdatensatz besteht aus mehreren einzelnen Messschrieben, welche im Anschluss für die MF-Parametrierung verwendet werden.

Für jeden einzelnen Messschrieb werden die Vorhersagefunktionen mit den jeweiligen Systemdaten und Randbedingungen bzw. Betriebsbedingungen ausgewertet. Auf die so erzeugten Stützstellen werden virtuelle Messkurven (entspricht dem Messschrieb) gefittet. Jeder der auf Basis der statistischen Daten erzeugten Messschriebe kann als virtuelle Prüfstandsmessung betrachtet werden.

4.1.1 Methodik zur Erzeugung einzelner virtueller Messdatenschriebe

Anhand der statistischen Vorhersagemodelle wird ein kompletter virtueller Messdatensatz erzeugt, mit dem anschließend eine MF-Parametrierung durchgeführt werden kann und so das fertig parametrierte virtuelle Reifenmodell entsteht. Zur Erzeugung der dafür notwendigen einzelnen virtuellen Messschriebe sind keine separaten Reifenmessungen mehr notwendig. Basis bilden die statistischen Vorhersageformeln und die aus dem Reifenprofilabdruck ermittelten Parameter des Reifens, für welchen der Datensatz erstellt werden soll.

Die virtuellen Messdaten werden als TYDEX-Dateien ausgegeben und gleichen Messdateien realer Messungen vom Prüfstand. So ist gewährleistet, dass gängige Werkzeuge, wie *MF-Tool* von *TNO*, für die finale Parametrierung der Reifenmodelle eingesetzt werden können.

Um aus den Vorhersageformeln virtuelle Messdaten in Form von Messkurven erzeugen zu können, werden aus den Vorhersagemodellen für vorgegebene Randbedingungen und Systemparametern (wie z.B. die Reifen-Shore-Härte oder die Fahrbahntemperatur) und Messparameter (wie z.B. Sturzwinkel oder die Radlast) Stützstellen ermittelt, auf die anschließend erneut die Magic Formula in ihrer Grundform angepasst wird.

Als Stützstellen werden die Parameter Steigung im Ursprung $St_{(0|0)}$, die Lage der Punkte Max , Pkt_U , Pkt_Q und Pkt_T , sowie die horizontale und

vertikale Verschiebung der gesamten Kurve S_h und S_v verwendet (vgl. Abschnitt 3.6.2, Abbildung 3.17 und Abschnitt 3.7.1, Abbildung 3.24 und Abbildung 3.25). Die Krümmungen der Kurven an den Punkten Kr_{Max} und Kr_{PktS} werden in diesem Prozessschritt nicht verwendet, da sich ein Fitting der MF auf Krümmungen nur mit großem Aufwand realisieren lässt und hier keinen signifikanten Vorteil bringt.

Jede Stützstelle wird mittels einer oder zwei Vorhersagefunktionen (vgl. Gleichung 3.39) festgelegt. Der Punkt Max wird z.B. durch den maximalen Reibwert als auch durch dessen Lage (Schlupf bzw. Schräglaufwinkel) definiert. Für die Erzeugung einer einzelnen virtuellen Messkurve werden folgende, in Tabelle 4.1 aufgelistete, Vorhersageformeln ausgewertet, mit denen die in Abbildung 4.1 gezeigten Hilfs- und Stützpunkte ermittelt werden. Die dargestellten Parameter A_y , B_y und D_y sind in Abschnitt 3.6.3 erläutert.

Die hier gezeigte Vorgehensweise bietet den Vorteil, dass die definierten Parameter, welche über die Vorhersageformeln ermittelt werden, eine klare Zuordnung zu Effekten zulassen. Anders als die Koeffizienten der Magic Formula sind die Abhängigkeiten der hier gezeigten Parameter einfach in der statistischen Auswertung zu berücksichtigen.

Für jeden Fahrbahntyp (Schnee, Eis und nasse Fahrbahn) wurde ein eigener Satz an Vorhersagemodellen ermittelt. Für die Erzeugung von Umfangskraft-Schlupf-Messkurven F_x sind 9 Formeln erforderlich. Da die horizontale bzw. vertikale Verschiebung S_h und S_v der Kennlinien bei Umfangskräften definitionsgemäß null sind, entfallen diese zwei Formeln. Bei den Umfangskräften wird außerdem in Antreiben und Bremsen untergliedert. Zur Erzeugung von virtuellen Messschrieben der Größen F_y , M_x und M_z werden jeweils 8 Formeln zur Berechnung der Stützpunkte benötigt. Somit ergeben sich 42 unabhängige Vorhersageformeln, die für die Erzeugung eines kompletten virtuellen Messdatensatzes notwendig sind.

Beim anschließenden Fitting der Magic Formula auf die Stützpunkte gelten folgende Prämissen: Die Höhe des Maximums der Kurve und die Steigung im Ursprung sowie die horizontale und vertikale Verschiebung werden als feste Größen vorgegeben. Es sind somit in der Magic Formula nur noch die Parameter C und E anzupassen.

Tabelle 4.1:

Zuordnung der einzelnen Vorhersageformeln, die zur Erzeugung der Stützpunkte der jeweiligen virtuellen Messkurve verwendet werden

Vorhersageformel	Virtuelle Messkurve					
	$F_{X,Antrieben}$	$F_{X,Bremsen}$	F_Y	M_X	M_Z	
S_h			■	■	■	
S_v			■	■	■	
Max	■	■	■	■	■	
x_{Max}	■	■	■	■	■	
$St_{(0 0)}$	■	■	■	■	■	
Pkt_U	■	■	■	■	■	
Δ_{QS}	■	■	■	■	■	
Δ_{TL}	■	■	■	■	■	
A_y	■	■				
B_y	■	■				
D_y	■	■				
Anzahl	9	9	8	8	8	Σ 42

Ein charakteristisches Merkmal der Magic Formula ist, dass die Steigung im Ursprung der Kurve nicht durch einen einzelnen Parameter beschrieben wird, sondern sich aus dem Produkt der Faktoren B , C und D , wie Gleichung 4.1 zeigt, berechnet. Um die Steigung direkt mit beim Fitting berücksichtigen zu können, wird nach Parameter B aufgelöst und in der Grundform der Magic Formula ersetzt (Gleichung 4.3). Die so umgeformte Magic Formula (Gleichung 4.3) besitzt nun nur noch die Parameter C und E als zu fittende Parameter. Diese Parameter werden anschließend auf die statistisch berechneten Stützstellen angepasst.

$$St_{(0|0)} = B \cdot C \cdot D \tag{4.1}$$

$$B = \frac{St_{(0|0)}}{C \cdot D} \tag{4.2}$$

$$Y(X) = D \sin \left\{ C \arctan \left[\frac{St_{(0|0)}}{C \cdot D} (x + S_h) \right] - E \left(\frac{St_{(0|0)}}{C \cdot D} (x + S_h) - \arctan \frac{St_{(0|0)}}{C \cdot D} (x + S_h) \right) \right\} + S_v \tag{4.3}$$

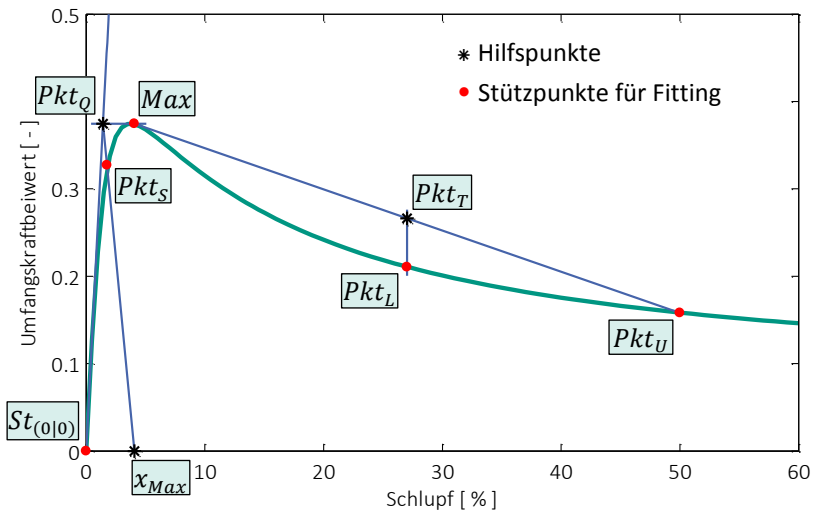


Abbildung 4.1:

Beispiel für das Fitting der Magic Formula an die (über die statistischen Vorhersagefunktionen berechneten) Stützpunkte zur Erzeugung einer virtuellen Messkurve

Auf diese Weise erhält man aus den statistisch berechneten Stützpunkten und Kennwerten eine angepasste MF-Kurve, die somit eine statistisch

berechnete Kennlinie eines Reifens bei gegebenen Systemparametern und Randbedingungen darstellt.

Abbildung 4.1 zeigt eine an die Stützstellen angepasste Magic Formula-Kurve, die mittels der statistischen Vorhersagefunktionen für eine Umfangskraft-Schlupf-Messung auf Schneefahrbahn berechnet wurden.

4.1.2 Erzeugung eines gesamten Messdatensatzes zur Magic Formula-Parametrierung

Mit so erzeugten einzelnen virtuellen Messkurven ist es möglich, den gesamten virtuellen Messdatensatz für die anschließende MF-Parametrierung des Gesamtmodells zu erzeugen. Die Erzeugung dieses Messdatensatzes erfolgt mittels des nachfolgend beschriebenen Schemas. Die virtuellen Messdatenschriebe basieren hierbei auf der statistischen Datenbasis und den folgend erläuterten Randbedingungen und Parametern.

Systemparameter und Randbedingungen

Für jeden virtuellen Messdatensatz, der sich aus mehreren Einzelmessungen zusammensetzt, werden globale Randbedingungen und Systemdaten vorgegeben, die für alle Einzelmessungen konstant bleiben. Dazu zählen beispielsweise die Umgebungstemperatur, Reifen- oder Fahrbahnkenngrößen.

Messabfolge

Wie bei realen Messungen wird auch die virtuelle Erzeugung von Messdaten in Messungen mit reiner Längs- und Querbelastung und kombinierter Belastung unterteilt. Zunächst werden reine Umfangskraft-Schlupf-Messungen generiert, anschließend reine Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Messungen. Abschließend werden die kombinierten Umfangskraft-Schlupf-Messungen bei festen Schräglaufwinkeln erzeugt.

Messparameter

Für jede virtuelle Einzelmessung werden separat die Messparameter Radlast, Schräglauf- und Sturzwinkel festgelegt. Die Umfangskraftmessungen sind in Antriebs- und Bremschlupf unterteilt.

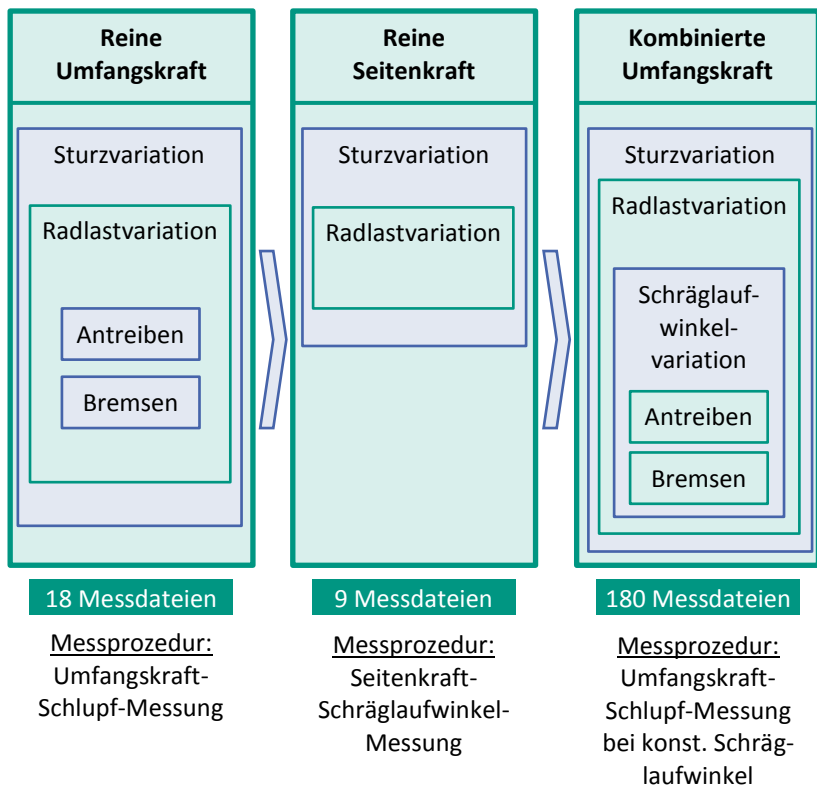
Insgesamt ergeben sich so für einen gesamten virtuellen Messdatensatz 207 Ergebnisdateien, welche die Grundlage der anschließenden Gesamtparametrierung des MF-Reifenmodells bilden. Abbildung 4.2 zeigt die Abfolge der einzelnen Messprozeduren und die jeweils veränderten Messparameter.

Ergebnisdaten

Da die Kurven als mathematische Funktion verfügbar sind, können für jeden Schlupf- oder Schräglaufwinkel die korrespondierenden Werte berechnet werden. Die Kurvendaten der Umfangskraft-Schlupf-Kurven werden in einem Bereich von -60% bis +60% Schlupf als TYDEX-Datei ausgegeben. Um den spitzeren Kurvenverlauf der Umfangskraft-Schlupf-Kurven darstellen zu können, werden die Datenpunkte zwischen -15% und +15% Schlupf mit einer Intervallbreite von 0,5% berechnet, betragsmäßig größere Schlupfwerte mit einer Intervallbreite von 1% Schlupf.

Seitenkraft-, Sturzmoment- und Rückstellmomentkurven werden in einem Schräglaufwinkelintervall von -7° bis $+7^\circ$ ausgegeben. Die Intervallbreite beträgt von 0° bis $\pm 1^\circ$ Schräglaufwinkel $0,01^\circ$, bis $\pm 4^\circ$ Schräglaufwinkel $0,1^\circ$. Bis zum maximalen Schräglaufwinkel von $\pm 7^\circ$ beträgt das Intervall $0,25^\circ$.

Durch die geringe Intervallbreite zu kleineren Schräglaufwinkeln, bzw. Schlupfwerten wird sichergestellt, dass die Kurvenform trotz des spitzen Kurvenverlaufs exakt abgebildet werden kann. Die größere Intervallbreite reduziert die Anzahl der Datenpunkte, so dass die Datenmenge reduziert wird.



Messparameter:

- Radlastvariation: $F_z = [40\%; 80\%; 100\%]$ der *ETRTO*-Radlast
- Sturzwinkelvariation: $\gamma = [-3^\circ; 0^\circ; 2^\circ]$
- Schräglaufwinkelvariation: $\alpha = [-6^\circ; -3^\circ; -2^\circ; -1^\circ; -0,5^\circ; 0,5^\circ; 1^\circ; 2^\circ; 3^\circ; 6^\circ]$
- Antriebsschlupf: $s = [0\% \dots 60\%]$
- Bremsschlupf: $s = [0\% \dots -60\%]$
- Schräglaufwinkelintervall: $\alpha = [-7^\circ \dots 7^\circ]$

Abbildung 4.2:

Übersicht der virtuellen Messdateien für die MF-Parametrierung

Datensatz zur Magic Formula-Parametrierung

Die berechneten Daten werden gemäß der TYDEX-Vorgaben als *.tdx-Dateien abgespeichert. Zusätzlich zu den Daten ist es für das anschließende Magic Formula-Fitting erforderlich, dass im Header die virtuellen Messbedingungen und weitere Informationen zur Verfügung stehen. Abbildung A.1 im Anhang zeigt beispielhaft den Header einer TYDEX-Ergebnisdatei für eine kombinierte Umfangskraft-Schlupfkurve bei konstantem Schräglaufwinkel.

Die virtuellen Messdaten-Dateien werden gesammelt in einem Ordner abgespeichert und bilden die Grundlage für die folgende MF-Parametrierung des Gesamtmodells, das dann anschließend für die Gesamtfahrzeugsimulation eingesetzt werden kann.

4.2 Erzeugung eines Magic Formula-Reifenmodells zum Einsatz in der Simulationsumgebung

Um ein für die Simulation einsetzbares Reifenmodell zu erhalten, müssen die virtuellen Einzelmessdaten gesamtheitlich zu einem Magic Formula-Reifenmodellparametersatz angepasst werden. Mit Hilfe des in der Industrie weit verbreiteten Programms *MF-Tool 6.2* der Firma *TNO* werden die finalen MF-Reifenmodelle generiert.

Um die Komplexität in beherrschbarem Umfang zu halten basieren die in dieser Arbeit beschriebenen statistischen Analysen auf der Magic Formula in ihrer Grundform. Das vollumfängliche Magic Formula-Reifenmodell, das für die Simulation eingesetzt wird besteht jedoch aus einem wesentlich umfangreicheren, komplexen Formelsatz. Die bei der statistischen Auswertung (bzw. bei der Erzeugung der virtuellen Messschriebe) ermittelten Parameter der Magic Formula (Grundform) sind hierbei nicht direkt in die umfassenden Magic Formula Gleichungen zu übersetzen, so dass ein

vollumfängliches Fitting über alle virtuellen Messschriebe notwendig ist, um das Simulationsmodell zu erzeugen.

Das Fitting besteht aus einem mehrstufigen Prozess, bei dem nacheinander alle Einzelparameter angepasst werden. Über diesen Prozess werden so im Rahmen dieses Forschungsprojekts Magic Formula-Reifenmodelle der Version 5.2 erzeugt.

Für das Fitting wird zunächst der gesamte Ordner mit den virtuellen Messdaten von *MF-Tool* eingelesen. Anhand der Vorgabeparameter in den TYDEX-Daten werden die Dateien automatisch den einzelnen Fitting-Ebenen zugeordnet. In mehreren Schritten werden nacheinander zuerst die Magic Formula-Parameter für die reinen Längs- und Querbelastungen ermittelt. Im Anschluss werden ausgehend von diesen Parametern die weiteren Parameter angepasst, welche für die Modellierung der kombinierten Kräfte und der Momente benötigt werden.

Nach dem Fittingprozess wird der gesamte MF 5.2-Parametersatz als standardisierte *.tir-Datei exportiert, welche direkt in die gängigen Fahr-dynamiksimulationen eingebunden werden kann. Die Datei beinhaltet sämtliche Informationen über das Reifenmodell und besteht aus einem Headerteil und einem Parameterteil.

Erzeugung von linken/rechten Reifen

Auf dem Innentrommelprüfstand am *KIT* werden die Reifen grundsätzlich in der Konfiguration als linker Reifen vermessen. Da die gesamte statistische Auswertung und Berechnung zur Erzeugung der virtuellen Messdaten in dieser Arbeit somit anhand eines linken Reifens erfolgt, werden die generierten Reifenmodelle grundsätzlich auch als linker Reifen exportiert. Deshalb ist es notwendig, für die Gesamtfahrzeugsimulation zusätzlich die äquivalenten rechten Reifen zu erzeugen.

