

Methode zur Ermittlung optimaler Rad- und Reifendimensionen in der frühen Entwicklungsphase von Personenkraftwagen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

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

DISSERTATION

von

M. Sc. Adrian Strigel

Tag der mündlichen Prüfung: 25.07.2023

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

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Andreas Wagner

Vorwort des Herausgebers

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

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

Der Reifen beeinflusst viele Fahrzeugeigenschaften deutlich, daher kommt seiner geeigneten Spezifikation im Fahrzeugentwicklungsprozess eine hohe Bedeutung zu. Eine frühzeitige, treffende Abschätzung, welche Reifen- und Felgenreößen in der Lage sein werden, die gewünschte Kombination von Funktionseigenschaften des Reifens zu liefern, hilft, die Entwicklungskosten zu reduzieren.

In der vorliegenden Arbeit wird eine datenbasierte Vorgehensweise vorgeschlagen, die allein aus den Größenangaben von Reifen und Rädern, dem Fülldruck und der Radlast quantitative Vorhersagen für Kenngrößen aus unterschiedlichen Eigenschaftsbereichen des Reifens wie Energieeffizienz, Fahrdynamik und Komfort ableitet. Sie erlaubt es weiterhin, Zusammenhänge und damit Zielkonflikte zwischen den Kenngrößen quantitativ zu beschreiben. Schließlich ermöglicht sie es, Hüllflächen im mehrdimensionalen Definitionsbereich der Reifen-

und Felgenabmessungen zu ermitteln, innerhalb derer alle gewünschten Reifengebrauchseigenschaften erfüllbar sind.

Frank Gauterin

Karlsruhe, im Juli 2023

Kurzfassung

Neben den Eigenschaften anderer Fahrzeugkomponenten trägt die Ausprägung der funktionalen Eigenschaften eines Reifens wesentlich zum Gesamtfahrzeugverhalten hinsichtlich Energieeffizienz, Fahrdynamik und Komfort bei. Die in vorhergehenden Arbeiten vorgestellte Reifenentwicklung auf Basis von „Functional Tyre Characteristics“ (FTC) ermöglicht die Beschreibung des Reifenverhaltens anhand objektiver, an Prüfständen messbarer Größen. Die Dimensionen von Rad und Reifen werden bereits in der frühen Entwicklungsphase eines neuen Fahrzeugkonzepts festgelegt und haben unmittelbare Auswirkungen auf die verschiedenen FTC. Zur langfristigen Erreichung der jeweiligen Anforderungen sind Kenntnisse über die vorliegenden Wechselwirkungen sowie Methoden zur Erarbeitung belastbarer Konzeptentscheidungen erforderlich.

Hierfür werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Methoden entwickelt, welche die statistische Prognose realisierbarer FTC-Bereiche für beliebige Dimensionskombinationen von Rad und Reifen bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen ermöglichen. Hierbei werden zum einen die Messdaten vergangener Reifenentwicklungen auf Basis linearer Regressionsmodelle analysiert und die Regressionsparameter der einzelnen Wirkzusammenhänge hinsichtlich Richtung, Stärke und physikalischen Ursachen interpretiert. Zur Berücksichtigung nichtlinearer Zusammenhänge werden die vorliegenden Messdaten darüber hinaus durch Künstliche Neuronale Netze (KNN) genähert.

Die KNN werden daraufhin in eine bereits vorhandene Software zur Visualisierung von Lösungsräumen eingebunden. Damit können Dimensionsbereiche von Rad und Reifen ermittelt werden, welche die spezifischen Anforderungen beliebiger Anwendungsfälle bestmöglich erfüllen. Die genaue Vorgehensweise wird abschließend am Beispiel realistischer Randbedingungen und Anforderungen eines Mittelklassefahrzeugs veranschaulicht, wobei die verfügbaren Lösungsräume hinsichtlich Rad- und Reifendimension eingegrenzt werden.

Abstract

In addition to other vehicle components, the functional properties of a tyre contribute significantly to the achievement of the overall vehicle targets in terms of energy efficiency, driving performance and comfort. The tyre development based on “Functional Tyre Characteristics” (FTC) is presented in previous works and enables the objective description of the tyre behavior based on test bench measurements. The rim and tyre dimensions are already defined in the early development phase of a new vehicle and have a direct impact on the several FTC. In order to achieve the respective requirements in the long term, knowledge about the relevant interactions as well as methods for elaboration of reliable concept decisions are needed.

In the context of the present thesis methods are developed, which allow the statistical estimation of feasible FTC ranges for any combination of rim and tyre dimension under different operating conditions. Therefore, measurement data of previous tyre developments are statistically analyzed using linear regression models, whereby both, direction and magnitude of the individual influences are interpreted with regard to their physical root causes. In order to take non-linear relationships into account, the measurement data is also approximated by Artificial Neural Networks (ANN).

Following this, the ANN are integrated into an existing software for visualization of solution spaces. In this way, optimal ranges of rim and tyre dimensions to fulfill the specific requirements of specific use cases can be determined. Finally, the procedure is exemplarily illustrated with realistic boundary conditions and requirements of a mid-size car. The possible rim and tyre dimensions are identified by consideration of the restrictions requested within the different vehicle characteristics.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Doktorand am Institut für Fahrzeugsystemtechnik des KIT und wurde operativ im Entwicklungsbereich Fahrdynamik der BMW AG durchgeführt.

Besonders danke ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit sowie für den regelmäßigen und stets produktiven fachlichen Austausch.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Wagner bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferats; ebenso bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Tobias Düser für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Darüber hinaus gilt mein Dank Herrn Dr.-Ing. Hans-Joachim Unrau, der jederzeit mit seiner wertvollen Expertise zur Verfügung stand.

Meinen Kollegen Tommaso D'Avanzo und Dr.-Ing. Ulrico Peckelsen danke ich herzlich für die Chance zur Durchführung der Arbeit, die fachliche Führung und das große Vertrauen als unternehmensseitige Betreuer.

Zuletzt danke ich meinem langjährigen Gruppenleiter Alexander Bertram, meinem ehemaligen Abteilungsleiter Markus Steidl sowie meinem ehemaligen Hauptabteilungsleiter Dietmar Zimmerhackl für das inhaltliche Interesse und die persönliche Förderung.

Adrian Strigel

München, im Juli 2023

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers	iii
Kurzfassung	i
Abstract	iii
Danksagung	v
Inhaltsverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung und Methodik.....	2
2 Stand des Wissens	5
2.1 Grundlagen Räder und Reifen.....	5
2.1.1 Begriffsdefinition	5
2.1.2 Tragverhalten des Reifens.....	6
2.1.3 Definitionen nach ETRTO	7
2.1.4 Entwicklungsprozess	11
2.1.5 Objektive Reifenentwicklung	12
2.2 Grundlagen Energieeffizienz	14
2.2.1 Rollwiderstand.....	15
2.2.2 Luftwiderstand.....	21
2.2.3 Beschleunigungswiderstand.....	25
2.3 Grundlagen Fahrdynamik.....	28
2.3.1 Reifenmodelle.....	29
2.3.2 Messung am Flachbahnprüfstand.....	30
2.3.3 Vertikaldynamik	32
2.3.4 Querdynamik	33
2.3.5 Längsdynamik.....	38
2.3.6 Lenkungskräfte	40
2.3.7 Spurrillenverhalten.....	44
2.4 Grundlagen Vibroakustik	45

2.4.1	Entstehungsmechanismen.....	46
2.4.2	Messung am Außentrommelprüfstand.....	47
2.4.3	Fahrbahnanregung in Querrichtung.....	49
2.5	Grundlagen Zielkonflikte.....	53
2.6	Grundlagen Statistik	55
2.6.1	Regressionsanalyse.....	55
2.6.2	Künstliche Neuronale Netze (KNN).....	57
2.6.3	Bewertung der Näherungsgüte	59
2.6.4	Statistische Signifikanz	60
2.6.5	Normalverteilung nach Gauß	62
2.6.6	Lösungsräume	63
3	Ziele und Vorgehensweise	65
3.1	Ziele	65
3.2	Vorgehensweise	66
4	Energieeffizienz.....	71
4.1	Rollwiderstand.....	71
4.1.1	Datenbasis	72
4.1.2	Regressionsanalyse.....	74
4.1.3	Näherung durch KNN	76
4.1.4	Analyse der Streubereiche.....	79
4.2	Fazit	81
5	Fahrdynamik.....	83
5.1	Vertikaldynamik	83
5.1.1	Datenbasis	83
5.1.2	Regressionsanalyse.....	86
5.1.3	Näherung durch KNN	89
5.1.4	Analyse der Streubereiche.....	91
5.2	Querdynamik	93
5.2.1	Datenbasis	93
5.2.2	Regressionsanalyse.....	93
5.2.3	Näherung durch KNN	98
5.2.4	Analyse der Streubereiche.....	103
5.3	Längsdynamik	106