Nun ist grundsätzlich zu unterscheiden, um welchen Reifentyp es sich handelt. Neben Reifen, welche laufrichtungsgebunden sind, gibt es Reifen, welche unabhängig von der Laufrichtung sind, jedoch eine definierte Außenseite haben. Laufrichtungsgebundene Reifen sind durch ein zur Reifermittenebene achssymmetrisches Profil und eine eindeutige Rotationsrichtung gekennzeichnet. Reifen mit definierter Außenseite besitzen eine asymmetrische Profilgestaltung und eine „Outside“-Kennzeichnung.

Am Reifen wirken Winkellagen- und Konuseffekte [Lei09], [Stu97]. Diese Effekte resultieren aus unterschiedlichen Lagenwinkeln in der Karkassenstruktur bzw. aus einem geometrisch nicht exakt zylindrischen Reifen. Die dadurch entstehenden aufsummierten Seitenkräfte sind dabei von der Laufrichtung des Reifens abhängig. Bei Reifen mit festgelegter Laufrichtung drehen linke und rechte Reifen während der Fahrt in dieselbe Richtung. Die Effekte sind dabei links und rechts identisch. Bei Reifen, die frei in der Laufrichtung sind, aber eine festgelegte Außenseite besitzen, drehen die Reifen auf der linken und rechten Fahrzeugseite bezüglich ihres Aufbaus in unterschiedliche Richtungen. Hier unterscheiden sich die aufsummierten Seitenkräfte durch diese Effekte. In Abbildung 4.3 sind die Effekte für Reifen mit einer festen Außenseite skizziert.

Während bei Reifen mit eindeutiger Laufrichtung in der Simulation keine Unterscheidung in den Modellparametern linker und rechter Reifen erfolgt, ist bei Reifen mit definierter Außenseite eine Anpassung einzelner Modellparameter aufgrund sich ändernder Konuseffekte notwendig. Gleichung 4.4 beschreibt hierbei die Umrechnung der Seitenkräfte von einem linken auf einen rechten Reifen. Die Größe des Konuseffekts F_{Kon} wird dabei aus Messungen am Prüfstand ermittelt. Der Reifen wird hierzu jeweils einmal vorwärts und einmal rückwärts gemessen, die halbe Differenz der Seitenkräfte entspricht hierbei der Seitenkraft aus dem Konuseffekt.

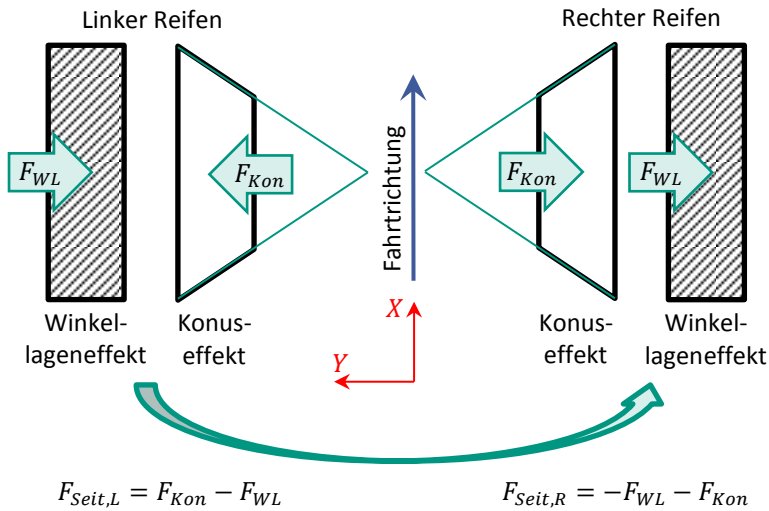


Abbildung 4.3:
Konuseffekt und Winkellageneffekt bei Reifen mit definierter Außenseite

$$F_{Seit,R} = F_{Seit,L} - 2 \cdot F_{Kon} \quad 4.4$$

Für Untersuchungen, bei denen der Einfluss der Nullseitenkräfte unterbunden werden soll, werden zusätzlich neutrale Reifen erzeugt. Hier werden sämtliche Ply-Steer-Faktoren im MF-Modell auf null gesetzt, so dass ein Reifen ohne Nullseitenkräfte erzeugt wird.

4.3 Validierung der statistischen Methodik zur Reifenmodellerzeugung

Um die hier vorgestellte Methodik zu validieren, wurden auf dem IPS Prüfstandsmessungen mit einem Validierungsreifen auf Schnee durchgeführt. Der in Abschnitt 3.4 beschriebene Reifen P wurde dafür auf der Schneefahrbahn gemessen und die Messdaten ausgewertet. Diese Daten dienen als Validierungsdatensatz. Die statistischen Vorhersagefunktionen, mit

denen die virtuellen Messdaten erzeugt werden, wurden zu Validierungszwecken ausschließlich auf Basis der drei in Abschnitt 3.4 beschriebenen Versuchsreifen B, D und N erzeugt (sie beinhalten keine Daten des Validierungsreifens) und dienen als Trainingsdatensatz (Trainingsset).

Mit den auf Basis des Trainingssets erzeugten Vorhersagefunktionen werden gemäß Abschnitt 4.1 virtuelle Messdaten für den Validierungsreifen (Reifen P, Validierungsset) erzeugt. Für jeden mit dem Validierungsreifen erzeugten Messschrieb wird hierzu ein virtueller Messschrieb anhand der statistischen Vorhersagefunktionen erzeugt. Die Eingangsgrößen in die Vorhersagemodelle entsprechen dabei für jede Messung exakt den Messbedingungen der realen Messung (z.B. Radlast oder Sturzwinkel). In die Vorhersageformeln aus dem Trainingsset gehen dabei Reifenparameter des Reifens P ein (z.B. Shore-Härte oder Dimension), um die Eigenschaften des Reifens auf der Schneefahrbahn abzubilden. Ein Teil der Reifenparameter wird dabei aus dem Reifenfootprint ermittelt, wie in Abschnitt 3.7.2 gezeigt ist.

Die virtuell erzeugten Messdaten werden anschließend mit den am Prüfstand gemessenen Daten verglichen. Abbildung 4.4 zeigt einen beispielhaften Auszug aus den Ergebnissen für eine Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Messung. In Abbildung 4.5 ist analog dazu eine Umfangskraft-Schlupf-Messung dargestellt. Ebenso wurden die Ergebnisse aus den kombinierten Manövern (Umfangskraft-Schlupf-Messung bei konstantem Schräglaufwinkel) betrachtet, wie Abbildung 4.6 zeigt. Insgesamt ist die Übereinstimmung der virtuell erzeugten Daten mit den real gemessenen als ausreichend gut zu bewerten. Als Kriterien werden hierfür das Bestimmtheitsmaß und das mittlere Fehlerquadrat heran gezogen. Im gezeigten Beispiel in Abbildung 4.4 werden ein R^2 von 1,00 und ein $RMSE$ von 0,01 erreicht.

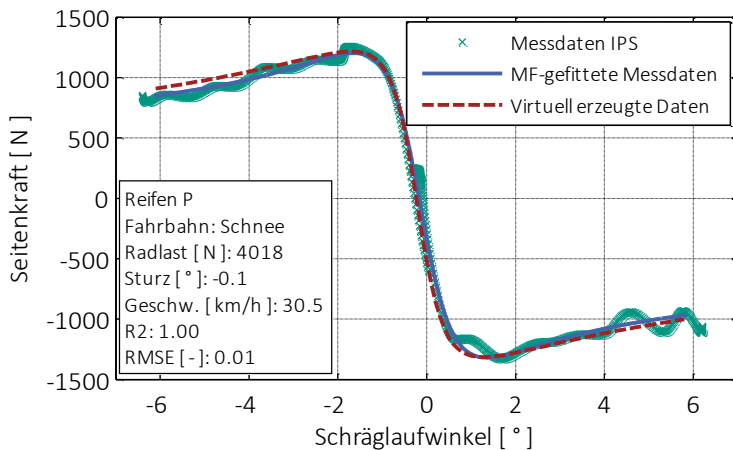


Abbildung 4.4: Vergleich IPS-Messdaten und virtuell erzeugte Messdaten (Validierungsreifen), reine Seitenkraft

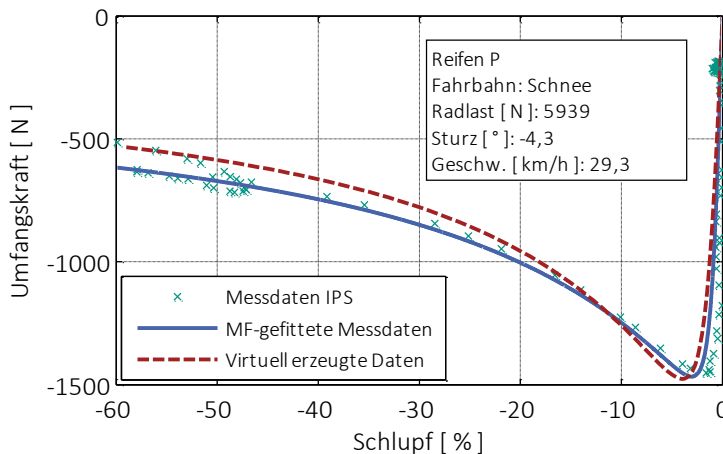


Abbildung 4.5: Vergleich IPS-Messdaten und virtuell erzeugte Messdaten (Validierungsreifen), reine Umfangskraft

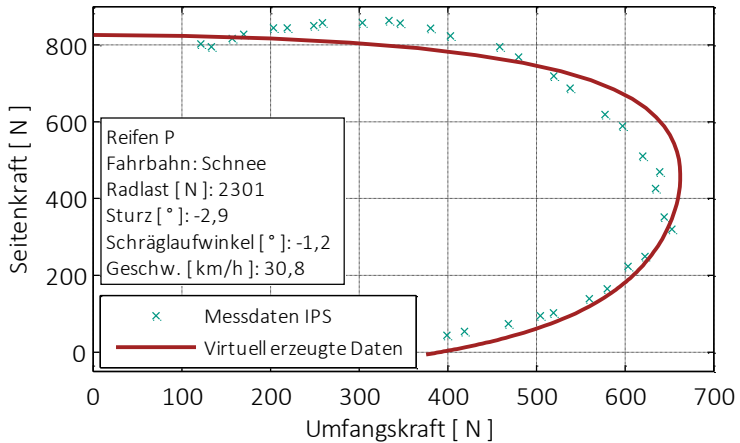


Abbildung 4.6:
 Vergleich IPS-Messdaten und virtuell erzeugte Messdaten (Validierungsreifen),
 kombinierte Kräfte

Die Ergebnisse aller Einzelmessungen mit dem Validierungsreifen wurden zusammengefasst und gesammelt ausgewertet. Abbildung 4.7 zeigt die Validierungsergebnisse anhand von Histogrammen. Die Graphen zeigen die Verteilung der mittleren quadratischen Abweichung (*RMSE*) über die verglichenen Messschriebe. „N“ bezeichnet die Stichprobengröße, „Mean“ den Mittelwert der Ergebnisse. „Upper 95% Mean“ gibt den Wert an, bei welchem sich mindestens 95% der Ergebnisse unterhalb befinden. „Lower 95% Mean“ gibt den Wert an, unter dem lediglich 5% der Ergebnisse liegen.

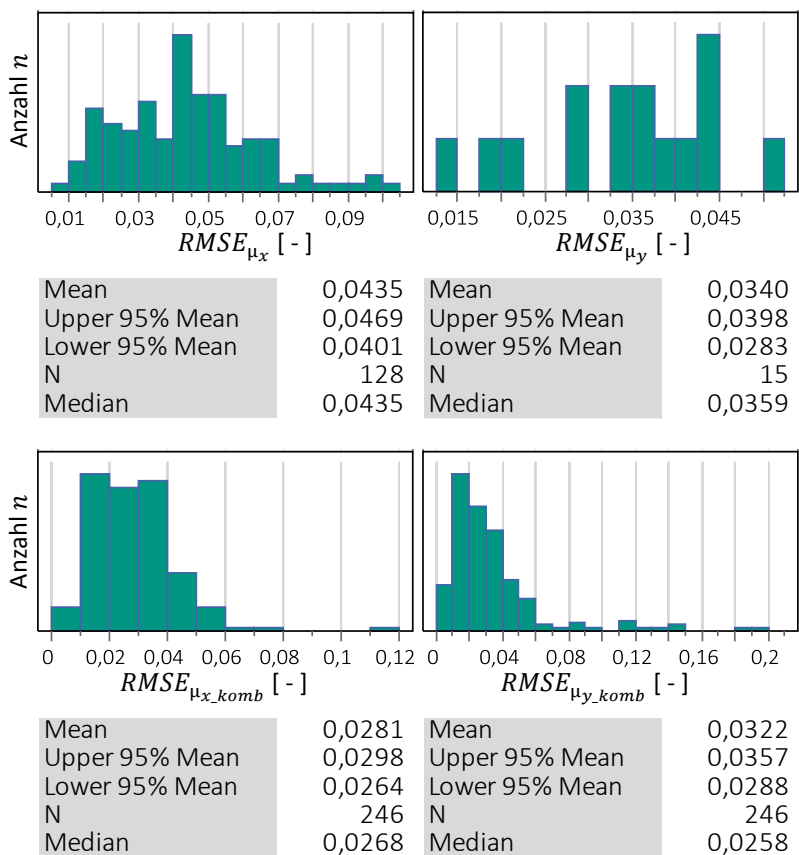


Abbildung 4.7:

Zusammenfassung der Validierungsergebnisse (mittlere Abweichung (**RMSE**) des Reibwerts). Vergleich der Prüfstandsmessungen des Validierungsreifens mit virtuell erzeugten Messschrieben (Histogramme).

oben links: reine Umfangskraftmessungen, oben rechts: reine Seitenkraftmessungen
 unten: kombinierte Umfangskraft-Schlupf-Messungen (links: in Umfangskraftrichtung, rechts: in Seitenkraftrichtung)

Die mittlere Abweichung des Reibwerts (Differenz zwischen realem und virtuellem Messschrieb) einer Messung bewegt sich hier im Median über alle Validierungsmessungen je nach Messprozedur zwischen 0,026 und 0,043. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich der Validierungsreifen bzgl.

seiner Dimension und Eigenschaften stark von den anderen Versuchsreifen unterscheidet. Der Prädiktion auf den hier gewählten Validierungsreifen sind durch die dadurch notwendige Extrapolation in den Vorhersagefunktionen Grenzen gesetzt. In diesem Fall wird besonders bei der Reifendimension und Profilgestaltung extrapoliert. Die Vorhersagegüte auf den Validierungsreifen ist dadurch reduziert. Die, trotz dem Hintergrund der Modellextrapolation, guten Ergebnisse zeigen allerdings, dass eine Prädiktion auf die Reifencharakteristik anderer Reifen mit der in dieser Arbeit gezeigten Methodik grundsätzlich möglich ist.

Man sieht, dass die Vorhersagequalität maßgeblich von den verschiedenen Reifen abhängt, anhand derer das statistische Modell erzeugt wurde. Ziel für künftige Messungen ist es deshalb, die Spreizung in den Reifeneigenschaften der Versuchsreifen, mit welchen das statistische Modell erzeugt wird, so groß wie möglich zu gestalten. Dadurch basiert das statistische Modell auf einer größeren Datenbasis. Die Prädiktionsqualität erhöht sich dadurch maßgeblich. Die Methodik wurde mit dem Grundsatz der Erweiterbarkeit entwickelt, deswegen ist es möglich weitere Reifenmessungen in die statistischen Modelle mit einzubinden. Mit jedem weiteren Reifen, der mit in die Statistik einfließt steigert sich so die Prädiktionsqualität.

4.4 Implementierung eines Softwarewerkzeugs zur Erzeugung von Reifenmodellen

Die anhand der hier gezeigten Methodik ermittelten statistischen Vorhersagefunktionen und die für die Erzeugung von virtuellen Messdatensätzen notwendigen Schritte wurden in ein *MATLAB*-basiertes Softwaretool (*FAST Virtual Tyre Generator*) integriert. Über eine Eingabemaske (Abbildung 4.8) können alle notwendigen Einstellungen vorgenommen und in wenigen Schritten der virtuelle Messdatensatz generiert werden. In die Software sind ebenfalls die in Abschnitt 3.7.2 erläuterte Erzeugung

und Auswertung von grafischen Reifenfootprints und die automatische Erzeugung von rechten und neutralen Reifen (vgl. Abschnitt 4.2) implementiert.

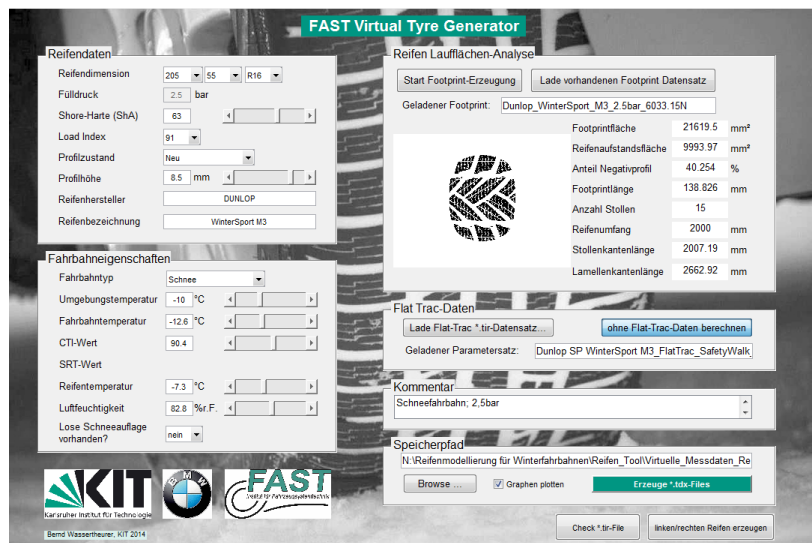


Abbildung 4.8:
Eingabemaske des *FAST Virtual Tyre Generator*

Um mit der Software virtuelle Messdatensätze erzeugen zu können, ist außer der *MATLAB*-Lizenz als Minimalvorgabe nur ein gemäß Abschnitt 3.7.2 erzeugtes Reifenfoto oder ein Bild eines realen Reifenfootprints notwendig. Um die Qualität der erzeugten Datensätze zu verbessern kann zusätzlich ein MF-Datensatz, der anhand einer *Flat-Trac*-Messung parametrisiert wurde, eingelesen werden.

Über Eingabefelder und Schieberegler müssen die gewünschten Vorgabeparameter, wie z.B. die Fahrbahnoberfläche, Temperatur oder Schneehärte, eingestellt werden. Diese Parameter werden in den hinterlegten statistischen Vorhersagefunktionen als Eingangsgrößen verwendet. Je

nach gewähltem Fahrbahntyp sind nur die jeweils passenden Parameter aktiv geschaltet. Die einstellbaren Werte der Parameter sind auf die jeweiligen maximalen Wertebereiche aus den Messungen, mit welchen die Vorhersagefunktionen erzeugt wurden, beschränkt, um Extrapolationen in den Vorhersagefunktionen zu vermeiden. In der Grundeinstellung stehen die Parameter auf den jeweiligen Mittelwerten aus den Messungen, mit welchen die Vorhersagefunktionen erzeugt wurden.