5.3.1	Datenbasis.....	106
5.3.2	Regressionsanalyse.....	107
5.3.3	Näherung durch KNN.....	109
5.3.4	Analyse der Streubereiche.....	111
5.4	Lenkungskräfte.....	113
5.4.1	Datenbasis.....	113
5.4.2	Regressionsanalyse.....	114
5.4.3	Näherung durch KNN.....	117
5.4.4	Analyse der Streubereiche.....	121
5.5	Spurrillenverhalten.....	123
5.5.1	Datenbasis.....	123
5.5.2	Regressionsanalyse.....	123
5.5.3	Näherung durch KNN.....	126
5.5.4	Analyse der Streubereiche.....	128
5.6	Fazit.....	130
6	Vibroakustik.....	131
6.1	Fahrbahnanregung in Querrichtung.....	131
6.1.1	Datenbasis.....	131
6.1.2	Regressionsanalyse.....	133
6.1.3	Näherung durch KNN.....	136
6.1.4	Analyse der Streubereiche.....	139
6.2	Fazit.....	141
7	Zusammenhänge zwischen „Functional Tyre Characteristics“.....	143
7.1	Objektive Erfassung.....	143
7.1.1	Datenbasis.....	144
7.1.2	Regressionsanalyse.....	145
7.2	Fazit.....	155
8	Lösungsräume.....	157
8.1	Anwendungsfall.....	157
8.1.1	Randbedingungen.....	157
8.1.2	Optimale Dimensionen von Rad und Reifen.....	159
8.2	Fazit.....	172
9	Zusammenfassung.....	175

10 Ausblick	179
Anhang	181
Literaturverzeichnis	235
Abbildungsverzeichnis	247
Tabellenverzeichnis	257
Abkürzungsverzeichnis	259
Formelzeichen	261
Publikationen des Doktoranden	269

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der Wandel politischer und gesellschaftlicher Rahmenbedingungen hat die Entwicklungsschwerpunkte der Automobilindustrie im Laufe der letzten Jahre wesentlich beeinflusst. So haben die starken Schwankungen der Energiepreise sowie das von der Europäischen Union festgelegte Flottenziel von 95 Gramm CO₂/km bis zum Jahr 2021 (Europäische Union, 2009) zu einer stetigen Verbesserung der Energieeffizienz moderner Fahrzeuge beigetragen (The International Council on Clean Transportation, 2016) (European Environment Agency, 2016). Gleichzeitig haben das erhöhte Umweltbewusstsein und politische Förderprogramme zu einem deutlichen Anstieg der Verkaufszahlen elektrifizierter Fahrzeuge geführt (Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung, 2018). Das seit September 2017 geltende „weltweit harmonisierte Prüfverfahren für leichte Nutzfahrzeuge (WLTP)“ (Europäische Union, 2017) (United Nations, 2014) sowie die angestrebte Verringerung der Flottenemissionen um 37,5 Prozent gegenüber 2021 bis zum Jahr 2030 (Europäische Union, 2019) werden auch in Zukunft erhebliche Entwicklungsaufwände erfordern. Darüber hinaus wurden die gesetzlichen Grundlagen für automatisiertes Fahren geschaffen (Bundesministerium der Justiz, 2021) (Deutscher Bundestag, 2017) und neue Arten der Fahrzeugnutzung, wie z. B. Carsharing, gewinnen zunehmend an Bedeutung (McKinsey&Company, 2016) (Phleps, Feige, & Zapp, 2015) (Winterhoff, Kahner, Ulrich, Sayler, & Wenzel, 2009). Um im Umfeld dieses Wandels wettbewerbsfähig zu bleiben, werden durch die Automobilindustrie neuartige Fahrzeugkonzepte entwickelt und neue Märkte erschlossen. Dabei wird auf eine bewusste Marktpositionierung sowie die frühzeitige Ausrichtung der Entwicklung auf die jeweiligen Fahrzeuganforderungen geachtet.

Neben anderen Komponenten trägt auch der Reifen wesentlich zur Erfüllung der Gesamtfahrzeugziele hinsichtlich Energieeffizienz, Fahrdynamik und Komfort bei. Zur optimalen Erreichung der jeweiligen Anforderungen findet die Reifenentwicklung in enger Abstimmung zwischen Fahrzeug- und Reifenhersteller statt

(Leister, 2015). Die in (Niedermeier, 2015) und (Peckelsen, 2017) vorgestellte Reifenentwicklung auf Basis von funktionalen Reifeneigenschaften (Functional Tyre Characteristics, FTC) bietet dabei die Möglichkeit zu einer transparenten Zielvereinbarung anhand objektiver Größen. Entwicklungsreifen werden zunächst ausschließlich anhand von Prüfstandsmessungen bewertet und die Anzahl subjektiver Bewertungsschleifen auf diese Weise reduziert. Die FTC können darüber hinaus in virtuelle Entwicklungsmethoden eingebunden werden und damit zu einer wesentlichen Verringerung des zeitlichen und finanziellen Versuchsaufwands beitragen.

Die Dimensionen von Rad und Reifen haben, neben der Reifenkonstruktion und der Gummimischung, einen erheblichen Einfluss auf die unterschiedlichen FTC und werden bereits im Rahmen der Grundausslegung des Fahrzeugs in der frühen Entwicklungsphase durch den Fahrzeughersteller festgelegt. Auch die zulässige Reifentragfähigkeit ist in erster Linie durch seine Dimension festgelegt (The European Tyre and Rim Technical Organisation, 2018). Zur bestmöglichen Vereinbarkeit der jeweils geforderten FTC und zur frühzeitigen Erkennung möglicher Zielkonflikte ist es daher wichtig, über belastbare Methoden zur objektiven Grundausslegung der Rad- und Reifendimensionen zu verfügen.

1.2 Zielsetzung und Methodik

In dieser Arbeit soll eine Methode zur Ermittlung optimaler Dimensionen von Rad und Reifen im Umfeld spezifischer Anwendungsfälle und Mobilitätsszenarien entwickelt werden. Mit Hilfe der Methode sollen Entscheidungen in der frühen Entwicklungsphase anhand objektiver Zusammenhänge getroffen und im Anforderungsspektrum hinsichtlich Tragfähigkeit, Energieeffizienz, Fahrdynamik und Komfort eingeordnet werden.

Auf Basis vorhergehender Arbeiten, werden die innerhalb der einzelnen Eigenschaftsbereiche relevanten FTC dabei zunächst identifiziert und eingegrenzt. Im Rahmen dieser Literaturrecherche werden darüber hinaus die bereits bekannten Einflüsse der Rad- und Reifendimension, der Radlast sowie des Reifenfülldrucks auf die unterschiedlichen FTC analysiert.

Die Quantifizierung der Wirkzusammenhänge erfolgt daraufhin anhand eines ausschließlich datenbasierten Ansatzes, wodurch auf den Einsatz aufwendiger Methoden zur analytischen oder numerischen Modellbildung (z. B. FEM-Modelle) verzichtet werden kann. Unter Verwendung von Regressionsmodellen werden die Messdaten vergangener Reifenentwicklungen dabei statistisch ausgewertet und die Ergebnisse jeweils hinsichtlich ihrer physikalischen Ursachen interpretiert. Zur Erhöhung der Näherungsgüte und zur Berücksichtigung nicht-linearer Zusammenhänge werden darüber hinaus Künstliche Neuronale Netze (KNN) zur Näherung der Zusammenhänge verwendet.

Neben den Einflüssen der Dimensionen von Rad und Reifen, der Radlast sowie des Reifenfülldrucks werden die einzelnen FTC auch wesentlich durch die Reifenkonstruktion, die Profilgestaltung sowie die Gummimischung beeinflusst. Die hierdurch, bei gleichen Betriebsbedingungen und Dimensionskombinationen, hervorgerufenen Streuungen der FTC werden anhand der verfügbaren Messdaten analysiert und Kriterien zur objektiven Erfassung der möglichen Zielkonflikte erarbeitet.

Die quantifizierten Zusammenhänge aller Eigenschaftsbereiche werden anschließend in ein vorhandenes Programm zur Visualisierung von Lösungsräumen eingebunden. Auf diese Weise können mögliche Dimensionsbereiche von Rad und Reifen zur optimalen Zielerfüllung grafisch identifiziert und vorhandene Zielabweichungen frühzeitig aufgezeigt werden.

2 Stand des Wissens

Innerhalb dieses Kapitels wird zunächst in die Grundlagen der Räder- und Reifenentwicklung eingeführt. Des Weiteren werden die für die Eigenschaftsbereiche Tragfähigkeit, Energieeffizienz, Fahrdynamik und Komfort relevanten FTC identifiziert und eingegrenzt. Anhand von Literaturrecherchen wird dabei jeweils ein Überblick über die bereits bekannten Einflüsse der Rad- und Reifendimension, der Radlast sowie des Fülldrucks auf die einzelnen FTC gegeben. Darüber hinaus werden die zur späteren Analyse der Datenbanken benötigten statistischen Kenngrößen und Methoden erläutert.

2.1 Grundlagen Räder und Reifen

Die weiterführenden Kapitel dieser Arbeit erfordern Kenntnisse über bestimmte Begrifflichkeiten sowie über die physikalischen Grundlagen im Umfeld der Räder- und Reifenentwicklung. In diesem Kapitel sind die hierfür relevanten Inhalte zusammengefasst.

2.1.1 Begriffsdefinition

Die Begriffe Reifen, Rad, Felge und Kompletrad haben innerhalb der Automobilindustrie eine festgelegte Bedeutung. Im allgemeinen Sprachgebrauch werden die Begriffe hingegen häufig synonym oder unter falscher Bedeutung verwendet. Im Folgenden wird daher eine Begriffsdefinition entsprechend (Leister, 2015) vorgenommen.

Als Reifen wird das kraftübertragende Bauteil mit unmittelbarem Kontakt zur Fahrbahn bezeichnet. Ein Reifen besteht im Allgemeinen aus mehreren Gummikomponenten sowie aus diversen textilen und metallischen Materialien zur Erhöhung der Strukturfestigkeit. Es wird grundsätzlich zwischen Radial- und Diagonalfreifen unterschieden. Wesentlicher Unterschied der beiden Konstruktionsarten sind die Winkel der Cordfäden im Reifengewebe bzw. die

ausschließlich im Falle des Radialreifens vorhandene Gürtellage. Radialreifen zeichnen sich durch eine geringere Walkarbeit und ein besseres Verschleißverhalten aus und haben sich daher als Standard für Pkw- und Lkw-Reifen durchgesetzt (Heißing & Ersoy, 2013). Darüber hinaus unterscheidet man zwischen Sommer-, Winter- und Ganzjahresreifen, wobei insbesondere die Profilgestalt und die Gummimischung auf die jeweiligen Witterungsbedingungen hin optimiert werden. Runflat-Reifen haben im Gegensatz zu herkömmlichen Standardreifen verstärkte Seitenwände und können auch im Falle eines starken Luftverlusts über eine begrenzte Distanz verwendet werden.

Als Rad wird das tragende Bauteil bezeichnet, welches mit der Achsnabe des Fahrzeugs verschraubt ist. Die unter seitlicher Betrachtung sichtbare Fläche wird dabei als Radscheibe bezeichnet und ist für das Raddesign sowie für die Bremsenbelüftung von großer Bedeutung. Die Felge dient als Verbindungselement zwischen Radscheibe und Reifen und beschreibt die radial umlaufende Fläche des Rads, welche die Luftkammer des Reifens in Richtung der Radmitte abdichtet. Der Reifen liegt dabei in radialer Richtung auf den sogenannten Felgenschultern auf und wird seitlich durch die beiden Felgenhörner begrenzt. Der Abstand zwischen den Innenseiten der beiden Felgenhörner wird als Felgenmaulweite bezeichnet. Am häufigsten kommen in der Automobilindustrie Stahlräder und Leichtmetallräder aus Aluminium- oder Magnesiumlegierungen zum Einsatz.

Der Gesamtverbund aus Reifen und Rad wird als Komplettrad bezeichnet.

2.1.2 Tragverhalten des Reifens

In späteren Kapiteln werden die Auswirkungen der Dimensionen von Rad und Reifen, der Radlast sowie des Reifenfülldrucks auf unterschiedliche FTC analysiert. Eine entscheidende Rolle zur physikalischen Interpretation der Zusammenhänge spielt dabei das Tragverhalten des Reifens, welches sich im Wesentlichen aus dem Traganteil der Luft sowie dem Traganteil der Reifenstruktur zusammensetzt (Braess, 2013) (Heißing & Ersoy, 2013) (Zeller, 2012) (Trzesniowski, 2008).

Der Traganteil der Luft ergibt sich dabei aus dem Reifenfülldruck p_i , dem Umgebungsluftdruck p_u und der Reifenaufstandsfläche A_L . Der Traganteil der Reifenstruktur setzt sich aus der Steifigkeit der Reifenflanken und einem durch das Biegemoment des Laufstreifens hervorgerufenen Anteil zusammen. Die daraus resultierende vertikale Struktursteifigkeit c_z geht zusammen mit dem Einfederungsweg s_z in die Formel zur Berechnung der Reifentraglast F_z ein.

$$F_z = A_L \cdot (p_i - p_u) + c_z \cdot s_z \quad (2.1)$$

In Abhängigkeit von der Rollgeschwindigkeit sowie der Belastungsfrequenz wird der Strukturanteil beim rollenden Reifen zusätzlich von Dämpfungseffekten überlagert (Heißing & Ersoy, 2013) (Trzesniowski, 2008).

Aus den erläuterten Zusammenhängen ist ersichtlich, dass sich Veränderungen der Rad- und Reifendimension, der Radlast oder des Fülldrucks unmittelbar auf die Ausprägung der Reifenaufstandsfläche und damit auch auf das dynamische Reifenverhalten auswirken.

2.1.3 Definitionen nach ETRTO

Die European Tyre and Rim Technical Organisation (ETRTO) wurde im Jahr 1964 gegründet und geht aus der acht Jahre zuvor gegründeten European Tyre and Wheel Technical Conference (ETWTC) hervor. Innerhalb der Organisation haben sich eine Vielzahl an Reifen-, Rad- und Ventilherstellern mit Produktionsanlagen in Westeuropa zusammengeschlossen. Ziel der Kooperation ist die Angleichung nationaler Normen und die Festlegung gemeinsamer Auslegungsstandards. (Malinverni, 2015)

Auch die Definitionen der vorliegenden Arbeit bezüglich Rädern und Reifen basieren auf den Normen der ETRTO und werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

2.1.3.1 Kennzeichnung von Rädern und Reifen

Auf der Seitenwand jedes Reifens befindet sich eine Beschriftung, welche zur eindeutigen Identifikation seiner Dimension sowie der tragfähigkeitsrelevanten

Eigenschaften dient. Die einzelnen Bestandteile dieser Reifenkennzeichnung sind in (The European Tyre and Rim Technical Organisation, 2018) definiert und werden im Folgenden anhand von Abbildung 2.1 erläutert.

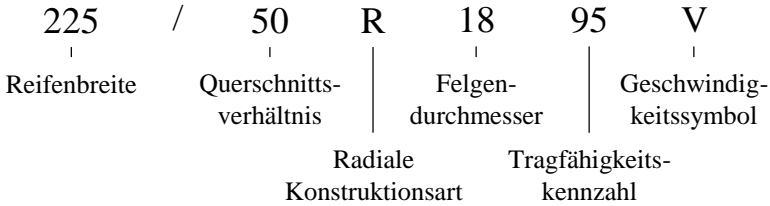


Abbildung 2.1: Reifenkennzeichnung nach ETRTO

Die erste Ziffernfolge beschreibt die Normbreite $B_{R,N}$ des Reifens in Millimeter und dient zur grundsätzlichen Klassifizierung der Reifenbreite. Die tatsächliche Breite des Reifens ist darüber hinaus von der Raddimension abhängig (siehe Kapitel 2.1.3.2).