Der virtuelle Messdatensatz wird automatisch als TYDEX-Daten in den gewählten Ordner abgespeichert und kann anschließend direkt mit *MF-Tool* zur MF-Parametrierung verwendet werden. Die final parametrieren Magic Formula-Reifenmodelle können mit dem integrierten Überprüfungs-Tool „*Check *.tir-File*“ anschließend grafisch verifiziert werden. Nach der Auswahl des *.tir-Files werden automatisch 2D-Plots, wie Umfangskraft-Schlupf-Kurven bei verschiedenen Radlasten oder verschiedene 3D-Plots erzeugt. Abbildung 4.9 zeigt beispielsweise einen damit erzeugten Plot zur Verifikation der Ergebnisse.

Mit Hilfe der im Zuge dieser Arbeit entwickelten Software ist eine einfache Erzeugung von Reifensimulationsmodellen für die Fahrdynamiksimulation auf winterlichen Fahrbahnoberflächen möglich. Auf Basis der im Rahmen dieser Arbeit entstandenen statistischen Datengrundlage ist eine Erzeugung der Reifenmodelle auch mit nur wenigen reifenspezifischen Inputs möglich, so dass aufwändige Reifenmessungen entfallen können. Die Methode der Erzeugung eines virtuellen Messdatensatzes inklusive anschließendem Magic Formula-Fitting mittels *MF-Tool* hat sich hierbei als praxistauglich gezeigt.

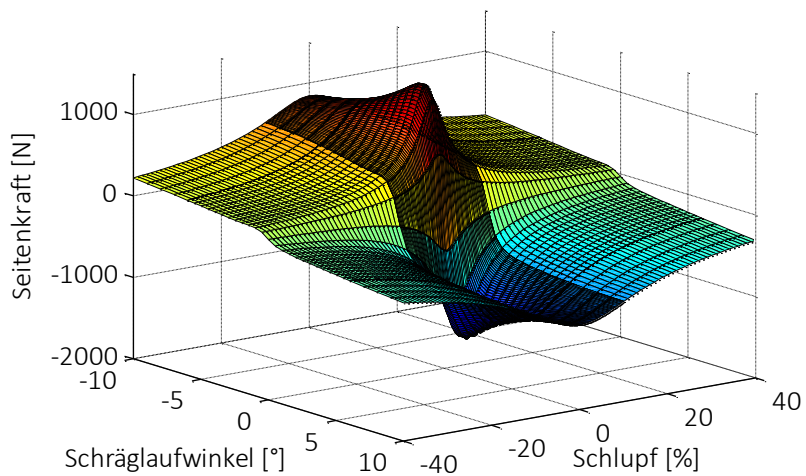


Abbildung 4.9:

Dreidimensionale Darstellung von angepassten Magic Formula-Kennlinien zur Verifikation der Reifenmodelle (Seitenkraft über Schräglaufwinkel / Schlupf)

5 Einsatz virtueller Winterreifenmodelle in der Simulation

Die erzeugten Reifensimulationsmodelle sind speziell für den Einsatz in der Fahrdynamiksimulation entwickelt worden, um die Reifeneigenschaften und somit auch das Fahrverhalten von Fahrzeugen auf winterlichen Fahrbahnoberflächen darstellen zu können. Die im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Reifenmodelle werden für diverse Einsatzzwecke in der Simulation eingesetzt. Einige Einsatzmöglichkeiten sowie einen Vergleich von unterschiedlich parametrisierten Reifenmodellen in der Simulation zeigt das folgende Kapitel.

5.1 Vergleich mit skalierten Reifenmodellen aus *Flat-Trac*-Parametrierungen

Für die Fahrdynamiksimulation ist das virtuelle Reifenverhalten von großer Bedeutung. Neben dem maximalen Reibwert ist der Kurvenverlauf der Reifenkennlinien für das Verhalten des Reifens ausschlaggebend. Die anhand der hier vorgestellten Methodik erzeugten Reifenmodelle besitzen die für die jeweilige winterliche Fahrbahn passenden Kennlinien. Die Skalierung von Reifen aus *Flat-Trac*-Daten stellt die heute übliche Methode Reifenmodelle für Niedrigreibwert zu erzeugen dar. Im Gegensatz zu den so herunterskalierten Reifen sind deutliche Unterschiede im Verlauf der Reifenkennlinien erkennbar.

Die folgenden Abbildungen zeigen Kennlinien, die aus der MF-Reifenparametrierung mit *Flat-Trac*-Daten ermittelt wurden. Diese Kennlinien wurden bezüglich des Reibwertmaximums bei 100% der *ETRTO*-Radlast

linear auf den Reibwert des virtuell erzeugten Reifens auf einer Schneefahrbahn herunterskaliert. In Seitenkraftfrichtung wurden die *Flat-Trac*-Kurven mit dem Faktor 0,31 skaliert, in Umfangskraftfrichtung mit dem Faktor 0,33. Neben den Kennlinien des skalierten *Flat-Trac*-Reifens zeigen die Diagramme die des virtuell erzeugten Reifens. Die hier gezeigten Daten sind die des Versuchsreifens B (vgl. Kapitel 3.4) auf Schnee.

In Abbildung 5.1 sind die Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennlinien für verschiedene Radlasten für den skalierten und den virtuellen Reifen aufgetragen. Besonders deutlich sind Abweichungen der Kennlinien in der Steigung im Ursprung (Cornering Stiffness) und im weiteren Verlauf nach dem Maximum zu erkennen. Der Schräglaufwinkel, bei dem die maximale Seitenkraft zu messen ist, liegt bei den skalierten Kennlinien wesentlich weiter in Richtung höherer Schräglaufwinkel.

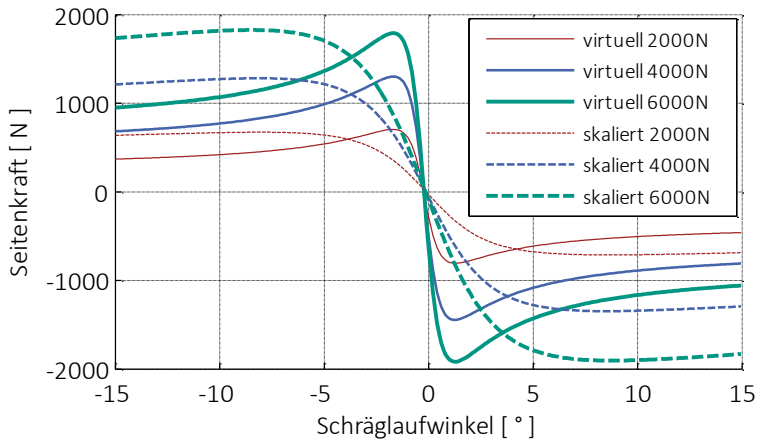


Abbildung 5.1:

Vergleich von Seitenkraftkennlinien skaliertener *Flat-Trac*-Reifen und virtuell erzeugter Reifen

Die in Abb. 5.2 dargestellten Kennlinien zeigen Umfangskraft-Schlupf-Messungen eines skalierten und eines virtuell erzeugten Reifens. Ebenso wie bei den Seitenkraftkennlinien fällt auf, dass die Schlupfsteifigkeit bei den

skalierten Reifen geringer ist und die Maxima weiter zu höheren Schlupfwerten verschoben sind. Bei den Umfangskraft-Schlupf-Kennlinien ist zusätzlich zu erkennen, dass es zwischen Antrieben und Bremsen deutliche Unterschiede gibt. Die Unterschiede der Reibwerte im Antriebs- und Bremsfall sind auf der hier dargestellten Schneefahrbahn wesentlich stärker ausgeprägt als auf der Fahrbahn mit *Safety-Walk*. In den virtuell erzeugten Reifenmodellen wird dies berücksichtigt, während dies bei den skalierten Reifen nicht der Fall ist.

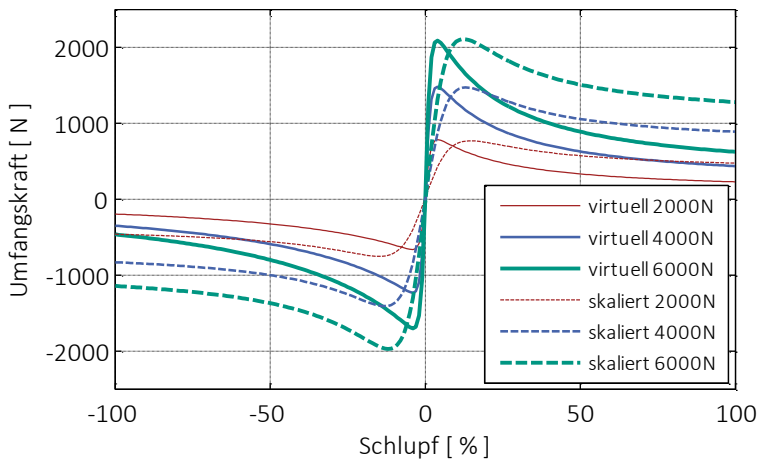


Abbildung 5.2:

Vergleich von Umfangskraftkennlinien skalierten *Flat-Trac*-Reifen und virtuell erzeugter Reifen

Die Gegenüberstellung von Reifenkennlinien von linear herunterskalierten Reifenmodellen mit Kennlinien von virtuell erzeugten Reifenmodellen zeigt deutliche Unterschiede. Die Kennlinien der virtuellen Reifen entsprechen dabei den auf dem Innentrommelprüfstand gemessenen Kennlinien auf winterlichen Fahrbahnen. Die Kennlinien des skalierten Reifens weichen dabei bzgl. Umfangs- und Seitenkraft stark von den virtuellen Kennlinien ab. Die einfache lineare Skalierung von *Flat-Trac*-Reifenmodellen auf ein niedriges Reibwertniveau ist demnach nicht zielführend, da die

Handlingeigenschaften des Reifens auf Niedrigreibwert dadurch nicht korrekt nachgebildet werden (vgl. Abschnitt 2.2.5). Die virtuell erzeugten Reifenmodelle dagegen bilden die gesamte Reifencharakteristik für jede einzelne winterliche Fahrbahn (Schnee, Eis, nass) im Rahmen des jeweiligen Gültigkeitsbereichs bestmöglich ab und garantieren so ein valides Simulationsergebnis bei Simulationen auf Niedrigreibwert. Der Gültigkeitsbereich hängt dabei maßgeblich davon ab, wie groß die Datenbasis zur Erzeugung der statistischen Vorhersagefunktionen ist und innerhalb welcher Intervalle die Parameter während den Messungen eingestellt wurden.

5.2 Simulation der Fahrdynamik und des Regelsystemverhaltens auf winterlichen Fahrbahnen

Mit den virtuell erzeugten Reifenmodellen wird eine grundlegende virtuelle Absicherung von Fahrdynamikregelsystemen auf winterlichen Fahrbahnen ermöglicht, wie sie bereits auf Hochreibwert durchgeführt wird. Durch die hier gezeigte Methodik konnte die Qualität der so erzeugten Reifenmodelle soweit gesteigert werden, dass eine realistische Durchführung von simulativen Versuchsmanövern auf winterlichen Fahrbahnen ermöglicht wird.

Zur Absicherung der Funktionalität der Regelsysteme wurde im Rahmen dieser Arbeit ein reduzierter Manöverkatalog erstellt, welcher ausgewählte Fahrmanöver enthält, die zur Absicherung der Regelsystemfunktionen auf Niedrigreibwert ausreichen. Anhand der verschiedenen Manöver werden die einzelnen Regelfunktionen analysiert. Neben den klassischen Standardmanövern, bei denen beispielsweise maximales Beschleunigen und Verzögern simuliert wird, kommen unter anderem spezifische Manöver für die einzelnen Funktionen des Fahrzeugreglers zum Einsatz.

Die DSC-Funktion (Dynamic Stability Control) wird beispielsweise mittels einer an [Wir10] angelehnten Prüfprozedur getestet. Dabei handelt es sich um das Simulationsmanöver „Sinus mit Verweilen“ (Sine with Dwell, kurz SWD). Dabei wird bei einer konstanten Längsgeschwindigkeit in mehreren Schritten eine Lenkwinkelvorgabe in Sinusform mit einer Frequenz von 0,7Hz umgesetzt, bei der bei Erreichen des zweiten Amplitudenmaximums der Lenkradwinkel für 500ms gehalten wird (Abbildung 5.3). Dieser Test wird mehrmals mit steigender Lenkradwinkelamplitude durchfahren und die Reaktion des Fahrzeugs auf die DSC-Regeleingriffe ausgewertet.

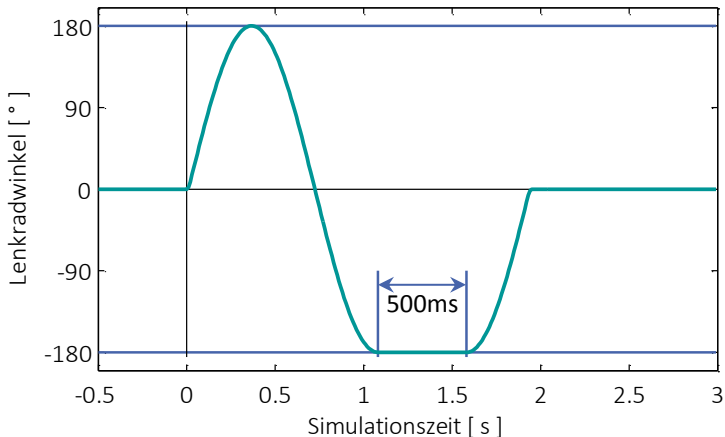


Abbildung 5.3:
Lenkradwinkelvorgabe beim Simulationsmanöver „Sinus mit Verweilen“
(„Sine With Dwell“, SWD, Bsp. 180° LRW)

Neben anderen Manövern ist es beispielsweise auch möglich, einen Spurwechsel nach ISO 3888-1 [Bri99] zu simulieren.

Die Simulation der genannten Manöver ermöglicht es, einen Applikationsstand der Fahrdynamikregelsysteme auf seine Leistung auf Niedrigreißwert zu beurteilen. Auf diese Weise wird eine frühzeitige und grundsätzliche Bewertung der Fahrdynamikregler-Abstimmung ermöglicht, ohne dass

im ersten Schritt reale Fahrmanöver auf winterlichen Fahrbahnen absolviert werden müssen. Oft herrscht in der Applikation des Fahrdynamikreglers ein Zielkonflikt zwischen der Abstimmung auf Hoch- und Niedrigreibwert. Mit Hilfe der Simulation kann so auf einfache Art und Weise ein Applikationsstand, der anhand realer Testfahrten auf Hochreibwert generiert wurde, simulativ auf dessen Funktion auf Niedrigreibwert getestet werden. Durch die eingesetzten Winterreifenmodelle wird somit eine jahreszeitunabhängige Basisbeurteilung der Abstimmung bzw. Applikation von Fahrdynamikregelsystemen auf Niedrigreibwert ermöglicht.

Abbildung 5.4 zeigt die Simulationsergebnisse eines SWD-Manövers auf Schneefahrbahn (CTI 90, Temperatur = -10°C) bei einer Längsgeschwindigkeit von 80km/h, einer Lenkwinkelamplitude von 60° , einer Frequenz von 0,7Hz und einer Haltezeit von 0,5s. In der Simulation wurden jeweils die mittels der in dieser Arbeit vorgestellten Methodik erzeugten Reifenmodelle verwendet.

Die Graphen links zeigen jeweils die Ergebnisse mit deaktiviertem, rechts die mit aktiviertem DSC-System. Die Simulation zeigt deutlich, dass das Fahrzeug bei dem hier simulierten Manöver ohne Regeleingriffe nicht mehr stabil bleibt. Der Schwimmwinkel β und die Gierrate $\dot{\psi}$ steigen (betragsmäßig) immer weiter, das Fahrzeug kann sich nicht mehr stabilisieren. In den rechts dargestellten Ergebnissen mit aktiviertem DSC erkennt man deutlich, wie durch Bremsingriffe das Fahrzeug wieder stabilisiert wird. Schwimmwinkel und Gierrate pendeln sich zum Manöverende wieder bei null ein.

Der Vergleich der Simulationen mit zwei unterschiedlichen Reifentypen zeigt zudem, dass auch die Reifencharakteristiken der „realen Reifen“ mittels der hier präsentierten Methodik erzeugten Reifenmodelle entsprechend abgebildet werden können. Der Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen mit dem Versuchsreifen N (Abbildung 5.4, oben) und Reifen B (unten) zeigt die unterschiedlichen Fahrzeugreaktionen. Reifen N ermöglicht hierbei etwas höhere Querbeschleunigungen und es zeigen

sich auch Unterschiede im Verlauf der Querbewegung des Fahrzeugs mit den verschiedenen Reifen.

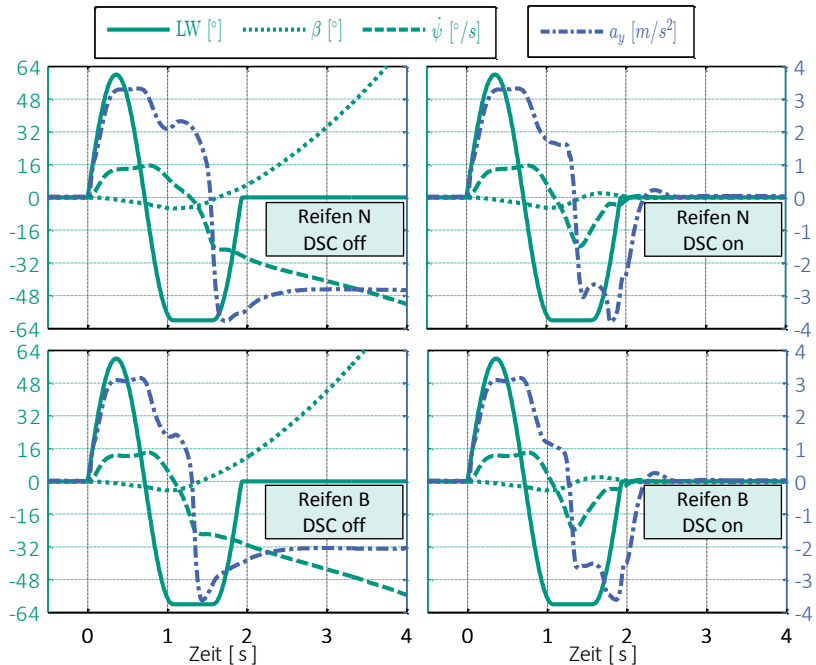


Abbildung 5.4:
Simulationsergebnisse mit und ohne DSC-Regelsystem
(SWD, $v = 80 \text{ km/h}$, LWA = 60° , $f = 0,7 \text{ Hz}$, $t_{halt} = 0,5 \text{ s}$)

Zur Ermittlung von fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs auf winterlichen Fahrbahnen ist es mit den Reifenmodellen ebenso möglich, Standard-Fahrmanöver zu simulieren. Um die Über- bzw. Untersteuertendenz sowie die maximale Querbewegung ermitteln zu können, eignet sich beispielsweise die quasistationäre Kreisfahrt. Folgendes Beispiel (Abbildung 5.5) zeigt Ergebnisse einer Simulation einer Kreisfahrt auf Schneefahrbahn auf einem Radius von 40m. Dargestellt ist der Lenkwinkel über der horizontalen Querbewegung. Aus dieser Darstellung

lassen sich das Eigenlenkverhalten und der Eigenlenkgradient (EG) ermitteln [Hei13]. Es wird deutlich, dass das Fahrzeug über dem gesamten Querschleunigungsbereich untersteuernde Tendenz aufweist, da der EG im gesamten Bereich positiv ist. Die maximale Querschleunigung beträgt in diesem Fall $3,4 \text{ m/s}^2$.