Das Querschnittsverhältnis Q_R entspricht dem prozentualen Verhältnis zwischen der Flankenhöhe H_R und der Normbreite $B_{R,N}$ des Reifens. Die in (The European Tyre and Rim Technical Organisation, 2018) aufgeführten Pkw-Reifen weisen Querschnittsverhältnisse zwischen 20 und 80 Prozent auf.

Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.1.1 wird grundsätzlich zwischen Radial- und Diagonalreifen unterschieden. Die jeweilige Konstruktionsart geht durch die Buchstaben R bzw. D aus der Reifenkennzeichnung hervor.

Ebenso ist der Felgendurchmesser D_F in Zoll auf der Reifenflanke vermerkt. Für jeden Reifen sind dabei mehrere ebenfalls in Zoll angegebene Felgenmaulweiten B_F zulässig. Diese ist zusammen mit dem Felgendurchmesser sowie einem Buchstaben zur Formbeschreibung des Felgenhorns (z. B. 18 x 7 J) in der Radkennzeichnung enthalten.

Die Tragfähigkeitskennzahl $I_{R,LL}$ ist eine dimensionslose Größe, welche sich unmittelbar aus der Reifendimension ergibt. Durch (The European Tyre and Rim Technical Organisation, 2018) ist jeder Tragfähigkeitskennzahl eine maximal zulässige Traglast zugeordnet. Die Tragfähigkeit nimmt dabei mit dem Luftvolumen des Reifens zu, was physikalisch auf den geringeren Traganteil der Reifenstruktur (siehe Kapitel 2.1.2) und die damit verbundene Abnahme der Walkarbeit zurückzuführen ist. Sogenannte Reinforced- oder Extra Load-Reifen werden im Gegensatz zu Normal Load-Reifen speziell für den Gebrauch bei höheren Traglasten entwickelt und stellen damit einen Sonderfall dar. Die Tragfähigkeitskennzahl dieser Reifen ist in den meisten Fällen um den Wert vier höher als die Standardausführung der gleichen Reifendimension. In Kombination mit einem höheren Fülldruck sind entsprechend höhere Reifenlasten zulässig.

Durch das Geschwindigkeitssymbol $I_{R,SI}$ ist die maximal zulässige Fahrzeuggeschwindigkeit bei Gebrauch des jeweiligen Reifens festgelegt. Hierbei ist zu beachten, dass es bereits vor Erreichen der maximal zulässigen Geschwindigkeit zu einer Abnahme der Tragfähigkeit sowie zu einer Anhebung des Mindestfülldrucks kommen kann.

2.1.3.2 Rad- und Reifengeometrie

Zur Analyse der Auswirkungen der Rad- und Reifendimension auf die FTC unterschiedlicher Eigenschaftsbereiche werden in weiterführenden Kapiteln dieser Arbeit auch Größen verwendet, welche nicht unmittelbar aus der jeweiligen Kennzeichnung von Rad bzw. Reifen hervorgehen. Die erforderlichen Umrechnungen werden im Folgenden anhand der Formeln nach (The European Tyre and Rim Technical Organisation, 2018) erläutert. In Abbildung 2.2 sind die Maße zusammengefasst. Es ist darauf hinzuweisen, dass die geometrischen Größen des Rads im Folgenden jeweils in der Maßeinheit Zoll, die des Reifens hingegen jeweils in der Maßeinheit Millimeter angegeben werden.

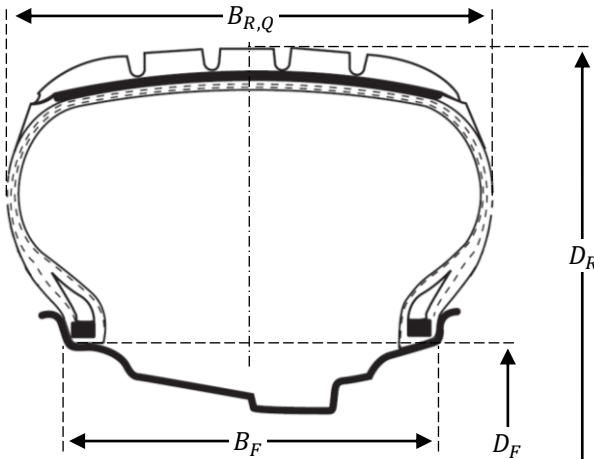


Abbildung 2.2: Reifenmaße nach ETRTO

Der Außendurchmesser D_R des Reifens berechnet sich anhand des Felgendurchmessers D_F , des Querschnittsverhältnisses Q_R sowie der Normbreite $B_{R,N}$ des Reifens.

$$D_R = D_F \cdot 25,4 + 2 \cdot Q_R \cdot B_{R,N} \quad (2.2)$$

In (The European Tyre and Rim Technical Organisation, 2018) ist jedem Reifen eine Messfelgenmaulweite $B_{F,M}$ zugeordnet. Diese Maulweite liegt in den meisten Fällen im mittleren Bereich der für einen Reifen zulässigen Felgenmaulweiten und wird beispielsweise zur Ermittlung des Rollwiderstands nach (ISO 2850, 2009) (siehe Kapitel 2.2.1.1) verwendet. Die Beträge der Abweichungen zwischen den für einen Reifen zulässigen Felgenmaulweiten und der Messfelgenmaulweite sind in den meisten Fällen geringer als ein Zoll. Zur Berechnung der Messfelgenmaulweite gilt der Zusammenhang aus Formel (2.3). Das Ergebnis wird dabei jeweils auf die nächstliegende, standardisierte Felgenmaulweite gerundet.

$$B_{F,M} = k_{F,M} \cdot \frac{B_{R,N}}{25,4} \quad (2.3)$$

Der Berechnungsfaktor $k_{F,M}$ ist hierbei in Abhängigkeit vom Querschnittverhältnis Q_R des Reifens definiert.

$$k_{F,M} = \begin{cases} 0,7, & Q_R > 45 \\ 0,85, & Q_R \leq 45 \end{cases} \quad (2.4)$$

Die Normbreite $B_{R,N}$ dient ausschließlich der grundsätzlichen Klassifizierung von Reifen. Die Querschnittsbreite $B_{R,Q}$ berücksichtigt darüber hinaus auch die Einflüsse des Querschnittsverhältnisses Q_R sowie der Felgenmaulweite B_F auf die tatsächliche Breite des Reifens.

$$B_{R,Q} = B_{R,N} + 0,4 \cdot (B_F \cdot 25,4 - k_{F,M} \cdot B_{R,N}) \quad (2.5)$$

2.1.4 Entwicklungsprozess

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden Methoden für die Grundausslegung von Rad und Reifen vorgestellt. Zur zeitlichen und inhaltlichen Einordnung dieser Entwicklungsphase wird im Folgenden der gesamte Prozess der Räder- und Reifenentwicklung erläutert. Die einzelnen Entwicklungsschritte sind darüber hinaus in Abbildung 2.3 veranschaulicht.

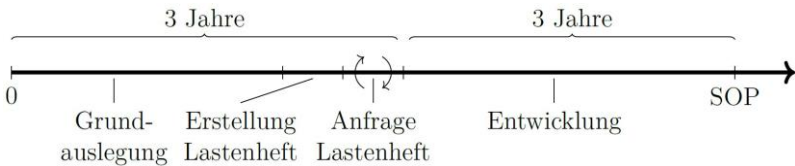


Abbildung 2.3: Phasen der Räder- und Reifenentwicklung (Hoffmann, 2018)

Die Entwicklung der Räder und Reifen beginnt üblicherweise etwa sechs Jahre vor Produktionsbeginn eines neuen Fahrzeugs (SOP) mit der Grundausslegung. In dieser Phase werden die Rad- und Reifendimensionen sämtlicher später angebotenen Kompleträder (Sommer-, Winter-, Ganzjahres-, Runflat-Reifen, etc.)

durch den Fahrzeughersteller festgelegt. Aufgrund der Tragfähigkeitsanforderung (siehe Kapitel 2.1.3.1) sind das Fahrzeuggewicht sowie die Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs dabei die grundlegenden Entscheidungskriterien. Die Raddimension wird darüber hinaus häufig durch den Bremsenbauraum eingeschränkt (Leister, 2015). Des Weiteren sollte bereits bei der Auswahl des Dimensionsportfolios auf die spätere Umsetzbarkeit aller weiteren Reifenanforderungen geachtet werden.

Nach etwa zwei Jahren beginnt die Erstellung des Lastenhefts, in welchem die unterschiedlichen Reifenanforderungen entsprechend den angestrebten Eigenschaften des Gesamtfahrzeugs festgelegt werden. Eine Erstversion des Lastenhefts wird dem Reifenhersteller etwa dreieinhalb Jahre vor SOP übermittelt. Daraufhin werden die Realisierbarkeit der gestellten Anforderungen zwischen dem Reifen- und dem Fahrzeughersteller diskutiert und, falls notwendig, entsprechende Anpassungen im Lastenheft vorgenommen. Das auf dieser Grundlage vereinbarte finale Lastenheft ist ab diesem Zeitpunkt für beide Seiten bindend.

Etwa drei Jahre vor SOP beginnt der Reifenhersteller daraufhin mit der eigentlichen Entwicklung. Während dieser Phase wird der Entwicklungsstand des Reifens in regelmäßigen Abständen durch den Fahrzeughersteller bewertet. Die jeweiligen Rückmeldungen fließen anschließend unmittelbar in die Reifenentwicklung ein, wodurch die Erreichung der im Lastenheft vereinbarten Ziele sichergestellt wird.

2.1.5 Objektive Reifenentwicklung

In der Vergangenheit wurden die für ein bestimmtes Fahrzeug gewünschten Reifeneigenschaften ausschließlich durch Zielwerte für subjektiv bewertete Fahrzeugeigenschaften, jeweils gegenüber einem Referenzreifen, festgelegt. Auf dieser Basis begann der Reifenhersteller mit der eigentlichen Reifenentwicklung, welche üblicherweise in mehreren Schleifen erfolgte. Die Entwicklungsreifen jeder Schleife wurden dabei durch Versuchsfahrer des Fahrzeugherstellers subjektiv bewertet und das Ergebnis jeweils an den Reifenhersteller zurückgemeldet. Der Entwicklungsprozess war abgeschlossen, sobald die im Lastenheft vereinbarten Bewertungsindizes vollständig erfüllt waren (Gutjahr, 2013) (Leister,

2015). Ein wesentlicher Nachteil dieser Vorgehensweise ist der hohe zeitliche und personelle Aufwand zur Bewertung der teilweise hohen Anzahl an Entwicklungsschleifen. Darüber hinaus sind in Einzelfällen leichte Abweichungen zwischen den Subjektivbewertungen von Fahrzeug- und Reifenhersteller möglich.

Als Ergänzung zur subjektiven Fahrzeugbeurteilung wird bereits seit mehreren Jahrzehnten an Methoden zur objektiven Beschreibung des Fahrzeugverhaltens gearbeitet (z. B. (Decker, 2009) (Zomotor, Braess, & Rönitz, 1998) (Rönitz, Braess, & Zomotor, 1977)). Dabei werden Korrelationen zwischen den Subjektivurteilen von Versuchsfahrern und den Messdaten von Fahrzeugsensoren hergestellt. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse können entweder Subjektivbewertungen bei darauffolgenden Tests objektiv validiert, oder das zu erwartende Beurteilungsergebnis selbst ohne Fahrversuch aus den objektiven Messgrößen abgeleitet werden.

Die Wechselwirkungen zwischen den querdynamischen Reifeneigenschaften, dem Fahrzeugverhalten sowie den jeweiligen Subjektivurteilen werden in (Gutjahr, 2013) ausführlich analysiert. Auf dieser Grundlage wird durch (Niedermeier, 2015) (Niedermeier, Peckelsen, & Gauterin, 2013) (Niedermeier, Peckelsen, Gauterin, & Gobbi, 2013) (Peckelsen, 2017) in die Reifenentwicklung auf Basis sogenannter „Functional Tyre Characteristics“ (FTC) eingeführt. Die FTC sind an Prüfständen messbare, objektive Kenngrößen zur Beschreibung des Reifenverhaltens. Neben den für die Fahrdynamik relevanten Reifeneigenschaften beinhaltet diese Definition auch sämtliche Kenngrößen weiterer Eigenschaftsbereiche, welche für die Reifenentwicklung von Bedeutung sind. Mit Hilfe von Simulationsmodellen werden die zur Erreichung des gewünschten Fahrzeugverhaltens erforderlichen Wertebereiche der FTC dabei bereits in der frühen Entwicklungsphase eines Fahrzeugs ermittelt. Diese optimalen Wertebereiche werden daraufhin ergänzend zu den subjektiven Bewertungsindizes im Lastenheft festgehalten und dem Reifenhersteller übermittelt. Ein großer Vorteil dieser Vorgehensweise ist die objektive und damit transparente Zielvereinbarung zwischen Fahrzeug- und Reifenhersteller. Darüber hinaus können Entwicklungsreifen zunächst ausschließlich anhand von Prüfstandsmessungen bewertet werden. Eine Subjektivbewertung wird erst durchgeführt, sobald die FTC innerhalb

der geforderten Bereiche liegen, wodurch die Anzahl subjektiver Bewertungsschleifen prinzipiell reduziert werden kann.

2.2 Grundlagen Energieeffizienz

Aufgrund des erhöhten gesellschaftlichen Umweltbewusstseins und der gesetzlichen Rahmenbedingungen ist die stetige Verbesserung der Energieeffizienz einer der größten Schwerpunkte innerhalb der Entwicklung moderner Pkw. Im Falle von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor wird dabei ein möglichst geringer Kraftstoffverbrauch angestrebt, während bei Elektrofahrzeugen die Erhöhung der Reichweite im Vordergrund steht. Neben einem hohen Wirkungsgrad der Antriebsmaschine trägt insbesondere die Reduzierung der Fahrwiderstände wesentlich zur Energieeffizienz des Gesamtfahrzeugs bei.

Auf horizontaler Fahrbahn setzt sich der Fahrwiderstand im Wesentlichen aus den Anteilen des Radwiderstands, des Luftwiderstands, des Beschleunigungswiderstands sowie den mechanischen Verlusten des Triebstrangs zusammen. (Braess, 2013) (Heißing & Ersoy, 2013) (Haken, 2013) (Mitschke & Wallentowitz, 2014) In (Strigel, Peckelsen, Unrau, & Gauterin, 2018) werden die Einflüsse der Dimensionen von Rad und Reifen auf die einzelnen Anteile des Fahrwiderstands analysiert. Dabei wird deutlich, dass die Auswirkungen je nach Fahrzyklus und Fahrzeugkonzept unterschiedlich sind und keine allgemein gültigen Aussagen hinsichtlich optimaler Dimensionen möglich sind. Daher sollten die für die Fahrzeugeffizienz relevanten Wechselwirkungen bereits in der Grundauslegung von Rad und Reifen berücksichtigt werden.

In diesem Abschnitt werden zunächst diejenigen Anteile des Fahrwiderstands vorgestellt, welche nach (Strigel, Peckelsen, Unrau, & Gauterin, 2018) durch die Dimensionen von Rad und Reifen beeinflusst werden. Darüber hinaus werden die Einflüsse der Rad- und Reifendimension, der Radlast sowie des Reifenfülldrucks auf die unterschiedlichen Fahrwiderstandsanteile anhand der Erkenntnisse vergangener Arbeiten diskutiert.