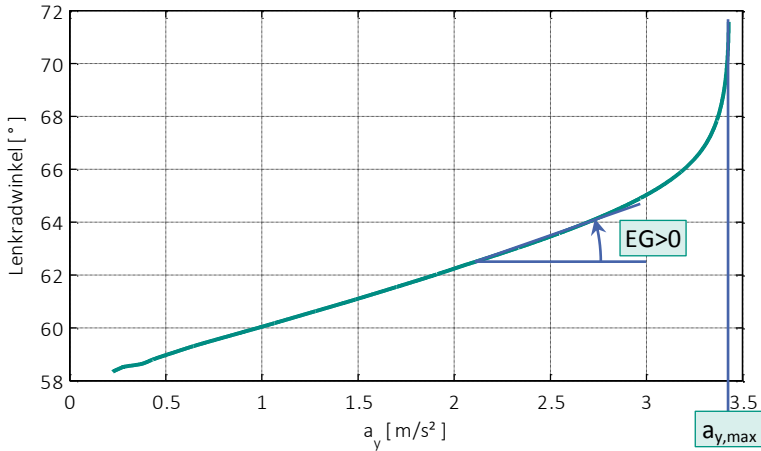


Abbildung 5.5: Simulationsergebnis einer quasistationären Kreisfahrt auf der Schneefahrbahn (konstanter Radius = 40m)

Es wird deutlich, dass sich die mittels der hier gezeigten Methodik erstellten Reifensimulationsmodelle dazu eignen, eine Bewertung von Fahrodynamik auf winterlichen Fahrbahnoberflächen in der Simulation durchzuführen.

5.3 Übertragbarkeit auf Messungen im Außenversuch

Um eine Bewertung der virtuell erzeugten Reifenmodelle durchführen zu können, ist es unabdingbar, die Ergebnisse mit realen Fahrzeugmessungen

zu vergleichen. Hierzu wurden Gesamtfahrzeugmessungen in Schweden durchgeführt. Das Versuchsfahrzeug, die Messtechnik und Sensorik wurden hierbei im Rahmen dieser Forschungsarbeit von *BMW* zur Verfügung gestellt.

5.3.1 Ermittlung von Messdaten im Außenversuch

Testgelände und Fahrbahnen

Die Gesamtfahrzeugmessungen fanden auf Testgeländen in Schweden statt. Die Prüfgelände befinden sich auf zugefrorenen Seen, auf denen die verschiedenen Teststrecken für Gesamtfahrzeugerprobungen präpariert werden. Zur Verfügung standen großzügig angelegte Fahrdynamikstrecken, ein kleiner und großer Kreis (jeweils mit Schnee- und Eisoberflächen), sowie ein Handlingparcours auf Schneefahrbahn.

Die Fahrbahnen wurden für die Versuche speziell präpariert. Die so vorbereitete Fahrbahn ist vergleichbar mit einer geräumten Schneefahrbahn, die eine vom Verkehr festgefahrene, dünne Schneedecke besitzt (hard packed snow). Die Höhe, der auf der aufgerauten Eisoberfläche befindlichen Schneeoberfläche, variierte zwischen 5mm und 10mm.

Während den Messfahrten auf dem Testgelände wurden sämtliche Fahrbahn-, Wetter- und Umgebungsbedingungen dokumentiert. Zusätzlich stehen Messdaten, welche stündlich aufgezeichnet werden, von der nahegelegenen Wetterstation in Arvidsjaur zur Verfügung.

Versuchsfahrzeug und Messtechnik

Die Messfahrten in Schweden wurden mit einem BMW 1er (F20, 116d EfficientDynamics Edition) durchgeführt. Das zur Verfügung stehende Gesamtfahrzeug-Simulationsmodell für diesen Fahrzeugtyp bietet eine solide Basis für die simulative Bewertung der Reifenmodelle. Die ausgewählten Versuchsreifen (Abschnitt 3.4) sind kompatibel zu diesem Fahrzeug.

Das eingesetzte Fahrzeug wurde mit umfangreicher Sensorik und Messtechnik ausgerüstet, so dass damit Messdaten für die Validierung der Versuchsreifen aufgezeichnet werden konnten.

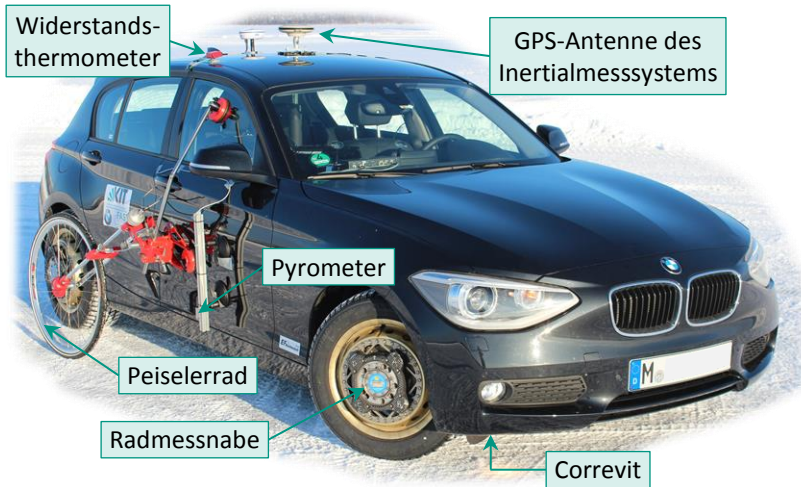


Abbildung 5.6: Messfahrzeug mit applizierten Radmessnaben, Peiselerrad, Fahrbahn-Pyrometer, GPS-Antennen, Correvit-Sensor und Temperatursensor

Zur Erfassung der Radkräfte und -momente in allen drei Raumrichtungen kommen 6-Komponenten-**Radmessnaben** mit Piezo-Technik zum Einsatz. Um das Fahrzeugverhalten bei den Versuchen aufzeichnen zu können, wurde ein **Inertialmesssystem** in das Fahrzeug integriert. Das Faserkreisel-system misst während der Messfahrt alle Bewegungen des Fahrzeugs. Neben den horizontalen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen in allen drei Raumrichtungen werden Schwimm-, Wank- und Nickwinkel sowie deren zeitliche Ableitungen gemessen.

Zur erweiterten Analyse ist bei reinen längsdynamischen Manövern zur exakten Bestimmung der Fahrzeuggeschwindigkeit seitlich am Fahrzeug

ein **Peiselerrad** angebracht. Ein zusätzlicher **Correxit-Sensor** ermöglicht über optische Verfahren die Ermittlung des exakten Schwimmwinkels.

Die Umgebungstemperatur wird über ein **Widerstandsthermometer** gemessen. Zur Bestimmung der Fahrbahnoberflächentemperatur wird ein seitlich angebrachtes **Niedertemperatur-Pyrometer** eingesetzt.

Der Messrechner ist zudem mit dem **Fahrzeug-CAN-Bus** verbunden, so dass die für die Auswertung relevanten, fahrzeuginternen Größen, wie zum Beispiel der Lenkradwinkel, ebenfalls mit aufgezeichnet werden.

Im Anhang zeigt Abbildung A.5 die Bezugssysteme für das Gesamtfahrzeug und für die Räder am Beispiel des linken Vorderrads.

Ermittlung von Reifenkennlinien im Außenversuch

Die Ermittlung von Reifenkennlinien im Außenversuch gestaltet sich aufwändiger als Versuche auf dem Prüfstand. Wechselnde Umgebungsbedingungen und der Einfluss des Fahrers erschweren reproduzierbare Versuche. Zu beachten sind außerdem die Einflüsse der Radkinematik. Durch Einfeder- und Lenkbewegungen während der Manöver kommt es zu Veränderungen des Radsturz- und Vorspurwinkels, welche die Messungen beeinflussen, so dass die Aufzeichnung reproduzierbarer Reifenkennlinien mit stationären Randbedingungen (wie z.B. konstanter Sturzwinkel) im Außenversuch nicht möglich ist.

Bei der Durchführung der Messmanöver kommt es im Gegensatz zu Messungen am Prüfstand zudem vermehrt zu starken Radlaständerungen. Besonders bei querdynamischen Messungen sind die Radlastunterschiede sehr groß, so dass die Radlastdegression der Reifen bereits eine Rolle spielt und bei der Auswertung beachtet werden muss. Eine umfassende systematische Auswertung von Reifenkennlinien aus dem Außenversuch ist aufgrund der gebotenen Einschränkungen nicht zielführend. Die Messdaten werden deshalb ausschließlich zu Validierungszwecken verwendet.

Fahrmanöverkatalog

Für die Gesamtfahrzeugmessungen in Schweden wurde ein Fahrmanöverkatalog entwickelt, mit dem alle Fahrmanöver abgedeckt sind, die zur Reifenvalidierung und Reifencharakterisierung notwendig sind. Neben rein längsdynamischen Manövern, wie beispielsweise Beschleunigungsversuche oder Bremsungen innerhalb und außerhalb des ABS-Regelbereichs, wurden auch rein querdynamische Fahrversuche, wie beispielsweise Ramp Steer-Prozeduren, bei denen aus der Geradeausfahrt kontinuierlich der Lenkwinkel vergrößert wird, oder (quasi-) stationäre Kreisfahrten durchgeführt. Zur Ermittlung von Messdaten mit kombinierten Belastungen am Rad wurden Manöver mit kombinierten Längs- und Querkraften, wie Beschleunigen oder Bremsen in der Kurve, gefahren. Zusätzlich wurden weitere Manöver gefahren, wie beispielsweise das Umfahren des Handlingkurses oder ein kontrolliertes Übersteuern.

Die Manöver wurden in den verschiedenen DSC-Modi (DSC, DTC und off) durchgeführt. Ein Überblick des gesamten Manöverkatalogs befindet sich im Anhang in Tabelle A.2.

5.3.2 Auswertung der Messdaten

Da im Versuch eine Messung der Schräglaufwinkel an den einzelnen Rädern nicht möglich war, wurden diese im Nachhinein über eine Näherung anhand des Einspurmodells ermittelt. Abbildung 5.7 zeigt das Einspurmodell mit den verwendeten Größen. Die in der Skizze eingetragenen Größen sind positiv orientiert.

An der Hinterachse wird gemäß Gleichung 5.2 mit Hilfe des Schwimmwinkels β , der Fahrzeuggeschwindigkeit v_{FzG} , und der Gierrate $\dot{\psi}$ über den Abstand der Hinterachse zum Schwerpunkt l_h der Schräglaufwinkel α_h berechnet. Der Schräglaufwinkel α_v der Reifen an der Vorderachse wird entsprechend Gleichung 5.1 berechnet.

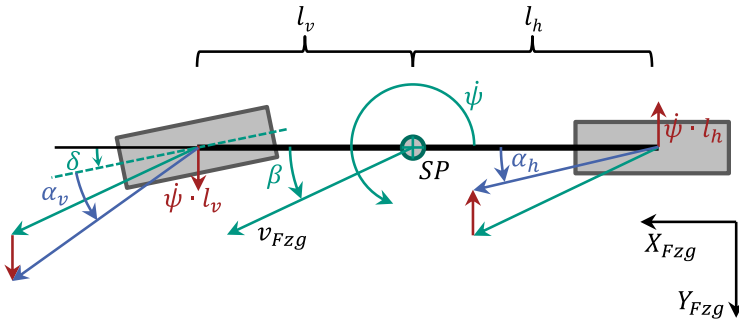


Abbildung 5.7:
Ermittlung der Schräglaufwinkel am Einspurmodell

$$\alpha_v = -\delta - \overbrace{\arctan\left(\frac{v_{Fz,g} \cdot \sin(\beta) + l_v \cdot \dot{\psi}}{v_{Fz,g} \cdot \cos(\beta)}\right)}^{\beta_v} \quad 5.1$$

$$\alpha_h = -\arctan\left(\frac{v_{Fz,g} \cdot \sin(\beta) + l_h \cdot \dot{\psi}}{v_{Fz,g} \cdot \cos(\beta)}\right) \quad 5.2$$

Mit Hilfe dieser Näherung können auch ohne unmittelbare Messung des Schräglaufwinkels Reifenkennlinien in lateraler Krafrichtung erzeugt werden, wie beispielsweise in Abbildung 5.8 dargestellt. Hierbei ist jedoch zu erwähnen, dass sich im Fahrzeug die realen Radlenkwinkel links und rechts geringfügig unterscheiden. Der mittels dieser Näherung bestimmte Schräglaufwinkel stellt eine Mittelung dar, da der Radlenkwinkel δ aus dem Lenkradwinkel und der Lenkübersetzung gebildet wird.

Um Messrauschen und eventuelle Störeinflüsse zu reduzieren, wurden die aufgezeichneten Messdaten vor der Auswertung tiefpassgefiltert und off-setbereinigt.

5.3.3 Validierung der Simulationsergebnisse anhand realer Messdaten

Zur Validierung der mittels der hier beschriebenen Methodik erzeugten Reifenmodelle, werden die mit den Radmessnaben im Außenversuch aufgezeichnete Messdaten mit virtuell erzeugten Kennlinien verglichen. Hierzu eignen sich in Seitenkraftrichtung besonders die quasistationären Manöver wie die „quasistationäre Kreisfahrt“, in Längsrichtung vor allem die Beschleunigung- und Bremsmanöver „maximales Beschleunigen“ und „ABS-Bremung“ (vgl. Tabelle A.2 im Anhang). Abbildung 5.8 zeigt einen beispielhaften Vergleich für Seiten- und Umfangskraft-Kennlinien.

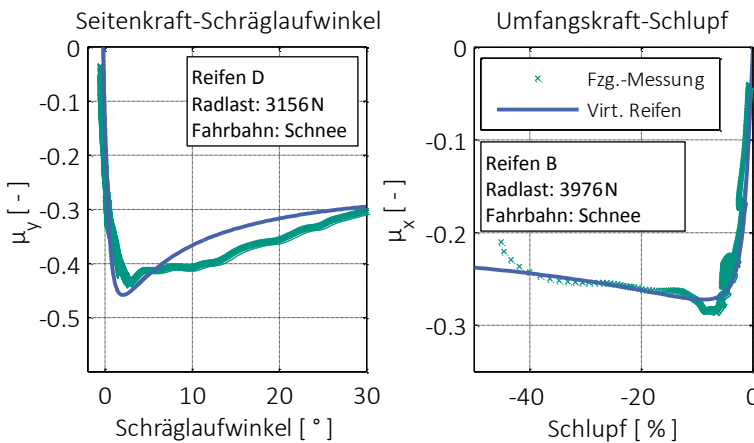


Abbildung 5.8:

Vergleich von real gemessenen Reifenkennlinien im Außenversuch mit virtuell erzeugten Reifen

links: Seitenkraftkennlinie von Reifen D; rechts: Bremskraftkennlinie von Reifen B

Es zeigt sich, dass die Kennlinien vom Außenversuch gegenüber virtuell erzeugten bezüglich des Reibwerts sehr ähnliche Ergebnisse liefern. Die Kennlinien im Außenversuch zeigen nach dem Maximum grundsätzlich einen geringeren Abfall des Reibwerts, verglichen mit den virtuellen Reifen.

Dies ist mit der unterschiedlichen Fahrbahnbeschaffenheit zu begründen. Während es bei den Prüfstandsversuchen nicht möglich war, reproduzierbar eine lose Schneeschicht auf der Fahrbahn zu realisieren, war die reale Fahrbahn mit einer 5 mm bis 10 mm hohen Schneeschicht bedeckt. In Bereichen höherer Schlupfwerte, beziehungsweise Schräglaufwinkel, kommt hier der Effekt der Scherreibung (vgl. Abschnitt 2.1.2) vermehrt zum Tragen. Dadurch kommt es auf der realen Fahrbahn zu weniger Reibwertabfall nach dem Reibwertmaximum. Zudem ist erkennbar, dass die im Realversuch ermittelte Schräglaufsteifigkeit geringfügig niedriger ist, als die auf dem Prüfstand gemessene. Dies ist ebenso durch die Fahrbahnnunterschiede erklärbar. Auf der verdichteten Schneefahrbahn im IPS können sich über den Grabeffekt die Lamellenkanten besser verzahnen als auf der losen Schneeoberfläche im Außenversuch.

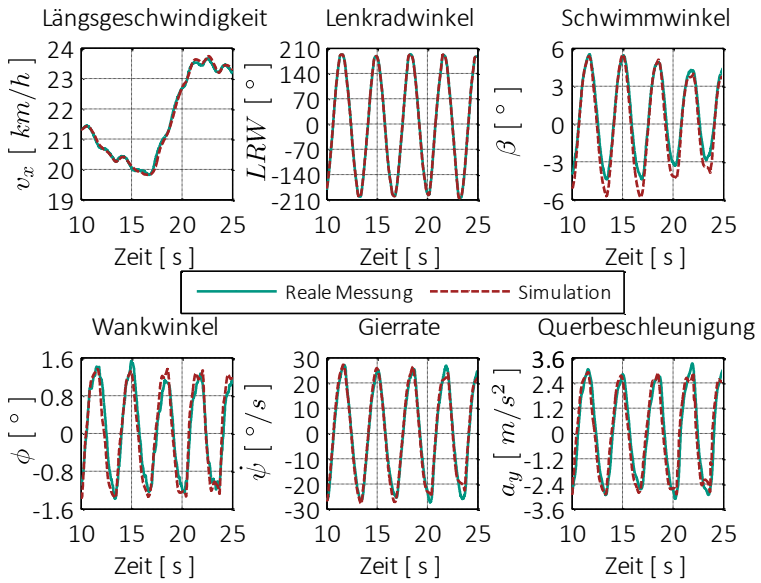
Auf Gesamtfahrzeugebene werden Ergebnisse aus der Simulation mit aufgezeichneten Daten aus den Realfahrten im Außenversuch verglichen. Die Simulationen wurden in der *BMW-Simulationsumgebung ISAR* durchgeführt. Grundlage bildet ein analytisches Zweispurmodell, das auf das Versuchsfahrzeug parametrisiert wurde. Das Fahrzeugmodell ist durch standardisierte Verifizierungs- und Validierungsprozesse bei *BMW* auf Hochreibwert validiert. In der Simulation werden als Eingangsgrößen die **Fahrzeuggeschwindigkeit** und der **Lenkradwinkel** aus dem Realversuch vorgegeben. Anschließend werden die Fahrzeugreaktionen aus der Simulation mit den Daten des Außenversuchs verglichen. Als Vergleichsgrößen wurden **Schwimmwinkel**, **Wankwinkel**, **Gierrate** und **Querbeschleunigung** ausgewählt.

In Abbildung 5.9 sind die Ergebnisse einer Validierungssimulation anhand eines Zeitausschnitts von 15 s dargestellt. Bei dem durchgeführten Manöver handelt es sich um „Sinuslenken“ mit einer Lenkradwinkelamplitude von $\pm 200^\circ$ und einer Fahrgeschwindigkeit von 20 km/h - 25 km/h. In der Simulation wird das Lenkradwinkelsignal direkt vorgegeben, die Fahrgeschwindigkeit wird über das Motor-Antriebsmoment eingeregelt.

In der Gegenüberstellung der gemessenen Daten mit der Simulation ist eine sehr gute Übereinstimmung zu erkennen. Wie bereits erläutert, stimmen die maximalen Reibwerte aus Simulation und Messung am Reifenprüfstand gut überein. Beim Vergleich der Gesamtfahrzeugreaktionen ist ebenfalls eine hohe Übereinstimmung in den Ergebnissen gegeben.

Die vorhandenen Abweichungen sind maßgeblich durch die inhomogenen Fahrbahnzustände bei den realen Fahrversuchen zu erklären, bei den Gesamtfahrzeugmessungen liegen somit keine idealen Bedingungen wie auf dem Prüfstand vor. Besonders auf Fahrbahnen mit Niedrigreibwert haben Schwankungen in der Fahrbahnbeschaffenheit einen gewissen Einfluss auf das Fahrzeugverhalten, so dass sich die geringen Unregelmäßigkeiten im Messergebnis niederschlagen und beim direkten Vergleich mit der Simulation sichtbar werden.

Basierend auf den Validierungsergebnissen wurde somit gezeigt, dass die Verwendung der, auf Basis der in dieser Arbeit gezeigten Methodik, parametrisierten Reifenmodelle zur Gesamtfahrzeugsimulation möglich ist.

**Abbildung 5.9:**

Validierung der Simulationsergebnisse mit Realdaten
Reifen: Versuchsreifen D, Fahrbahn: Schneefahrbahn

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Zunehmend kürzer werdende Entwicklungszyklen in der Automobilentwicklung erfordern auch in der Simulation eine Weiterentwicklung der Entwicklungswerkzeuge. So steht in Zukunft eine vermehrt simulationsbasierte Entwicklung und Absicherung von Fahrdynamikregelsystemen im Fokus. Neben Untersuchungen auf Hochreibwert, für die es bereits ausreichend gute Reifenmodelle gibt, werden Untersuchungen auf Niedrigreibwert zur Reduzierung der Entwicklungszeit und zur Qualitätssteigerung immer wichtiger. Fehlende valide Parametrierungen von Reifenmodellen für die Simulation auf winterlichen Fahrbahnen schränken bislang die Entwicklungsarbeit in diesem Bereich drastisch ein.

Um zukünftig auch im Bereich der Simulation auf Niedrigreibwert die Fahrzeugentwicklung zu stärken, wurde im Rahmen dieser Forschungsarbeit eine Methodik erarbeitet, welche die Erzeugung valider Winterreifen-Simulationsmodelle für die Fahrdynamiksimulation erlaubt. Hierzu wurden der Stand der Wissenschaft und Technik aufgearbeitet und darauf aufbauend eine Vorgehensweise entwickelt, welche auf Basis statistischer Methoden eine Identifikation der Reifencharakteristik auf den verschiedenen Schnee-, Eis- und nassen Fahrbahnen erlaubt. Die hierfür erforderlichen Messungen wurden unter Laborbedingungen auf dem Innentrommelprüfstand am *Karlsruher Institut für Technologie (KIT)* durchgeführt.

Mittels der anschließenden Messdatenauswertung wurden aus den Messschrieben auf der Basis von Magic Formula-Fittings statistisch auswertbare Messgrößen, wie beispielsweise Maxima, Steigungen und Kurvenkrümmungen, identifiziert. Zusätzlich wurde, um den Reifenprofileinfluss bewerten zu können, mittels grafischen Analysen von

Reifenprofilabdrücken weitere relevante Einflussfaktoren auf die Kraftübertragung ermittelt.

Mit den über lineare Regressionsanalysen ermittelten statistischen Vorhersagefunktionen werden Reifen- und Fahrbahncharakteristiken identifiziert und analysiert. Davon ausgehend werden virtuelle Reifenmessdaten für vorgegebene Randbedingungen, wie z.B. Schneehärte, Fahrbahntemperatur und Reifenprofilparameter, erzeugt. Mittels dieses virtuellen Messdatensets ist dann eine Erzeugung eines Magic Formula-Reifensimulationsmodells möglich, das in sämtlichen Fahrdynamiksimulationsumgebungen verwendet werden kann. Die mit dieser Methodik erzeugten Reifenmodelle wurden anschließend anhand realer Fahrzeugmessungen validiert.

Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik bietet die Möglichkeit, künftig auf effiziente Art und Weise Winterreifenmodelle für die Fahrdynamiksimulation auf winterlichen Fahrbahnen erzeugen zu können. Für die Erzeugung der Reifenmodelle wird neben einer Fotoaufnahme der Reifenlauffläche und den objektiven Reifenkenngrößen wie z.B. die Reifenbreite nur die Shore-Härte des Reifengummis benötigt.

Damit wird eine valide simulative Betrachtung der Fahrdynamik und die Applikation und Absicherung von Regelsystemen auch auf Niedrigreibwert möglich.

6.2 Ausblick

Nach Abschluss des Forschungsprojektes können aus den Erkenntnissen dieser Arbeit nachfolgende Forschungsschwerpunkte und -aspekte benannt werden, um weitere Fortschritte auf dem Gebiet der Fahrdynamiksimulation auf Niedrigreibwert zu machen. Zudem werden künftige Möglichkeiten der Simulation durch die nun verfügbaren Reifenmodelle erläutert.

Erweiterung der Simulationsmöglichkeiten in der Entwicklung

Die entwickelte Methodik zu Erzeugung virtueller Winterreifenmodelle kann künftig in der frühen Phase der Entwicklung Anwendung finden. So sind bereits vor ersten Erprobungen Aussagen über das Fahrverhalten und das Regelverhalten von Stabilitätssystemen auf winterlichen Fahrbahnen möglich. Eine vermehrt simulationsbasierte Fahrzeugentwicklung und die mittels der hier gezeigten Methodik kostengünstige Erzeugung von Reifensimulationsmodellen bieten eine Grundlage für viele zukünftige Einsatzmöglichkeiten im Rahmen der Grundausslegung und Absicherung von Fahrdynamik und Regelsystemen. Valide Winterreifenmodelle bieten nun die Möglichkeit weiterführender Untersuchungen und Entwicklungsaktivitäten in der Simulation. So werden künftig Untersuchungen zum Fahrverhalten auf Niedrigreißwert in den regulären Entwicklungsumfang Einzug halten und die Auslegung und Absicherung der Fahrdynamik und Regelsysteme unterstützen. Durch die Möglichkeit einer validen Gesamtfahrzeugsimulation auf winterlichen Fahrbahnen eröffnen sich weitere Möglichkeiten der simulativen Entwicklungsaktivitäten, wie z.B. virtuelle Funktionsabsicherung von Regelsystemen. Diese Reifenmodelle bilden so die Grundlage für den Ausbau simulationsbasierter Untersuchungen auf Niedrigreißwert.

Steigerung der Modellgüte

Im Rahmen dieser Arbeit waren die Untersuchungen auf wenige Versuchsreifen beschränkt. Einschränkungen ergeben sich folglich bei der Erzeugung von virtuellen Reifen, welche in ihren Eigenschaften stark von den gemessenen Reifen abweichen. Aufgrund zu starker Extrapolation der Reifeneigenschaften sind hier aktuell bzgl. der Reifenvielfalt noch Grenzen gesetzt. Weitere Prüfstandsmessungen mit Reifen, welche die Spreizung der Reifeneigenschaften vergrößern, würden zu einer Vergrößerung der Datenbasis und gleichzeitig zu einer Erhöhung der Modellgüte führen. Eine Fortführung und Ausweitung der Messungen ist daher zielführend.

Erweiterung auf weitere Fahrbahn- und Reifentypen

Das hier gezeigte Vorgehen ist analog auch auf weitere Fahrbahnen und Reifentypen erweiterbar und übertragbar. Neben Winterreifen wäre so auch der Aufbau einer Datenbasis für Sommerreifen und verschiedenen Fahrbahnen mit Hochreißwert denkbar.

Literaturverzeichnis

- [Ada10] ADAMSKI, D.: *Wie kommt der Autoreifen in den Rechner? — Aus der Sicht eines MKS-Berechners*. 3. Norddeutsches Simulationsforum, HAW Hamburg, Department für Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Hamburg, 2010.
- [Amm05] AMMON, D.: *Vehicle dynamics analysis tasks and related tyre simulation challenges*. In: *Vehicle System Dynamics*. Taylor & Francis, London, 2005, Bd. 43, S. 30–47.
- [Aro05] AROSIO, D. ET AL.: *Identification of Pacejka's scaling factors from full-scale experimental tests*. In: *Vehicle System Dynamics*. Taylor & Francis, London, 2005, Bd. 43, S. 457–474.
- [Aug97] AUGUSTIN, M.; UNRAU, H.-J.: *TIME — Final Report of Workpackage 2*. University of Karlsruhe, Karlsruhe, 1997.
- [Bac96] BACHMANN, T.: *Literaturrecherche zum Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1996, Bd. 286, ISBN 3-18-328612-2.
- [Ble11] BLEIMUND, F.: *Bisherige Arbeiten 29.08.2011: „Reifenmodellierung für Winterfahrbahnen“*, Private Kommunikation, München, 2011.
- [Bol06] BOLZ, G.: *Entwicklung eines Prüfverfahrens für Reifenmessungen auf Schnee im Labor*. Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Dissertation, 2006.
- [Bri99] British Standards Institution: *Personenkraftwagen. Pruefgasse fuer den Spurwechseltest. Doppelter Fahrspurwechsel*. British Standards Institution, DIN ISO 3888-1, 1999.

- [Bür12] BÜRCKERT, M.; GAUTERIN, F.; UNRAU, H.-J. Bundesanstalt für Straßenwesen: *Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Messverfahren*. Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven, 2012.
- [Cla81] CLARK, S. K. U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration: *Mechanics of Pneumatic Tires*. U.S. Government Printing Office, Washington D.C., 1981.
- [cos13] cosin scientific software: *FTire Parameterization — Proposed Measurement and Data Processing Procedures for Use with FTire/fit*. Onlinedokument: https://www.cosin.eu/res/ftire_param.pdf, Abrufdatum: 15.08.2015.
- [Cou09] COUTERMARSH, B. A.; SHOOP, S. A.: *Tire slip-angle force measurements on winter surfaces*. In: *Journal of Terramechanics*. Elsevier, 2009, Bd. 46, S. 157–163.
- [Dan13] DANKERT, J.; DANKERT, H.: *Technische Mechanik — Statik, Festigkeitslehre, Kinematik/Kinetik*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 7. Aufl., 2013.
- [DIN79] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Straßenfahrzeuge: 3-dimensionales Bezugssystem und primäre Bezugspunkte Definitionen*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, DIN ISO 4130, 1979.
- [Eic94] EICHHORN, U.: *Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn — Einflussgrößen und Erkennung*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1994, Bd. 222, ISBN 3-18-322212-4.
- [Ein10] EINSLE, S.: *Analyse und Modellierung des Reifenübertragungsverhaltens bei transienten und extremen Fahrmanövern*. Technische Universität Dresden, Institut für Mechanik und Mechatronik, Dresden, Dissertation, 2010.

- [Fis99] FISCHLEIN, H.: *Untersuchung des Fahrbahnoberflächen-einflusses auf das Kraftschlussverhalten von Pkw-Reifen*. Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Dissertation, 1999.
- [FKF15a] FKFS Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart: *Universeller Reibungsmesser (URM) des FKFS*. Onlinedokument:
http://www.fkfs.de/fileadmin/processed/csm_kfz_bild_8-2-3-1_de_d9990f7a0e.jpg, Abrufdatum: 14.08.2015.
- [FKF15b] FKFS Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart: *Radaufhängung des URM*. Onlinedokument:
http://www.fkfs.de/fileadmin/processed/csm_kfz_bild_8-2-3-2_de_f89484e264.jpg, Abrufdatum: 14.08.2015.
- [Fuk94] FUKUOKA, N.: *Advanced technology of the studless snow tire*. In: *JSAE Review*, 1994, Bd. 15, S. 59–66.
- [Fur93] FURUKAWA, Y.; ISHIKAWA, I.: *Direct evidence for melting transition at interface between ice crystal and glass substrate*. In: *Journal of Crystal Growth*, 1993, Bd. 128, S. 1137.
- [Gan11] GANDER, F.: *Softwaregestützte Auswertung von Reifen-Footprints*. Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Karlsruhe, Bachelorarbeit, 2011.
- [Gey72] GEYER, W.: *Der Einfluß geometrischer Reibflächen-Rauhigkeitsformen auf das trockene und nasse Reibverhalten von Gummi*. In: *Automobil Industrie*, Nr. 2/4, 1972.
- [Gie07] GIEßLER, M. ET AL.: *Influencing factors on force transmission of tires on snow tracks*. In: *VDI Berichte*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2007, S. 383–398.

- [Gie11] GIEBLER, M.: *Mechanismen der Kraftübertragung des Reifens auf Schnee und Eis*. Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Karlsruhe, Dissertation, 2011.
- [Göb09] GÖBEL, M.: *Potenzial der Radkraftmessung für fahrdynamische Regelsysteme*. TU Braunschweig, Institut für Fahrzeugtechnik, Braunschweig, Dissertation, 2009.
- [Hak15] HAKEN, K.-L.: *Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik*. Hanser, München, 2015, ISBN 978-3-446-44105-7.
- [Hei13] HEIßING, B.; ERSOY, M.: *Fahrwerkhandbuch — Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven*. Springer-Vieweg, Wiesbaden, 4. Auflage, 2013, ISBN 978-3-658-01991-4.
- [IAB15] IABG mbH: *IABG Firmenhomepage — Geschäftsfelder Automotive-Erprobung und Betriebsfestigkeit — Fahrwerk — Reifenprüfung*. Onlinedokument: <http://www.iabg.de/geschaeftsfelder/automotive/erprobung-und-betriebsfestigkeit/fahrwerk/reifenpruefung/>, Abrufdatum: 14.08.2015.
- [Ize08] IZENMAN, A. J.: *Modern Multivariate Statistical Techniques — Regression, Classification, and Manifold Learning*. Springer, Heidelberg, 2008, ISBN 978-0-387-78189-1.
- [Jag96] JAGT, P. V. D.; PARSONS, A. W.: *Road Surface Correction of Tire Test Data*. In: *Vehicle System Dynamics*. Taylor & Francis, London, 1996, Bd. 25, S. 147–165.
- [Kla99] KLAAS, A. ET AL.: *TIME, Tire Measurements — Eine neue Standardprüfprozedur für stationäre Reifen-Seitenkraftmessungen*. In: *Reifen — Fahrwerk — Fahrbahn*, (Hg. VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik). Hannover. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999, S. 119–137.

- [Kle11] KLEPPMANN, W.: *Taschenbuch Versuchsplanung — Produkte und Prozesse optimieren*. Hanser, München, 8. Auflage, 2011, ISBN 978-3-446-43791-3.
- [Kuh04] KUHA, J.: *AIC and BIC — Comparisons of Assumptions and Performance*. In: *Sociological Methods & Research*. Sage Publications, 2004, Bd. 33, S. 188–229.
- [Kum67] KUMMER, H. W.; MEYER, W. E.: *Verbesserter Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn — Ergebnisse einer neuen Reibungstheorie*. In: *ATZ*, 1967, Bd. 69, S. 382–386.
- [Kun06] KUNZ, J.; STUDER, M.: *Druck-Elastizitätsmodul über Shore-A-Härte ermitteln*. In: *Kunststoffe*. Hanser, München, 2006, S. 92–94.
- [Lei09] LEISTER, G.: *Fahrzeugreifen und Fahrwerkentwicklung — Strategien, Methoden, Tools*. Vieweg +Teubner Verlag, Wiesbaden, 1. Auflage, 2009, ISBN 978-3-8348-0671-0.
- [Lei15] LEISTER, G.: *THE ROLE OF TYRE SIMULATION IN CHASSIS DEVELOPMENT – CHALLENGE AND OPPORTUNITY*. In: *Proceedings of the 4th International Tyre Colloquium*, (Hg. Patrick Gruber and Robin S. Sharp). Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis, Guildford, Surrey, 2015, S. 1–10.
- [Mey07] MEYWERK, M.: *CAE-Methoden in der Fahrzeugtechnik*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2007, ISBN 978-3-540-49866-7.
- [Mey64] MEYER, W. E.; KUMMER, H. W.: *Die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn*. In: *ATZ*. Franckh'sche Verlagshandlung, Stuttgart, 1964, Bd. 66.
- [Mun95] MUNDL, R.; MESCHKE, G.; LIEDERER, W.: *Kraftübertragung von Profilstollen auf Schneefahrbahnen*. In: *VDI Berichte*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995, S. 79–99.

- [Nie15] NIEDERMEIER, F.: *Virtuelle Grundauslegung funktionaler Reifeneigenschaften im Auslegungsprozess Fahrdynamik*. Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Karlsruhe, Dissertation, 2015.
- [Oos99] OOSTEN, J. J. M. van et al.: *Standardization in Tire Modeling and Tire Testing — TYDEX Workgroup, TIME Project*. In: *Tire Science and Technology*. Allen Press Publishing Services, Lawrence KS, 1999, Bd. 24, S. 188–202.
- [Pac12] PACEJKA, H. B. Delft University of Technology — The Netherlands: *Tire and Vehicle Dynamics*. Elsevier/Butterworth-Heinemann, Amsterdam, 3. Auflage, 2012, ISBN 9781280581373.
- [Per13] PEREN, F. W.: *Formelsammlung Wirtschaftsstatistik*. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [Pro14] PROUST, M.: *JMP® 11 Design of Experiments Guide*, NC, USA, 2014.
- [SAS14] SAS Institute Inc.: *JMP® 11 Fitting Linear Models*, Cary, NC, USA, 2014.
- [Sch09] SCHMID, A.: *Vom realen zum virtuellen Reifen — Reifenmodellparametrierung*. In: *ATZ*. Springer Berlin, 2009, Bd. 111, S. 188–193.
- [Sch14] SCHRAMM, D.; HILLER, M.; BARDINI, R.: *Vehicle Dynamics*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [Set03] SETA, E.; KAMEGAWA, T.; NAKAJIAMA, Y.: *Prediction of Snow/Tire Interaction Using Explicit FEM and FVM*. In: *Tire Science and Technology*. Allen Press Publishing Services, Lawrence KS, 2003, Bd. 31, S. 173–188.