2.2.1 Rollwiderstand

Der Rollwiderstand des Reifens stellt bei Geradeausfahrt auf fester, trockener Fahrbahn den Hauptanteil des Radwiderstands dar und beruht, neben aerodynamischen Widerständen, im Wesentlichen auf den viskoelastischen Eigenschaften des Reifengummis. Die wiederkehrende Einfederung des rollenden Reifens wird dabei von Dämpfungskräften überlagert, welche entgegen der Verformungsrichtung wirken. Die zur Überwindung dieser Dämpfungskräfte erforderliche Walkarbeit wird in Wärmeenergie umgewandelt und führt zu einem entgegen der Rotationsrichtung des Reifens gerichteten Widerstandsmoment. (Mitschke & Wallentowitz, 2014) (Heißing & Ersoy, 2013) (Haken, 2013) (Peckelsen, Gauterin, & Unrau, 2015) (Greiner, Sauer, Gauterin, & Wiedemann, 2016) Ein weiterer Anteil des Rollwiderstands ergibt sich durch Gleitvorgänge zwischen Laufstreifen und Fahrbahn, welche durch die Stauchung des Reifenumfangs beim Durchlaufen der Latschfläche auftreten. (Heißing & Ersoy, 2013) (Breuer & Rohrbach-Kerl, 2015)

2.2.1.1 FTC-Definition

Abbildung 2.4 zeigt eine schematische Darstellung der beim frei rollenden Reifen wirkenden Kräfte.

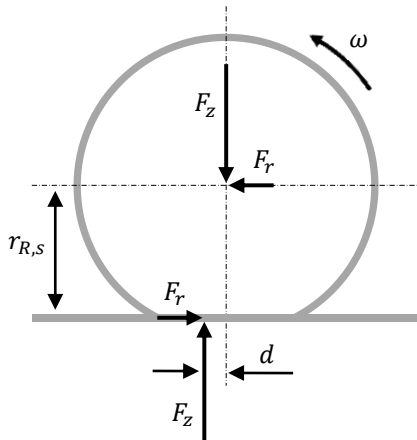


Abbildung 2.4: Kräfte beim frei rollenden Reifen

Aufgrund der entgegen der vertikalen Einfederung wirkenden Dämpfungskräfte (siehe Kapitel 2.2.1) wird die Radlast F_Z im Abstand d vor der Mitte des Reifenlatsches abgestützt. Zur Überwindung des hierdurch induzierten Widerstandsmoments ist die Rollwiderstandskraft F_r erforderlich, wobei der Zusammenhang aus Formel (2.6) gilt. Durch den Parameter c_r ist der Rollwiderstandsbeiwert des Reifens definiert. (Trzesniowski, 2008) (Mitschke & Wallentowitz, 2014)

$$F_r = \frac{d}{r_{R,d}} \cdot F_Z = c_r \cdot F_Z \quad (2.6)$$

Es ist hervorzuheben, dass nicht der in Abbildung 2.4 dargestellte statische Reifenradius $r_{R,s}$, sondern der dynamische Rollradius des Reifens $r_{R,d}$ (siehe Kapitel 2.2.3.1) als Hebelarm in das Momentengleichgewicht aus Formel (2.6) eingeht. Dies erscheint zunächst als Widerspruch zu den in Abbildung 2.4 dargestellten geometrischen Zusammenhängen, wird jedoch anhand von Formel (2.7) nachvollziehbar, wobei ein Ausgleich zwischen der rotatorisch wirksamen Walk- und der über die Umfangsgeschwindigkeit v_R translatorisch wirksamen Kompensationsleistung gefordert wird.

$$F_z \cdot d \cdot \omega \stackrel{!}{=} F_r \cdot v_R = F_r \cdot r_{R,d} \cdot \omega \quad (2.7)$$

2.2.1.2 Messung am Außentrommelprüfstand

Die Messung des Rollwiderstandsbeiwerts ist in (ISO 2850, 2009) festgelegt. Dabei werden die in Kapitel 2.2.1.1 erläuterten Kräfte auf einem Außentrommelprüfstand mit Stahloberfläche und einem Trommeldurchmesser von 2 m gemessen. Ein üblicher Messaufbau ist in Abbildung 2.5 dargestellt.



Abbildung 2.5: Außentrommelprüfstand zur Rollwiderstandsermittlung (Peckelsen, 2017)

Die Messung erfolgt im Falle von Pkw-Reifen bei einer Abrollgeschwindigkeit von 80 km/h und einer Radlast von 80 Prozent der maximal zulässigen Traglast nach (The European Tyre and Rim Technical Organisation, 2018). Ebenso ist die Felgenmaulweite zur Messung durch die Messfelgenmaulweite nach (The European Tyre and Rim Technical Organisation, 2018) (siehe Kapitel 2.1.3.2) vorgegeben. Der Rollwiderstand von Normal Load-Reifen wird bei einem Fülldruck von 2,1 bar ermittelt, während die Messung von Extra Load-Reifen bei

einem Fülldruck von 2,5 bar durchgeführt wird. Die Umgebungstemperatur während der Messung soll 25 °C betragen und der Reifen für die Dauer von mindestens drei Stunden vor Messbeginn bei diesen Bedingungen gelagert werden. Darüber hinaus geht der Messung eine Warmlaufphase von 30 Minuten voraus, wobei sich die Reifentemperatur der stationären Temperatur des jeweiligen Betriebspunktes annähert. Zur Eliminierung aerodynamischer und prüfstandsbedingter Widerstände wird eine zusätzliche Messung bei geringer Radlast (Empfehlung nach (ISO 2850, 2009): 100 N) durchgeführt. Der durch die Walkarbeit des Reifens hervorgerufene Anteil ergibt sich daraufhin aus der Differenz zwischen belasteter und unbelasteter Messung.

Aufgrund der stärkeren Verformung eines Reifens auf konvex gekrümmten Oberflächen, weichen die auf Trommelprüfständen ermittelten Werte des Rollwiderstands von den auf horizontaler Fahrbahn wirksamen Rollwiderständen ab. (Société de Technologie Michelin, 2005) In (Unrau, 2012) werden die Einflüsse des Trommelkrümmungsradius auf den Rollwiderstand anhand von Messungen analysiert und eine Umrechnungsformel zur Bestimmung des Rollwiderstands auf horizontaler Fahrbahn vorgestellt. Unter Verwendung des Rollwiderstandsbeiwerts auf der gekrümmten Trommeloberfläche $c_{r,T}$ berechnet sich der Rollwiderstandsbeiwert auf horizontaler Fahrbahn $c_{r,E}$ dabei nach Formel (2.8). Die Parameter r_R und r_T sind durch die Radien des unbelasteten Reifens sowie der Prüfstandstrommel definiert.

$$c_{r,E} = \frac{c_{r,T}}{\sqrt{1 + e_{FR} \frac{r_R}{r_T}}} \quad (2.8)$$

Der Faktor zum Einfluss der Trommelkrümmung e_{FR} ergibt sich aus dem Querschnittsverhältnis des Reifens Q_R , dem Reifenfülldruck p_i in bar sowie dem Anteil $F_{z,a}$ der Radlast an der maximal zulässigen Traglast nach (The European Tyre and Rim Technical Organisation, 2018). Es gilt der Zusammenhang aus Formel (2.9).

$$e_{FR} = (-0,012 + 0,383 \cdot Q_R) \cdot \frac{p_i}{F_{z,a}} \quad (2.9)$$

2.2.1.3 Einflüsse der Rad- und Reifendimension

Neben anderen Parametern wie beispielsweise der Fahrbahnbeschaffenheit oder den Betriebsbedingungen (siehe Kapitel 2.2.1.4), wird der Rollwiderstand eines Reifens wesentlich durch seine Dimension beeinflusst. Nach (Vennebörger, Strübel, Wies, & Wiese, 2013) (Clark, 1977) (Thompson, 1977) (Société de Technologie Michelin, 2005) (Rhyne & Cron, 2012) führt die Zunahme des Außendurchmessers, aufgrund der geringeren Vertikalverformung des Reifens, dabei generell zu einer Abnahme des Rollwiderstands. Wegen der geringeren relativen Flankenverformung ist auch durch die Zunahme der Flankenhöhe von einer Senkung des Rollwiderstands auszugehen (Société de Technologie Michelin, 2005).