- [Sho93] SHOOP, S. A.: *Terrain Characterization for Trafficability*
US Army Corps of Engineers — Cold Regions Research &
Engineering Laboratory, 1993.
- [Ste07] STELAND, A.: *Basiswissen Statistik — Kompaktkurs für
Anwender aus Wirtschaft, Informatik und Technik*.
Springer, Berlin, Heidelberg, 2007, ISBN 978-3-540-74204-3.
- [Stu97] STUMPF, H.: *Handbuch der Reifentechnik*.
Springer, Wien, New York, 1997, ISBN 3-211-82941-5.
- [TAS15a] TASS International: *TASS Messanhänger und Zugfahrzeug*.
Onlinedokument:
http://www.tass-safe.jp/case_study_tno_project/Tyre.jpg,
Abrufdatum: 14.08.2015.
- [TAS15b] TASS International: *Radaufhängung TASS Reifen-
Messanhänger*. Onlinedokument:
[http://www.advancedsimtech.com/files/cache/18cabd2fa4f
74f3be639511499f8a756.PNG](http://www.advancedsimtech.com/files/cache/18cabd2fa4f74f3be639511499f8a756.PNG), Abrufdatum: 14.08.2015.
- [The12] The MathWorks Inc.: *MATLAB — The Language of Technical
Computing*. Onlinedokument:
[https://www.mathworks.com/products/datasheets/pdf/ma
tlab.pdf](https://www.mathworks.com/products/datasheets/pdf/matlab.pdf), Abrufdatum: 15.08.2015.
- [TNO08] TNO Automotive: *MF-Tyre & MF-Swift 6.1 User Manual*.
Onlinedokument:
[https://www1.ethz.ch/biomed.ee/intranet/support/madymo/
o/Tyremodels.pdf](https://www1.ethz.ch/biomed.ee/intranet/support/madymo/Tyremodels.pdf), Abrufdatum: 15.08.2015.
- [TNO13a] TNO: *Measurement requirements and TYDEX
file generation for MF-Swift 6.2* TNO, 2013.
- [TNO13b] TNO: *MF-Tyre & MF-Swift 6.2 — Equation manual*
TNO, 2013.

- [Unr12] UNRAU, H.-J.: *Der Einfluss der Fahrhahnoberflähenkrümmung auf den Rollwiderstand, die Cornering Stiffness und die Aligning Stiffness von Pkw-Reifen*. Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Karlsruhe, Dissertation, 2012.
- [Unr97] UNRAU, H.-J.; ZAMOW, J.: *TYDEX-Format — Description and Reference Manual*, Release 1.3. Onlinedokument: http://www.fast.kit.edu/download/DownloadsFahrzeugtechnik/TY100531_TYDEX_V1_3.pdf, Abrufdatum: 10.07.2012.
- [Was14] WASSERTHEURER, B.; GREINER, M. ET AL.: *Tyre wet testing on an indoor test bench — methodology and data analysis; International VDI Conference — EUROTyre*, Brüssel, 2014.
- [Was15] WASSERTHEURER, B.; GAUTERIN, F.: *Investigations on Winter Tire Characteristics on Different Track Surfaces Using a Statistical Approach*. In: *Tire Science and Technology*. Allen Press Publishing Services, Lawrence KS, 2015, Bd. 43, S. 195–215.
- [Wir10] Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa: *Regelung Nr. 13-H der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Personenkraftwagen hinsichtlich der Bremsen*. Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa, Berlin, Verwaltungsvorschrift ECE R13-H, 2010.
- [Xu12] XU, Q.: *Validierung eines geometrischen Modells zur Bestimmung des Reifenabdrucks*. Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Karlsruhe, Bachelorarbeit, 2012.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Die vier Reibungskomponenten der Gummireibung [Gey72]	4
Abbildung 2.2:	Abhängigkeiten der Adhäsionsreibung [Kum67]	5
Abbildung 2.3:	Anteile der Reibungsarten auf verschiedenen Schneefahrbahnen und Eis (nach [Fuk94])	8
Abbildung 2.4:	Einfluss des Profilnegativanteils auf den Reibwert auf Schnee und Eis [Set03]	10
Abbildung 2.5:	Einflüsse der Profilgestaltung auf die Reibkräfte auf Schnee und Eis (nach [Fuk94])	11
Abbildung 2.6:	Übersicht der Reifenmodelle für unterschiedliche Anwendungen [Amm05]	14
Abbildung 2.7:	links: <i>MTS Flat-Trac III CT</i> [Sch09]; rechts: Außentrommel-Flachbahn-Prüfstand am <i>KIT</i>	16
Abbildung 2.8:	Innentrommelprüfstand am <i>KIT</i> mit eingebauter Asphaltfahrbahn links: 3,8m-Trommel; rechts: Radführung	17
Abbildung 2.9:	oben: Reifen-Messanhänger von <i>TASS International</i> [TAS15a], [TAS15b]; unten: Reifen-Messfahrzeug Universeller Reibungsmesser (URM) des <i>FKFS</i> [FKF15a], [FKF15b]	18
Abbildung 2.10:	Vorgehen bei der Reifenparametrierung [Ada10]	21
Abbildung 3.1:	Schematische Übersicht d. Vorgehens zur Erzeugung virtueller Reifenmodelle	28
Abbildung 3.2:	Analyse des Versuchsplans für Nassmessungen auf Asphaltfahrbahn (kombinierte Umfangskraft-Schlupf-Messungen) mit dem Programm <i>JMP</i>	34
Abbildung 3.3:	Schematische Darstellung des IPS (links); Radführung (rechts)	35
Abbildung 3.4:	Wasserzuführung und Wasserhöhenmessung am Innentrommelprüfstand [Was14]	39

Abbildung 3.5:	Wiederaufbereitung der Asphaltfahrbahn (links) und Messung der Mikrorauigkeit bei Nassmessungen (rechts) [Was14].....	40
Abbildung 3.6:	Frisch eingewalzte Schneefahrbahn mit Walze (links); Fahrbahn kurz vor Ende der nutzbaren Schneeschicht (rechts) [Was15].....	41
Abbildung 3.7:	Schneehobel zur kontinuierlichen Fahrbahnkonditionierung	44
Abbildung 3.8:	Seitenkraftmessung am IPS ohne (links) und mit (rechts) automatischer Zustellung des Schneehobels (zweimaliges Durchfahren des Schräglaufweeps $\pm 6^\circ$).....	45
Abbildung 3.9:	Abgeschabte Eisfahrbahn (rau, unpoliert) im Innentrommelprüfstand des KIT [Was14].....	46
Abbildung 3.10:	Skizze zu den Koordinatentransformationen der verschiedenen TYDEX-Koordinatensysteme	48
Abbildung 3.11:	Messprozeduren zur Messdatenerfassung	53
Abbildung 3.12:	Schematische Darstellung des im Steuerrechner programmierten Schlupf- und Schräglaufwinkelverlaufs (Bsp. Messprozedur: gekoppelte Messung).....	55
Abbildung 3.13:	Normiertes Amplitudenspektrum für Seitenkraftbeiwerte einer Seitenkraftmessung	56
Abbildung 3.14:	Vergleich: Rohdaten und gefilterte Seitenkraftbeiwerte einer Eismessung	57
Abbildung 3.15:	Gewichtung der Datenpunkte bei Umfangskraft-Schlupf-Messungen	58
Abbildung 3.16:	Magic Formula-Fitting einer Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Messung (nach [Was15]).....	61
Abbildung 3.17:	Magic Formula-Fitting einer Umfangskraft-Schlupf-Messung.....	62
Abbildung 3.18:	Einfluss des MF-Parameters E : Werte $E < -1$ führen zu unrealistischer Krümmung zwischen Ursprung und Maximum	64

Abbildung 3.19: Bedeutung der Faktoren in Gleichung 3.24 bei kombinierten Umfangskraft-Schlupf-Messungen (exemplarisch)	66
Abbildung 3.20: Unterteilung des Koordinatensystems in Quadranten	67
Abbildung 3.21: Exemplarisches Fitting der Seitenkräfte bei kombinierten Umfangskraft-Schlupf-Messungen	68
Abbildung 3.22: Vergleich des Zusammenhangs von angepassten Seitenkraft- und Umfangskraftbeiwerten und gemessenen bei kombinierter Umfangskraft-Schlupf-Messung	69
Abbildung 3.23: Kumulierte Häufigkeitsverteilung der Fittingqualität (nach [Was15]).....	70
Abbildung 3.24: Analyisierte Kenngrößen am Beispiel einer Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Messung.....	72
Abbildung 3.25: Detailausschnitt aus Abbildung 3.24, Definition der Kenngröße ΔTL	72
Abbildung 3.26: Foto eines mit Kreide vorbereiteten Reifens mit Parametern zur Berechnung der abgewickelten Reifenlauffläche	77
Abbildung 3.27: Aus 2D-Foto generiertes 3D-Modell des Reifenlaufstreifens (Reifentopografie).....	78
Abbildung 3.28: Vergleich der statischen Vertikalsteifigkeitskennlinien von Reifen (205/55 R16) mit und ohne Notlaufeigenschaften (drucklos, ohne Ventil).....	79
Abbildung 3.29: Aus Reifenfoto erzeugter Reifenfootprint. Links: mit Lamellen, mitte: nach der Lamellenentfernung, rechts: identifizierte Lamellen (grün) und Profilblöcke (rot)	81
Abbildung 3.30: Aus Abbildung 3.29, rechts ermittelte Strukturfaktoren (relative, projizierte Kantenlängen) für Versuchsreifen N	82

Abbildung 3.31: Ermitteltes relatives Flächenträgheitsmoment (Summation der Einzel-FTMe der Lamellen bezogen auf die Footprintfläche) am Beispiel des Versuchsreifens N	84
Abbildung 3.32: Erzeugung von virtuellen Reifenmodellen über statistisch ermittelte Vorhersagefunktionen (=Datenbasis aus Messungen)	86
Abbildung 3.33: Vorhersagegüte des Gesamtmodells zur Ermittlung des Seitenkraftbeiwerts am Punkt Pkt_{ij} auf nasser Fahrbahn	91
Abbildung 3.34: Effekt-Einfluss-Diagramme	92
Abbildung 3.35: Vergleich der Einflussfaktoren auf die maximalen Umfangskraftbeiwerte für den Antriebsfall der verschiedenen Versuchsreifen auf der Schneefahrbahn.....	94
Abbildung 3.36: Vergleich der maximalen Umfangskraftbeiwerte (Antriebsfall) der Versuchsreifen auf Schneefahrbahn	95
Abbildung 3.37: Vergleich der maximalen Umfangskraftbeiwerte auf unterschiedlichen Fahrbahnen	97
Abbildung 3.38: Radlasteinfluss auf den maximalen Umfangskraftbeiwert	99
Abbildung 3.39: Einfluss der Mikrorauheit und der Schneehärte auf den maximalen Umfangskraftbeiwert	100
Abbildung 3.40: Einfluss der Temperatur auf den maximalen Umfangskraftbeiwert auf Schnee- und Eisfahrbahn	101
Abbildung 3.41: Schlupfsteifigkeit auf verschiedenen Fahrbahnen	102
Abbildung 3.42: Lage des Umfangskraftmaximums auf verschiedenen Fahrbahnen	104
Abbildung 3.43: Einfluss der Radlast auf die Lage des Umfangskraftmaximums	106

Abbildung 3.44: Einfluss der Schneehärte und der Umgebungstemperatur auf die Lage des Umfangskraftmaximums.....	107
Abbildung 3.45: Vergleich der Umfangskraftschlussbeiwerte bei 50% Schlupf.....	108
Abbildung 3.46: Einfluss der Mikrorauheit auf den Kraftschluss bei 50% Schlupf.....	109
Abbildung 3.47: Einfluss der Temperatur auf den Umfangskraftbeiwert bei 50% Schlupf	110
Abbildung 3.48: Vergleich der maximalen Seitenkraftbeiwerte auf unterschiedlichen Fahrbahnen	111
Abbildung 3.49: Einfluss der Radlast auf den maximalen Seitenkraftbeiwert.....	112
Abbildung 3.50: Einfluss der Mikrorauheit der nassen Asphaltfahrbahn auf den maximalen Seitenkraftbeiwert.....	113
Abbildung 3.51: Einfluss der Temperatur auf den maximalen Seitenkraftbeiwert auf Schnee- und Eisfahrbahn	114
Abbildung 3.52: Schräglaufsteifigkeit auf verschiedenen Fahrbahnen.....	115
Abbildung 3.53: Lage des Seitenkraftmaximums auf verschiedenen Fahrbahnen.....	116
Abbildung 3.54: Einfluss der Temperatur auf die Lage des Seitenkraftmaximums auf Schnee- und Eisfahrbahn	118
Abbildung 4.1: Beispiel für das Fitting der Magic Formula an die (über die statistischen Vorhersagefunktionen berechneten) Stützpunkte zur Erzeugung einer virtuellen Messkurve.....	123
Abbildung 4.2: Übersicht der virtuellen Messdateien für die MF-Parametrierung	126
Abbildung 4.3: Konuseffekt und Winkellageneffekt bei Reifen mit definierter Außenseite.....	130

Abbildung 4.4:	Vergleich IPS-Messdaten und virtuell erzeugte Messdaten (Validierungsreifen), reine Seitenkraft	132
Abbildung 4.5:	Vergleich IPS-Messdaten und virtuell erzeugte Messdaten (Validierungsreifen), reine Umfangskraft	132
Abbildung 4.6:	Vergleich IPS-Messdaten und virtuell erzeugte Messdaten (Validierungsreifen), kombinierte Kräfte	133
Abbildung 4.7:	Zusammenfassung der Validierungsergebnisse (mittlere Abweichung (RMSE) des Reibwerts). Vergleich der Prüfstandsmessungen des Validierungsreifens mit virtuell erzeugten Messschrieben (Histogramme). oben links: reine Umfangskraftmessungen, oben rechts: reine Seitenkraftmessungen unten: kombinierte Umfangskraft-Schlupf-Messungen (links: in Umfangskraftrichtung, rechts: in Seitenkraftrichtung).	134
Abbildung 4.8:	Eingabemaske des <i>FAST Virtual Tyre Generator</i>	136
Abbildung 4.9:	Dreidimensionale Darstellung von angepassten Magic Formula-Kennlinien zur Verifikation der Reifenmodelle (Seitenkraft über Schräglaufwinkel / Schlupf).....	138
Abbildung 5.1:	Vergleich von Seitenkraftkennlinien skaliert <i>Flat-Trac</i> -Reifen und virtuell erzeugter Reifen	140
Abbildung 5.2:	Vergleich von Umfangskraftkennlinien skaliert <i>Flat-Trac</i> -Reifen und virtuell erzeugter Reifen	141
Abbildung 5.3:	Lenkradwinkelvorgabe beim Simulationsmanöver „Sinus mit Verweilen“ („Sine With Dwell“, SWD, Bsp. 180° LRW)	143
Abbildung 5.4:	Simulationsergebnisse mit und ohne DSC-Regelsystem (SWD, $v = 80\text{ km/h}$, $LWA = 60^\circ$, $f = 0,7\text{ Hz}$, $t_{\text{halt}} = 0,5\text{ s}$)	145

Abbildung 5.5: Simulationsergebnis einer quasistationären Kreisfahrt auf der Schneefahrbahn (konstanter Radius = 40m)	146
Abbildung 5.6: Messfahrzeug mit applizierten Radmessnaben, Peiselerrad, Fahrbahn-Pyrometer, GPS-Antennen, Correvit-Sensor und Temperatursensor	148
Abbildung 5.7: Ermittlung der Schräglaufwinkel am Einspurmodell.....	151
Abbildung 5.8: Vergleich von real gemessenen Reifenkennlinien im Außenversuch mit virtuell erzeugten Reifen links: Seitenkraftkennlinie von Reifen D; rechts: Bremskraftkennlinie von Reifen B	152
Abbildung 5.9: Validierung der Simulationsergebnisse mit Realdaten Reifen: Versuchsreifen D, Fahrbahn: Schneefahrbahn	155

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Verbreitete Vertreter von Reifenmodellen (nach [Ein10]).....	15
Tabelle 3.1:	Auswahlmatrix der Einflussfaktoren.....	33
Tabelle 3.2:	Technische Daten des Innentrommelprüfstands am <i>FAST</i>	37
Tabelle 3.3:	Überblick der Versuchsreifen	51
Tabelle 3.4:	Reifeneigenschaften des Validierungsreifens.....	52
Tabelle 3.5:	Magic Formula-Parameter und ihre zulässigen Intervalle	64
Tabelle 3.6:	Parametergrenzenintervalle für das Fitting der Seitenkräfte bei kombinierten Messungen	68
Tabelle 3.7:	Kenngößen und charakteristische Punkte der Magic Formula-Analyse.....	74
Tabelle 3.8:	Gültigkeitsintervalle.....	96
Tabelle 3.9:	Zusammengefasste, ausgewählte Einflussfaktoren für den Versuchsreifen B. Auswertepremissen: Schräglaufwinkel = 0°, Sturzwinkel = 0°, Radlast = 4000 N, CTI = 91, SRT = 51, Temperatur = -9°C.	118
Tabelle 4.1:	Zuordnung der einzelnen Vorhersageformeln, die zur Erzeugung der Stützpunkte der jeweiligen virtuellen Messkurve verwendet werden	122

Abkürzungen, Formelzeichen und Symbole

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
ABS	Anti-Blockier-System
AIC	AKAIKE's Information Criterion
ASR	Antriebs-Schlupf-Regelung
BIC	BAYESian Information Criterion
CAD	Computer Aided Design
CTI	Compaction Tester Index, Einheit zur Bestimmung der Schneehärte mit dem CTI-Penetrometer
CV	Characteristic Value
<i>DoE</i>	<i>Design of Experiments</i>
DSC	Dynamic Stability Control
DTC	Dynamic Traction Control
EG	Eigenlenkgradient
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
<i>ETRTO</i>	<i>European Tyre and Rim Technical Organisation</i>
<i>FAST</i>	<i>Institut für Fahrzeugsystemtechnik</i>
FEM	Finite Element Methode
FFT	Fast Fourier Transformation
<i>FKFS</i>	<i>Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart</i>
FTM	Flächenträgheitsmoment
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
HiL	Hardware-in-the-Loop
IPS	Innentrommel-Prüfstand
<i>ISAR</i>	<i>Integrierte Simulationsumgebung Fahrodynamik Regelsysteme</i>
<i>KIT</i>	<i>Karlsruher Institut für Technologie</i>

Abkürzung	Beschreibung
KOS	Koordinatensystem
LI	Load Index
LW	Lenkradwinkel
LWA	Lenkradwinkelamplitude
MF	Magic Formula
RMSE	Root Mean Square Error
SP	Fahrzeugschwerpunkt
SRT	Skid Resistance Tester
SWD	Sine With Dwell
TIME	Tire Measurements, Standard-Messprozedur für Reifenmessungen
TYDEX	Tyre Data Exchange Format
URM	Universeller Reibungsmesser