Eine Erhöhung der Reifenbreite wird häufig mit einer Verschlechterung des Rollwiderstands in Verbindung gebracht, z. B. in (Allgemeiner Deutscher Automobil-Club, 2007). Hierbei ist zu beachten, dass das Reifenportfolio eines Fahrzeugs in der Regel auf vergleichbare Tragfähigkeiten bei einem bestimmten Außendurchmesser ausgelegt wird, weshalb eine Erhöhung der Reifenbreite zwangsläufig mit einer Zunahme des Felgendurchmessers einhergeht. Aufgrund dieser Tatsache ist eine allgemeine Bewertung der geometrischen Rollwiderstandseinflüsse anhand eines einzelnen Reifenportfolios nicht möglich. Untersuchungen von Lkw-Reifen durch (Clark, 1977) zeigen, dass eine Erhöhung der Reifenbreite bei konstanter Vertikalverformung und konstanter Radlast, unter gleichzeitig sinkendem Luftdruck, zu einer Erhöhung des Rollwiderstands führt. Bei Erhöhung der Reifenbreite unter gleichbleibendem Fülldruck, weisen die Untersuchungen hingegen auf eine Abnahme des Rollwiderstands unter sinkender Auslastung hin. Weitere Untersuchungen von (Curtiss, 1969) weisen ebenfalls auf eine Abnahme des Rollwiderstands mit zunehmender Reifenbreite hin, wobei die Rollwiderstände unterschiedlicher Reifenbreiten auf identischem Felgendurchmesser gegenübergestellt werden. In (Trzesniowski, 2008) (Kuwayama, Matsumoto, & Heguri, 2013) wird die Abnahme der Walkarbeit auf den kürzeren Latsch breiter Reifen und die damit verbundene Verringerung der Einlaufwinkel zurückgeführt. Breite Reifen weisen in der Regel eine höhere Quersteifigkeit als schmale Reifen auf und verformen sich daher bei der Übertragung von Seitenkräften weniger gegenüber der Felge (Heißing & Ersoy, 2013)

(Braess, 2013). Dies führt zu einer homogeneren Druckverteilung in der Bodenaufstandsfläche und damit zu einem erhöhten Haftungspotenzial in Längs- und Querrichtung (Heißing & Ersoy, 2013) (Braess, 2013). Der damit verbundene fahrdynamische Vorteil kann durch die Verwendung von Gummimischungen mit geringerer Dämpfung einen zusätzlichen Beitrag zur Senkung des Rollwiderstands breiter Reifen leisten.

In (Strigel, Peckelsen, Unrau, & Gauterin, 2018) werden die Einflüsse der Reifendimension auf den Rollwiderstand anhand einer multiplen linearen Regression untersucht. Die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Zusammenhänge werden dabei bestätigt.

Neben den Einflüssen der Reifenbreite, des Reifenaußendurchmessers und des Felgendurchmessers ist zusätzlich von Auswirkungen der Felgenmaulweite auf den Rollwiderstand auszugehen. In (Niemeyer, 2017) werden die Rollwiderstände von sechs Reifen unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte bei drei verschiedenen Maulweiten analysiert. Sowohl Stärke wie auch Richtung der Zusammenhänge sind dabei je nach Reifen unterschiedlich. Während der Entwicklungsphase wird ein Reifen üblicherweise für die Verwendung bei einer bestimmten Felgenmaulweite optimiert. Abweichungen von dieser Auslegungsmaulweite können die Spannungen innerhalb der Reifenstruktur verändern und die einzelnen FTC dadurch beeinflussen. Die heterogenen Einflüsse der Maulweite auf den Rollwiderstand in (Niemeyer, 2017) sind daher möglicherweise auf unterschiedliche Reifenkonstruktionen und die jeweilige Ausgangsoptimierung auf verschiedene Maulweiten zurückzuführen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Einflüsse der Felgenmaulweite auf den Rollwiderstand vernachlässigt.

2.2.1.4 Einflüsse der Radlast und des Fülldrucks

Aufgrund der viskoelastischen Gummieigenschaften besteht ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Vertikalverformung und den Walkverlusten des Reifens beim Abrollen. (Vennebörger, Strübel, Wies, & Wiese, 2013) Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.1.2 wird die Stärke der vertikalen Einfederung dabei maßgeblich von der Radlast und dem Reifenfülldruck beeinflusst.

Eine Erhöhung des Reifenfülldrucks führt grundsätzlich zu einer geringeren Vertikalverformung des Reifens und damit zu einer Senkung des Rollwiderstands. (Heißing & Ersoy, 2013) (Continental Reifen Deutschland GmbH, 2009) Wegen der stärkeren vertikalen Einfederung steigt der Rollwiderstand bei Erhöhung der Radlast hingegen an. Die Zunahme des Rollwiderstands weist dabei einen degressiven Verlauf auf, was nach (Société de Technologie Michelin, 2005) auf die Erwärmung des Reifens bei höheren Radlasten und die damit verbundene Abnahme der Dämpfungskräfte zurückzuführen ist. Der Rollwiderstandsbeiwert nimmt daher mit zunehmender Radlast näherungsweise linear ab. (Heißing & Ersoy, 2013)

In (Société de Technologie Michelin, 2005) wird eine Formel zur Berechnung des Rollwiderstands bei Veränderung der Radlast bzw. des Fülldrucks vorgestellt. Durch entsprechende Umformung kann damit der beim Fülldruck p_i und der Radlast F_z vorliegende Rollwiderstandsbeiwert c_r gegenüber dem beim Ausgangsfülldruck $p_{i,0}$ sowie der Ausgangsradlast $F_{z,0}$ vorliegenden Rollwiderstandsbeiwert $c_{r,0}$ nach Formel (2.10) näherungsweise berechnet werden.

$$c_r = c_{r,0} \cdot \left(\frac{p_i}{p_{i,0}}\right)^{-0,4} \cdot \left(\frac{F_z}{F_{z,0}}\right)^{-0,15} \quad (2.10)$$

2.2.2 Luftwiderstand

Die entgegen der Fahrtrichtung gerichtete Luftwiderstandskraft entsteht im Wesentlichen aufgrund von Druckunterschieden und Reibungseffekten an der Fahrzeugoberfläche sowie der Durchströmung der Karosserie zur Aggregatekühlung und zur Klimatisierung des Innenraums. (Schütz, 2013) (Haken, 2013) Die Luftwiderstandskraft steigt quadratisch mit der Fahrzeuggeschwindigkeit an und hat daher insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten erheblichen Einfluss auf die Energieeffizienz und die Fahrleistungen des Gesamtfahrzeugs. (Schütz, 2013) (Mitschke & Wallentowitz, 2014)

2.2.2.1 FTC-Definition

Der dimensionslose Luftwiderstandsbeiwert c_w hat sich innerhalb der Automobilindustrie als Proportionalitätskonstante zur Bewertung der aerodynamischen

Güte einer Fahrzeugform etabliert. Die Größe kann in Windkanälen bestimmt werden und geht, ebenso wie die Stirnfläche des Fahrzeugs, linear in die Berechnung der Luftwiderstandskraft ein. (Schütz, 2013) Aufgrund der Tatsache, dass sich der Luftwiderstand aus der Umströmung des gesamten Fahrzeugs ergibt, ist eine Aufteilung des Gesamtwiderstands in die Beiträge einzelner Komponenten nicht möglich. Die relevanten Einflüsse können jedoch anhand von Vergleichsmessungen unter gezielter Parametervariation identifiziert und quantifiziert werden (z. B. (Cogotti, 1983) (Wittmeier, Widdecke, Wiedemann, & Lindener, 2013) (Schnepf, 2016) (Schütz, 2017)).

Zusätzlich zur Luftwiderstandskraft des Gesamtfahrzeugs kommt es durch Oberflächenreibung und eine ungleiche Druckverteilung im Bereich der Radscheibe zu einem Widerstandsmoment an allen vier Rädern. Dieser sogenannte Ventilationswiderstand ist nicht im Luftwiderstandsbeiwert c_w enthalten und kann nur durch spezielle Messverfahren ermittelt werden. Zur Berücksichtigung des Ventilationswiderstands wird der Luftwiderstandsbeiwert um den Anteil $c_{w,v}$ ergänzt. Für den resultierenden Luftwiderstandsbeiwert c_w^* gilt der Zusammenhang aus Formel (2.11). (Link, Widdecke, Wittmeier, & Wiedemann, I-2016) (Link, Widdecke, Wittmeier, & Wiedemann, II-2016)

$$c_w^* = c_w + c_{w,v} \quad (2.11)$$

2.2.2.2 Einflüsse der Rad- und Reifendimension

Nach (Pfadenhauer, Wickern, & Zwicker, 1996) ist ein Anteil von etwa 25 Prozent des aerodynamischen Fahrwiderstands auf Beiträge durch das Kompletttrad zurückzuführen. Entsprechend wirken sich Veränderungen der Dimension von Rad oder Reifen teilweise deutlich auf den Luftwiderstand des Gesamtfahrzeugs aus.