Formelzeichen und Symbole

Zeichen	Beschreibung	Einheit
A_{FP}	Footprintfläche	[m ²]
A_y	Offsetfaktor in der angepassten Kosinusform der MF für kombinierte $F_x(s)$ -Messungen	[-]
B	Steifigkeitsfaktor der MF	[-]
B_{cos}	Formfaktor der Kosinusform der MF	[-]
B_y	Formfaktor in der angepassten Kosinusform der MF für kombinierte $F_x(s)$ -Messungen	[-]
C	Formfaktor der MF	[-]
C_{cos}	Asymptotenfaktor der Kosinusform der MF	[-]
D	Spitzenwertfaktor der MF	[-]
D_{cos}	Spitzenwertfaktor der Kosinusform der MF	[-]
D_y	Spitzenwertfaktor in der angepassten Kosinusform der MF für kombinierte $F_x(s)$ -Messungen	[-]

Zeichen	Beschreibung	Einheit
E	Krümmungsfaktor der MF	[-]
E_R	Elastizitätsmodul	[N/m ²]
F_{Kon}	Seitenkraft durch Konuseffekt	[N]
F_L	Radlastanteil der Luftfeder	[N]
F_R	Radlastanteil des Reifenaufbaus	[N]
F_{Seit}	Nullseitenkraft	[N]
F_{WL}	Kraft durch Winkellageneffekt	[N]
F_X	Reifen-Umfangskraft	[N]
$F_X(s)$	Umfangskraft-Schlupf-Messung	
F_Y	Reifen-Seitenkraft	[N]
$F_Y(\alpha)$	Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Messung	
$F_{y\alpha}$	Ordinatenwert der angepassten Kosinusform der MF für kombinierte $F_X(s)$ -Messungen	[N]
F_Z	Radlast	[N]
$G(x)$	Ordinatenwert der Kosinusversion der MF an der Stelle x	[-]
G_a	Höhe der Asymptote in der Kosinusversion der MF	
I_{xx}	Flächenträgheitsmoment bzgl. der x-Achse	[m ⁴]
I_{xy}	Flächendeviationsmoment	[m ⁴]
I_{yy}	Flächenträgheitsmoment bzgl. der y-Achse	[m ⁴]
Kr_{Pkt_S}	Krümmung der MF-Kurve an Pkt_S	
Kr_{Max}	Krümmung der MF-Kurve an Max	
Max	Maximaler Reibbeiwert bzw. maximales Moment der MF	
M_X	Reifen-Sturzmoment	[Nm]
M_Y	Reifen-Antriebsmoment	[Nm]
M_Z	Reifen-Rückstellmoment	[Nm]
P	Wahrscheinlichkeit	[-]
Pkt_L	Punkt, der die Verbindungsgerade zwischen Max und Pkt_U halbiert	

Zeichen	Beschreibung	Einheit
Pkt_Q	Schnittpunkt aus der Cornering Stiffness-Geraden und der horizontalen Asymptote an Max	
Pkt_S	Schnittpunkt zwischen MF-Kurve und Verbindungsgerade zwischen Pkt_Q und x_{Max}	
Pkt_T	Schnittpunkt zwischen der senkrechten Gerade durch Pkt_L und MF-Kurve	
Pkt_U	Wert der MF Kurve bei 50% Schlupf bzw. bei -5° Schräglaufwinkel	
R^2	Bestimmtheitsmaß	[-]
SSE	Sum of Squared Errors, Fehlerquadratsumme	
S_h	Horizontale Verschiebung der MF-Kurve	[-]
Sh_A	Shore-A-Wert von Gummi	[-]
$St_{(0 0)}$	Steigung der Kurve im Ursprung (Schräglaufsteifigkeit, Schlupfsteifigkeit)	
S_v	Vertikale Verschiebung der MF-Kurve	[-]
$X_{Fzg}, Y_{Fzg}, Z_{Fzg}$	Fahrzeug-Koordinatensystem (Gesamtfahrzeugmessungen Schweden)	
$X_{Rad}, Y_{Rad}, Z_{Rad}$	Rad-Koordinatensystem (Gesamtfahrzeugmessungen Schweden)	
X_i	Parameterfunktionen	
Y	Modelleffekt	
$Y(x)$	Ordinatenwert der MF (Grundform) an der Stelle x	[-]
a_y	Querbeschleunigung	[m/s ²]
e	Fehler	
e_{yW}	Verschiebung des Radaufstandspunkts in Querrichtung ggü. der Radmittelebene	[m]
F	Lenkfrequenz bei SWD-Manövern	[Hz]
f	Raddrehfrequenz	[Hz]
i	Teilintervall beim Messdatenfitting	
k	Anzahl Teilintervalle beim Messdatenfitting	
k	Anzahl der Parameter im Modell	

Zeichen	Beschreibung	Einheit
l_h	Abstand Fahrzeugschwerpunkt - Hinterachse	[m]
m	Stichprobenumfang	[-]
n	Anzahl Wiederholungen	
n	Nachlaufstrecke	[m]
p_L	Reifenfülldruck	[bar]
r_0	Reifenradius unbelastet	[cm]
r_{dyn}	Dynamischer Abrollradius	[m]
r_{geom}	geometrischer Reifenradius (senkrechter Abstand Radnabe zur Fahrbahn)	[m]
s	Schlupf	[%]
t_{halt}	Haltezeit des Lenkwinkels bei SWD-Manövern	[s]
\vec{v}	Gleitgeschwindigkeitsvektor des Reifenlatschs	
\vec{v}_H	Verschiebevektor bei der Koordinaten- transformation der TYDEX-KOS	
v_{Tr}	Trommelgeschwindigkeit	[km/h]
v_{res}	Resultierende Fahrzeuggeschwindigkeit	[km/h]
x	Symmetrischer Abszissenwert der MF (Schlupf oder Schräglaufwinkel)	[-]
x_{Max}	Zum max. Reibbeiwert bzw. Moment korrespondierender Schräglaufwinkel bzw. Schlupfwert	
$y(x)$	Symmetrischer Ordinatenwert der MF	[-]
y_a	Asymptotenwert in der MF	
z	z-Wert der Standardnormalverteilung	[-]
$\Delta_{AlignSti}$	Korrekturfaktor für die Schlupfsteifigkeit	[-]
Δ_{CorSti}	Korrekturfaktor für die Schräglaufsteifigkeit	[-]
Δ_{QMax}	Abstand zwischen Pkt_Q und Pkt_R	
Δ_{QS}	Abstand zwischen Pkt_Q und Pkt_S	
Δ_{TL}	Abstand zwischen Pkt_T und Pkt_L	
α	Schräglaufwinkel	[°]
α_h	Schräglaufwinkel an der Hinterachse	[°]
α_v	Schräglaufwinkel an der Vorderachse	[°]

Zeichen	Beschreibung	Einheit
β	Schwimmwinkel	[°]
β_i	Regressionskoeffizienten	[-]
δ	Radlenkwinkel	[°]
γ	Sturzwinkel	[°]
ϵ_i	Störterm	
$\dot{\psi}$	Gierrate	[°/s]
μ	Reibkoeffizient	[-]
μ	Poissonzahl	[-]
μ_a	Adhäsionsreibung	[-]
μ_h	Hysteresereibung	[-]
μ_k	Kohäsionsreibung	[-]
μ_{max}	Maximaler Reibwert	[-]
μ_{Reib}	Gesamt-Reibungskoeffizient	[-]
μ_v	Viskose Reibung	[-]
σ	Standardabweichung	
τ	Winkel zwischen gedachtem Geschwindigkeitsvektor und Reifenmittenebene zur Berechnung des Strukturfaktors	[°]

Anhang

Tabelle A.1:

Erster Messblock für Nassmessungen auf Asphalt (komb. $F_X(s)$ -Messungen)

Run	Block	Radlast	Schräglaufwinkel	Sturzwinkel
1	1	2500	-6	3
2	1	6500	0	-1,5
3	1	2500	-6	-6
4	1	6500	0	-1,5
5	1	4500	6	-6
6	1	6500	0	-1,5
7	1	2500	6	3
8	1	4500	0	-1,5
9	1	6500	-6	3
10	1	2500	6	-6
11	1	6500	-6	-6
12	1	2500	-6	3
13	1	2500	0	-6
14	1	4500	0	-1,5
15	1	6500	6	3
16	1	4500	-6	-1,5
17	1	4500	0	-1,5
18	1	6500	6	-6
19	1	4500	6	-1,5
20	1	2500	6	-6
21	1	4500	0	-1,5
22	1	4500	-6	-1,5
23	1	4500	0	3
24	1	6500	6	3
25	1	4500	0	-1,5
26	1	2500	6	3
27	1	2500	-6	-6
28	1	6500	-6	-6
29	1	4500	0	-1,5
30	1	4500	0	3

```

1  **HEADER
2  RELEASE   Release of the TYDEX format           1.3
3  MEASID    Measurement ID
4  SUPPLIER  Data supplier                       KIT - Institut für Fahrzeugsystemtechnik
5  DATE      Date                               11/06/2014
6  CLCKTIME  Clock time                         10:29:18 AM
7
8  **COMMENTS
9  Pruefer   Bernd Wassertheurer
10 Pruefstandsdaten Virtual Test Rig
11 Kommentar Standardbedingungen ohne Flat-Trac; Sha = 63
12 NEWTYPE   New Tire Circumference             mm      2225
13 RFREE     Free Rolling Radius                mm      354.1
14 PROCTYPE  Type of test procedure             Combined Slip
15 DATATYPE  Type of data                       Combined Slip
16 CZTYRE   Vertical Stiffness                  N/m     320000
17 LOADIND   Load Index                        N        6769
18 INFLPRES  Inflation Pressure                 bar     2.5
19
20 **CONSTANTS
21 ! A. General Information
22 PROJECT   Vehicle Project                    BMW KIT Virtual Tyre
23 TESTRIG   Test Rig                           FAST Virtual Tyre Generator
24 LOCATION  Location                           Karlsruhe
25 TESTMETH  Test Method                         Combined Slip
26 ! B. Tyre and Rim Specifications
27 NOMWIDTH  Nominal Section Width of Tyre mm   215
28 ASPRATIO  Nominal Aspect Ratio                %       45
29 TYSTRUCT  Tyre Structure                      R
30 RIMDIAME  Nominal Rim Diameter                inch    20
31 RIMWIDTH  Rim Width                           inch    7
32 MANUFACT  Manufacturer of the Tyre            BRIDGESTONE
33 IDENTITY  Identity of the Tyre                Blizzak LM32
34 TYWHASSB  Tyre-Wheel Assembly                 left
35 ! C. Tyre Conditions
36 INFLPRES  Infl. Press.                       bar     2.5
37 TRDDEPB  Tread Depth Before                  mm      8.5
38 ! D. Ambient Conditions
39 TRCKSURF  Surface of the Track                 Schnee
40 TRCKCOND  Condition of Track Surface           Hard packed snow
41 AMBTEMP   Ambient Temperature                 deg C   -10.0
42 ! I. Linear Motion Variables
43 LONGVEL   Longitudinal Velocity               m/s     8.33
44 ! K. Wheel Trajectory Dimensions
45 CURVTRSF  Curvature of Trajectory             1/m     0.0
46
47 SLIPANGL  Slip Angle                          deg     -1.00
48 FZW       Vertical Force                       N       2708
49 INCLANGL  Inclination angle                   deg     -3.00
50
51 **MEASURCHANNELS
52 !Channels using W-axis system
53 FZW       Vertical Force                       N       1.0   0   0
54 LONGSLIP  Longitudinal Slip                   %       1.0   0   0
55 FX        Longitudinal Force                   N       1.0   0   0
56 FY        Lateral Force                       N       1.0   0   0
57
58 **MEASURDATA
59 2707.60   0.00   0.00  871.76
60 2707.60   0.50  240.42  862.08

```

Abbildung A.1:

Beispiel des Headers einer TYDEX-Ergebnisdatei (kombinierte Umfangskraft-Schlupf-Messung bei -1° Schräglaufwinkel, 2708N Radlast und -3° Sturzwinkel)

Tabelle A.2:
Fahrmanöverkatalog Gesamtfahrzeugmessungen Schweden

	Manöverkategorie	Manöverkatalog Schweden			
		km/h (Schnee bis ca. 120, Eis bis ca. 40)	DSC-Mode (DSC on, DTC on, off)	Fahrbahnoberfläche	Bemerkungen
Querdyamik	Ramp Steer				konst. Geschw. mit Lenkwinkelrampe
		30	off	Schnee	Lenkrate etwa 10 °/s
		40	DSC on	Schnee	Lenkrate etwa 10 °/s
		40	DTC on	Schnee	Lenkrate etwa 10 °/s
		40	off	Schnee	Lenkrate etwa 10 °/s
		20	DSC on	Eis	Lenkrate etwa 10 °/s
		20	DTC on	Eis	Lenkrate etwa 10 °/s
	Sinuslenken				
		20	DSC on	Schnee	LR-Winkel ±180°, Lenkrate 20 °/s
		20	DTC on	Schnee	LR-Winkel ±180°, Lenkrate 20 °/s
		20	off	Schnee	LR-Winkel ±180°, Lenkrate 20 °/s
		40	DSC on	Schnee	LR-Winkel ±90°, Lenkrate 20 °/s
		40	DTC on	Schnee	LR-Winkel ±90°, Lenkrate 20 °/s
		40	off	Schnee	LR-Winkel ±90°, Lenkrate 20 °/s
		60	DSC on	Schnee	LR-Winkel ±45°, Lenkrate 20 °/s
		60	DTC on	Schnee	LR-Winkel ±45°, Lenkrate 20 °/s
		20	DSC on	Eis	LR-Winkel ±45°, Lenkrate 20 °/s
	konst. Kreisfahrt				
		60	off	Schnee	großer Kreis
		80	DSC on	Schnee	großer Kreis
		40	off	Schnee	kleiner Kreis
		50	DSC on	Schnee	kleiner Kreis
	quasistationäre Kreisfahrt				
		0-Grenzgeschw.	DSC on	Schnee	großer Kreis
		0-Grenzgeschw.	DTC on	Schnee	großer Kreis
		0-Grenzgeschw.	off	Schnee	großer Kreis
		0-Grenzgeschw.	DSC on	Schnee	kleiner Kreis
		0-Grenzgeschw.	DTC on	Schnee	kleiner Kreis
		0-Grenzgeschw.	off	Schnee	kleiner Kreis
		0-Grenzgeschw.	DSC on	Eis	großer Kreis
		0-Grenzgeschw.	DTC on	Eis	großer Kreis
	Einfacher Spurwechsel				
		40	DSC on	Schnee	
		40	DTC on	Schnee	
		40	off	Schnee	
		60	DSC on	Schnee	
		80	off	Schnee	
		30	DSC on	Eis	
	Stepsteer				
		30	DSC on	Schnee	LRW +90°, max. LW-Rate
		30	DTC on	Schnee	LRW +90°, max. LW-Rate
		30	off	Schnee	LRW +90°, max. LW-Rate
		40	DSC on	Schnee	LRW +45°, max. LW-Rate
		40	DTC on	Schnee	LRW +45°, max. LW-Rate
		60	DSC on	Schnee	LRW +45°, max. LW-Rate

	Manöverkategorie	Manöverkatalog Schweden			
		km/h (Schnee bis ca. 120, Eis bis ca. 40)	DSC-Mode (DSC on, DTC on, off)	Fahrbahnoberfläche	Bemerkungen
Längsdynamik	Max. Beschleunigen				
		0-100	DSC on	Schnee	Schaltpunkt bei 2000 U/min
		0-60	DSC on	Eis	Schaltpunkt bei 2000 U/min
	Konst. Beschleunigen				ohne ASR-Eingriff
		0-100	DSC on	Schnee	Schaltpunkt bei 2000 U/min
		0-40	off	Eis	Schaltpunkt bei 2000 U/min
	Beschleunigen mit Schlupfaufbau				
		0-100	off	Schnee	in jedem Gang kont. Schlupf aufbauen
		0-100	DTC on	Schnee	in jedem Gang kont. Schlupf aufbauen
	Beschleunigen mit Konstantgas				
		0-40	off	Schnee	Konst. 3000 U/min, Schlupfabbau 100% -> 0%
		0-40	off	Eis	Konst. 2000 U/min, Schlupfabbau 100% -> 0%
	Definierte Bremsung ohne ABS				konstanter Bremsdruck
		100	DSC on	Schnee	schwach, 5 bar Bremsdruck
		100	DSC on	Schnee	mittel, 10 bar Bremsdruck
		100	DSC on	Schnee	stark (kein ABS-Bereich), 15 bar Bremsdruck
		60	DSC on	Eis	schwach, 3 bar Bremsdruck
	ABS-Bremsung				
		60	DSC on	Schnee	plötzlicher Antritt
		60	DSC on	Schnee	langsamer Antritt in ABS-Bremsung
		100	DSC on	Schnee	plötzlicher Antritt
		100	DSC on	Schnee	langsamer Antritt in ABS-Bremsung
		40	DSC on	Eis	plötzlicher Antritt
		40	DSC on	Eis	langsamer Antritt in ABS-Bremsung
Ausrollen				ausgekuppelt	
	30	off	Schnee		

	Manöverkategorie	Manöverkatalog Schweden			
		km/h (Schnee bis ca. 120, Eis bis ca. 40)	DSC-Mode (DSC on, DTC on, off)	Fahrbahnoberfläche	Bemerkungen
Kombinierte Belastung	konst. Bremsen in Kurve				ausgekuppelt, konst. Bremsdruck
		80	DSC on	Schnee	großer Kreis
		50	DSC on	Schnee	kleiner Kreis
	konst. Beschleunigen in Kurve				konst. Beschleunigung
		0-Grenzgeschw.	DSC on	Schnee	kleiner Kreis
		0-Grenzgeschw.	off	Schnee	kleiner Kreis
Weitere Manöver	Übersteuern Slalom	40	DSC on	Schnee	großer Kreis
	Übersteuern Slalom	40	DTC on	Schnee	kleiner Kreis
	Übersteuern Slalom	40	off	Schnee	großer Kreis
	Übersteuern Slalom	40	off	Schnee	großer Kreis
	Lenkrad L/R max.	20	off	Schnee	großer Kreis
	Lenkrad L/R max.	40	off	Schnee	großer Kreis
	Lenkrad L/R max.	20	off	Eis	großer Kreis
	Lactfrei Wedeln	80	off	Schnee	ausgekuppelt, maximaler Schwimmwinkel
	Lastfrei Wedeln	20	off	Eis	ausgekuppelt, maximaler Schwimmwinkel
	Handling-Kurs	var.	DSC on	Schnee	
	Handling-Kurs	var.	DTC on	Schnee	
	Handling-Kurs	var.	off	Schnee	

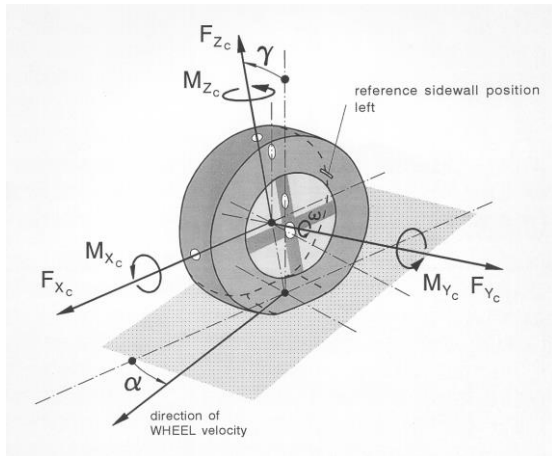


Abbildung A.2:
TYDEX-C-Koordinatensystem [Unr97]

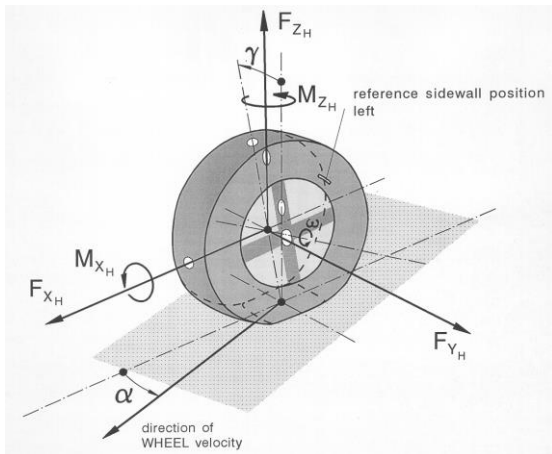


Abbildung A.3:
TYDEX-H-Koordinatensystem [Unr97]

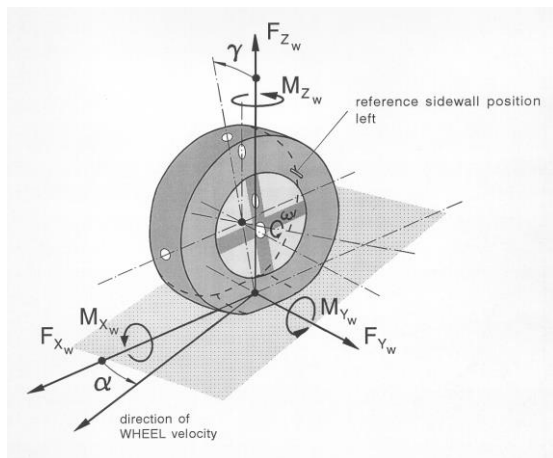


Abbildung A.4:
TYDEX-W-Koordinatensystem [Unr97]

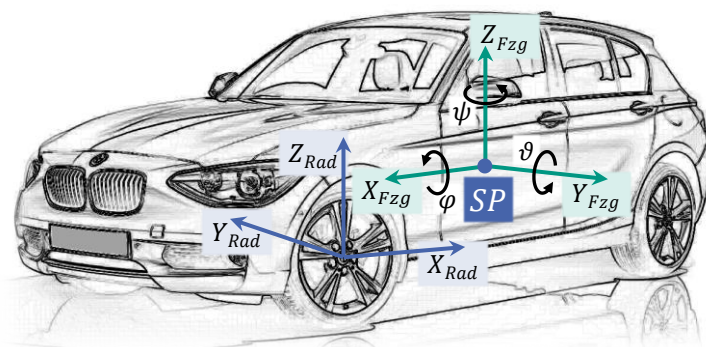


Abbildung A.5:
Koordinatensysteme bei Gesamtfahrzeugmessungen:
Das Bezugs-Koordinatensystem liegt mit seinem Ursprung im Schwerpunkt des Fahrzeugs.
Für jedes Rad wird ein radfestes KOS definiert [DIN79].
Dabei sind die X_{Rad} - und Z_{Rad} -Achse für jedes Rad parallel zur jeweiligen Radmittelebene,
die Y_{Rad} -Achse liegt parallel zur Raddrehachse

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

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

- Band 8** Vladimir Iliev
Systemansatz zur anregungsunabhängigen Charakterisierung des Schwingungskomforts eines Fahrzeugs. 2011
ISBN 978-3-86644-681-6
- Band 9** Lars Lewandowitz
Markenspezifische Auswahl, Parametrierung und Gestaltung der Produktgruppe Fahrerassistenzsysteme. Ein methodisches Rahmenwerk. 2011
ISBN 978-3-86644-701-1
- Band 10** Phillip Thiebes
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. Grundlegende Erkenntnisse und Zusammenhänge, Vorstellung einer Methodik zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses und deren Validierung am Beispiel einer Forstmaschine. 2012
ISBN 978-3-86644-808-7
- Band 11** Martin Gießler
Mechanismen der Kraftübertragung des Reifens auf Schnee und Eis. 2012
ISBN 978-3-86644-806-3
- Band 12** Daniel Pies
Reifenungleichförmigkeitserregter Schwingungskomfort – Quantifizierung und Bewertung komfortrelevanter Fahrzeugschwingungen. 2012
ISBN 978-3-86644-825-4
- Band 13** Daniel Weber
Untersuchung des Potenzials einer Brems-Ausweich-Assistenz. 2012
ISBN 978-3-86644-864-3
- Band 14** **7. Kolloquium Mobilhydraulik. 27./28. September 2012 in Karlsruhe.** 2012
ISBN 978-3-86644-881-0
- Band 15** 4. Fachtagung
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen 20. Februar 2013, Karlsruhe. 2013
ISBN 978-3-86644-970-1
- Band 16** Hans-Joachim Unrau
Der Einfluss der Fahrbahnoberflächenkrümmung auf den Rollwiderstand, die Cornering Stiffness und die Aligning Stiffness von Pkw-Reifen. 2013
ISBN 978-3-86644-983-1

- Band 17** Xi Zhang
Untersuchung und Entwicklung verschiedener Spurführungsansätze für Offroad-Fahrzeuge mit Deichselverbindung. Noch nicht erschienen
ISBN 978-3-7315-0005-6
- Band 18** Stefanie Grollius
Analyse des gekoppelten Systems Reifen-Hohlraum-Rad-Radführung im Rollzustand und Entwicklung eines Rollgeräuschmodells. 2013
ISBN 978-3-7315-0029-2
- Band 19** Tobias Radke
Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien. 2013
ISBN 978-3-7315-0069-8
- Band 20** David Gutjahr
Objektive Bewertung querdynamischer Reifeneigenschaften im Gesamtfahrzeugversuch. 2014
ISBN 978-3-7315-0153-4
- Band 21** Neli Ovcharova
Methodik zur Nutzenanalyse und Optimierung sicherheitsrelevanter Fahrerassistenzsysteme. 2014
ISBN 978-3-7315-0176-3
- Band 22** Marcus Geimer, Christian Pohlandt
Grundlagen mobiler Arbeitsmaschinen. 2014
ISBN 978-3-7315-0188-6
- Band 23** Timo Kautzmann
Die mobile Arbeitsmaschine als komplexes System. 2014
ISBN 978-3-7315-0187-9
- Band 24** Roman Weidemann
Analyse der mechanischen Randbedingungen zur Adaption der oszillierenden Hinterschneidtechnik an einen Mobilbagger. 2014
ISBN 978-3-7315-0193-0
- Band 25** Yunfan Wei
Spurführungsregelung eines aktiv gelenkten Radpaars für Straßenbahnen. 2014
ISBN 978-3-7315-0232-6

- Band 26** David Schmitz
Entwurf eines fehlertoleranten Lenkventils für Steer-by-Wire Anwendungen bei Traktoren. 2014
ISBN 978-3-7315-0264-7
- Band 27** Christian Schwab
Beitrag zu einer universellen Baggerschnittstelle zur Übertragung elektrischer und hydraulischer Leistung sowie elektronischer Signale für komplexe Anbaugeräte. 2014
ISBN 978-3-7315-0281-4
- Band 28** Peter Dengler
Untersuchung zum effizienten Betrieb von Hydraulikzylindern in Konstantdrucksystemen unter Verwendung einer Zwischendruckleitung. 2015
ISBN 978-3-7315-0295-1
- Band 29** Manuel Bös
Untersuchung und Optimierung der Fahrkomfort- und Fahrdynamikeigenschaften von Radladern unter Berücksichtigung der prozessspezifischen Randbedingungen. 2015
ISBN 978-3-7315-0310-1
- Band 30** 5. Fachtagung
Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 25. Februar 2015, Karlsruhe. 2015
ISBN 978-3-7315-0323-1
- Band 31** Michael Eckert
Energieoptimale Fahrdynamikregelung mehrmotoriger Elektrofahrzeuge. 2015
ISBN 978-3-7315-0332-3
- Band 32** Martin Scherer
Beitrag zur Effizienzsteigerung mobiler Arbeitsmaschinen. Entwicklung einer elektrohydraulischen Bedarfsstromsteuerung mit aufgeprägtem Volumenstrom. 2015
ISBN 978-3-7315-0339-2
- Band 33** Rinaldo Arnold
Automatische Abstimmung der Sekundärseite eines dreiphasigen Systems zur berührungslosen induktiven Energieübertragung. 2015
ISBN 978-3-7315-0355-2
- Band 34** Johannes Gültlinger
Kraftübertragung und Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen. 2015
ISBN 978-3-7315-0358-3

- Band 35** Thorsten Dreher
Energieeffizienz von Konstantdrucksystemen mit sekundäreregelten Antrieben beim Einsatz in mobilen Arbeitsmaschinen. 2015
ISBN 978-3-7315-0377-4
- Band 36** Steffen Kölling
Konzeptionelle Untersuchung zur Neigekompensation von Stromabnehmern. 2015
ISBN 978-3-7315-0387-3
- Band 37** Michael Fritz
Entwicklungswerkzeuge für die Fahrzeugklimatisierung von Nutzfahrzeugen. 2015
ISBN 978-3-7315-0384-2
- Band 38** Ralf Oberfell
Stochastische Simulation von Energieflüssen im Nutzfahrzeug. Ein einsatzorientiertes Bewertungs- und Optimierungsverfahren. 2015
ISBN 978-3-7315-0403-0
- Band 39** Christoph Sturm
Bewertung der Energieeffizienz von Antriebssystemen mobiler Arbeitsmaschinen am Beispiel Bagger. 2015
ISBN 978-3-7315-0404-7
- Band 40** Florian Netter
Komplexitätsadaption integrierter Gesamtfahrzeugsimulationen. 2016
ISBN 978-3-7315-0414-6
- Band 41** Markus Springmann
Auslegung eines asynchronen Langstatorlinearmotors mit großem Luftspalt als Straßenbahnantrieb. 2015
ISBN 978-3-7315-0418-4
- Band 42** Alexander Basler
Eine modulare Funktionsarchitektur zur Umsetzung einer gesamtheitlichen Betriebsstrategie für Elektrofahrzeuge. 2015
ISBN 978-3-7315-0421-4
- Band 43** Hans-Georg Wahl
Optimale Regelung eines prädiktiven Energiemanagements von Hybridfahrzeugen. 2015
ISBN 978-3-7315-0422-1

- Band 44** Jennifer Heck
Zur Simulation des Rad-Schiene-Verschleißes bei Straßenbahnen. 2016
ISBN 978-3-7315-0443-6
- Band 45** Moritz Vaillant
Design Space Exploration zur multikriteriellen Optimierung elektrischer Sportwagenantriebsstränge: Variation von Topologie und Komponenteneigenschaften zur Steigerung von Fahrleistungen und Tank-to-Wheel Wirkungsgrad. 2016
ISBN 978-3-7315-0452-8
- Band 46** Philip Nagel
Entwicklung einer Betriebsstrategie zur Energierückgewinnung in hybriden Mehrverbrauchersystemen. 2016
ISBN 978-3-7315-0479-5
- Band 47** Matthias Pfriem
Analyse der Realnutzung von Elektrofahrzeugen in kommerziellen Flotten zur Definition einer bedarfsgerechten Fahrzeugauslegung. 2016
ISBN 978-3-7315-0489-4
- Band 48** Mohanad El-Haji
Ontologie-basierte Definition von Anforderungen an Validierungswerkzeuge in der Fahrzeugtechnik. 2016
ISBN 978-3-7315-0496-2
- Band 49** **9. Kolloquium Mobilhydraulik**
22./23. September 2016 in Karlsruhe. 2016
ISBN 978-3-7315-0573-0
- Band 50** 6. Fachtagung
Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 15. Februar 2017, Karlsruhe. 2017
ISBN 978-3-7315-0601-0
- Band 51** Fabian Schirmaier
Experimentelle Untersuchung und Simulation des Umformverhaltens nähgewirkter unidirektionaler Kohlenstofffasergelege. 2017
ISBN 978-3-7315-0620-1
- Band 52** Mathias Cabrera Cano
Neuronale Netze mit externen Laguerre-Filtern zur automatischen numerischen Vereinfachung von Getriebemodellen. 2017
ISBN 978-3-7315-0621-8

- Band 53** Arwed Schmidt
Flottenbetrieb von elektrischen und autonomen Serviceagenten im städtischen Personennahverkehr. 2017
ISBN 978-3-7315-0633-1
- Band 54** Katharina Knaisch
Untersuchung von Spulensystemen zur induktiven Energieübertragung von Elektrofahrzeugen. Vergleich von Topologien und Entwicklung einer Auslegungsmethodik. 2017
ISBN 978-3-7315-0630-0
- Band 55** Frank Christof Stalter
Ansätze zur akustischen Optimierung von Reifen und Fahrbahnen für Elektrofahrzeuge unter Antriebsmoment. 2017
ISBN 978-3-7315-0645-4
- Band 56** Steffen Rose
Modellbildung und Simulation von mobilen Arbeitsmaschinen. Untersuchungen zu systematischen Modellvereinfachungen in der Simulation von Antriebssystemen am Beispiel Bagger. 2017
ISBN 978-3-7315-0684-3
- Band 57** Ulrico Peckelsen
Objective Tyre Development. Definition and Analysis of Tyre Characteristics and Quantification of their Conflicts. 2017
ISBN 978-3-7315-0713-0
- Band 58** Stefan Haag
Sequentieller Versuch zur HiL-unterstützten Validierung hybrider Antriebssysteme mit gekoppelten Antriebseinheiten. 2018
ISBN 978-3-7315-0752-9
- Band 59** Dirk Hülsebusch
Fahrerassistenzsysteme zur energieeffizienten Längsregelung - Analyse und Optimierung der Fahrsicherheit. 2018
ISBN 978-3-7315-0755-0
- Band 60** Christian Pohlandt
Intelligentes Gesamtmaschinenmanagement für elektrische Antriebssysteme. 2018
ISBN 978-3-7315-0774-1
- Band 61** Oliver Maier
Modellbasierte Entwicklung eines aktiven Sicherheitssystems für elektrifizierte Fahrräder. 2018
ISBN 978-3-7315-0778-9

- Band 62** Stephan Rhode
Robust and Regularized Algorithms for Vehicle Tractive Force Prediction and Mass Estimation. 2018
ISBN 978-3-7315-0807-6
- Band 63** Péter Megyesi
Methode zur Einbindung realer Nutzerprofile in die ökologische und ökonomische Bewertung von Fahrzeugkonzepten. 2018
ISBN 978-3-7315-0808-3
- Band 64** Benedikt Reick
Methode zur Analyse und Bewertung von stufenlosen Traktorgetrieben mit mehreren Schnittstellen. 2018
ISBN 978-3-7315-0815-1
- Band 65** Matthias Graf
Entwicklung und Validierung einer neuen Methode zur Charakterisierung des Scherverhaltens von Carbonfasergewebe mit Binderauftrag unter Normalkraft und viskoser Reibung bei hohen Prozessstemperaturen. 2018
ISBN 978-3-7315-0838-0
- Band 66** Christoph Kühn
Simulation von Fahrspielen und Energieflüssen in Nahverkehrssystemen. 2018
ISBN 978-3-7315-0740-6
- Band 67** 7. Fachtagung
Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 20. Februar 2019, Karlsruhe. 2019
ISBN 978-3-7315-0873-1
- Band 68** Oliver Krauss
Experimentelle Untersuchungen zum Innengeräusch von Fahrzeugluftreifen. 2019
ISBN 978-3-7315-0867-0
- Band 69** Tristan Reich
Beurteilung der Prüfprozesseignung bei Fahrzeugversuchen mit mobilen Arbeitsmaschinen. 2019
ISBN 978-3-7315-0848-9
- Band 70** Matthias Bürckert
Realitätsnahe Bewertung des Einflusses der Oberflächenspannung flüssiger Zwischenmedien auf den maximalen Reibschluss zwischen Reifen und Fahrbahn. 2019
ISBN 978-3-7315-0891-5

- Band 71** Matthias Greiner
Verfahren zur Prädiktion des Rollwiderstands bei variablen Betriebsparametern auf Basis standardisierter Rollwiderstandsmessungen. 2019
ISBN 978-3-7315-0898-4
- Band 72** David Hummelberger
Hybride Werkstoffsysteme: Systematische Betrachtung und Bewertung der physikalischen Wirkmechanismen. 2019
ISBN 978-3-7315-0901-1
- Band 73** Michael Kerber
Analyse dynamischer Reifeneigenschaften und deren Auswirkung auf den Schwingungskomfort. 2019
ISBN 978-3-7315-0944-8
- Band 74** Kilian Berthold
Techno-ökonomische Auslegungsmethodik für die Elektrifizierung urbaner Busnetze. 2019
ISBN 978-3-7315-0953-0
- Band 75** Bernd Wassertheurer
Reifenmodellierung für die Fahrdynamiksimulation auf Schnee, Eis und nasser Fahrbahn. 2019
ISBN 978-3-7315-0957-8

Die Fahrdynamiksimulation von Gesamtfahrzeugen auf Fahrbahnen mit Niedrigreibwert stellt besondere Anforderungen an die Reifenmodellierung. Im industriellen Umfeld sind die Messmöglichkeiten von Reifen auf Fahrbahnen wie Schnee, Eis und nassem Asphalt zudem äußerst eingeschränkt. Eine valide Parametrierung solcher Reifenmodelle ist deshalb meist nur mit viel Aufwand möglich und wird demzufolge nur selten angewendet. In der Fahrzeugentwicklung gewinnt die virtuelle Auslegung von Fahrzeugen und Regelsystemen gleichzeitig immer mehr an Bedeutung. Hierfür sind solche Reifenmodelle jedoch essentiell.

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieser Arbeit eine Methodik entwickelt, die es ermöglicht, ohne aufwändige Messprozeduren valide Reifenmodelle zu parametrieren, welche eine Fahrdynamiksimulation auf Fahrbahnen mit Niedrigreibwert ermöglicht. Grundlage bilden grafisch ausgewertete Reifenprofilabdrücke und eine statistische Datenbasis, welche einmalig mittels Prüfstandsmessungen befüllt wird. Die Versuchsdurchführung folgt der statistischen Versuchsplanung Design of Experiments. Neben der schnellen und einfachen Erzeugung von Reifenmodellen erlaubt die statistische Herangehensweise zudem eine detaillierte Untersuchung von Reifeneigenschaften.