In (Wittmeier, 2014) werden die Auswirkungen der Reifenbreite auf den Luftwiderstand des Fahrzeugs ausführlich untersucht. Die Einflüsse der Rad- und Reifendimensionen auf den Luftwiderstandsbeiwert verhalten sich dabei über unterschiedliche Fahrzeugkonzepte hinweg ähnlich. Veränderungen der Fahrzeugstirnfläche werden daher vernachlässigt und die durch unterschiedliche

Rad- und Reifendimensionen hervorgerufenen Veränderungen der Luftwiderstandskräfte ausschließlich dem Luftwiderstandsbeiwert zugeordnet. Die Felgenreifenweite entspricht bei allen Messungen jeweils der Messfelgenreifenweite nach (The European Tyre and Rim Technical Organisation, 2018) (siehe Kapitel 2.1.3.2). Die Verbreiterung des Reifens um 10 mm bei allen vier Reifen des Fahrzeugs führt nach (Wittmeier, 2014) jeweils zu einer Erhöhung des Luftwiderstandsbeiwerts um etwa 0,006.

Der Einfluss des Felgendurchmessers auf den Luftwiderstandsbeiwert wird in (Schütz, 2017) analysiert. Zur Quantifizierung der Zusammenhänge werden die Luftwiderstandsbeiwerte eines Fahrzeugs mit 104 unterschiedlichen Rädern gemessen, wobei ein näherungsweise linearer Zusammenhang zwischen dem Felgendurchmesser und dem Luftwiderstandsbeiwert besteht. Die Vergrößerung des Felgendurchmessers an allen vier Rädern um einen Zoll ist mit einer Erhöhung des Luftwiderstandsbeiwerts um etwa 0,008 verbunden. Es ist zu beachten, dass innerhalb eines Felgendurchmessers erhebliche Unterschiede zwischen den aerodynamischen Eigenschaften unterschiedlicher Raddesigns vorliegen können. Die in (Schütz, 2017) verwendeten Räder stammen von insgesamt fünf unterschiedlichen Fahrzeugen und beinhalten vielfältige Raddesigns. Auf diese Weise können die durch das Raddesign hervorgerufenen Streuungen identifiziert und die mittleren geometrischen Einflüsse isoliert betrachtet werden.

Veränderungen des Reifenaußendurchmessers haben vielfältige, teilweise gegenläufige Auswirkungen auf den Luftwiderstandsbeiwert. In (Janssen & Hucho, 1973) (Schütz, 2017) wird deutlich, dass eine Vergrößerung des Reifenaußendurchmessers zu einer Erhöhung des Luftwiderstands führt, sofern die Veränderung des Bodenabstands nicht durch fahrwerksseitige Anpassungen kompensiert wird. Gleichzeitig verringert sich durch den größeren Außendurchmesser der Abstand zwischen Reifen und Radlauf, was mit einer Reduzierung des Luftwiderstandsbeiwerts einhergeht. (Cogotti, 1983) Hierbei ist zu beachten, dass ein gewisser Mindestabstand zur Vermeidung von Schleifkontakten einzuhalten ist. Hierfür können Anpassungen der Fahrzeugkarosserie erforderlich sein, welche wiederum zu einer Erhöhung der Stirnfläche oder zu einer generellen Verschlechterung der Fahrzeugumströmung führen können. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Verwendung verschiedener Reifenaußendurchmesser auf

einem identischen Fahrzeug zu Veränderungen des Luftwiderstands führen kann, wobei sich die einzelnen Effekte teilweise kompensieren. Darüber hinaus wird das aerodynamische Verhalten eines Fahrzeugs in der Regel auf einen bestimmten Reifenaußendurchmesser hin optimiert. (Strigel, Peckelsen, Unrau, & Gauterin, 2018) Die Einflüsse des Reifenaußendurchmessers auf den Luftwiderstandsbeiwert werden daher vernachlässigt.

Hinsichtlich der Einflüsse des Felgendurchmessers auf den nicht im Luftwiderstandsbeiwert enthaltenen Ventilationswiderstand sind bisher keine Untersuchungen bekannt. In (Link, Widdecke, Wittmeier, & Wiedemann, I-2016) werden jedoch die Auswirkungen unterschiedlicher Raddesigns auf den Luftwiderstandsbeiwert sowie auf den Ventilationswiderstand analysiert. Der Anteil der Veränderungen des Ventilationsbeiwerts an den Veränderungen des Luftwiderstandsbeiwerts beträgt dabei in den meisten Fällen weniger als 15 Prozent. In (Strigel, Peckelsen, Unrau, & Gauterin, 2018) wird angenommen, dass sich Veränderungen des Raddurchmessers in ähnlicher Weise auf den Ventilationswiderstand auswirken wie Veränderungen des Raddesigns. Zur Berücksichtigung des höheren Ventilationswiderstands infolge größerer Felgendurchmesser wird daher dem Luftwiderstandsbeiwert ein zusätzlicher Anteil von 10 Prozent der ohnehin vorhandenen Erhöhung hinzugerechnet.

Entsprechend den in diesem Abschnitt erläuterten quantitativen Zusammenhängen lässt sich die durch unterschiedliche Dimensionen von Rad und Reifen hervorgerufene Veränderung Δc_w^* des Luftwiderstandsbeiwerts näherungsweise nach Formel (2.12) beschreiben. Die Größen $\Delta B_{R,Q}$ und ΔD_F sind dabei durch die geometrischen Veränderungen von Rad und Reifen in Metern definiert.

$$\Delta c_w^* = 0,60 \cdot \Delta B_{R,Q} + 0,31 \cdot \Delta D_F + 0,1 \cdot 0,31 \cdot \Delta D_F \quad (2.12)$$

2.2.2.3 Einflüsse der Radlast und des Fülldrucks

Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.1.2 ist die Vertikalverformung eines Reifens unter anderem vom Fülldruck und von der Radlast abhängig. Veränderungen der Betriebsbedingungen haben daher unmittelbare Auswirkungen auf die Reifenkontur und beeinflussen damit auch die Fahrzeugumströmung. In

(Wittmeier, 2014) wird deutlich, dass höhere Radlasten bei konstanter Fahrwerkshöhe zu einer Verschlechterung der aerodynamischen Fahrzeugeigenschaften führen, wobei die Nachteile durch eine entsprechende Erhöhung des Reifenfülldrucks kompensierbar sind. Demnach sind die Vertikalverformung bzw. die Auslastung des Reifens maßgeblich für den aerodynamischen Einfluss der Reifenkontur. Die für ein Fahrzeug empfohlenen Reifenfülldrücke werden üblicherweise hinsichtlich einer angestrebten Reifenauslastung festgelegt. (Leister, 2015) Aus diesem Grund weisen die Auslastungen der einzelnen Reifen eines Reifenportfolios meist nur geringe Unterschiede auf. Die Einflüsse von Radlast und Fülldruck bzw. der Reifenkontur auf den Luftwiderstandsbeiwert werden innerhalb der vorliegenden Arbeit daher vernachlässigt.

2.2.3 Beschleunigungswiderstand

Bei der Beschleunigung eines Körpers entsteht, entsprechend dem zweiten Newtonschen Axiom, eine entgegen der Beschleunigungsrichtung wirkende Trägheitskraft. Im Falle rotierender Massen liegt ein entsprechendes Widerstandsmoment entgegen der Winkelbeschleunigung vor. (Mahnken, 2010) Die während der Beschleunigungsphasen eines Fahrzeugs wirksamen Trägheitskräfte und –momente stellen einen Fahrwiderstand dar, welcher durch die Antriebmaschine zu überwinden ist. (Braess, 2013) (Haken, 2013)

2.2.3.1 FTC-Definition

Die translatorische Beschleunigung von Rad und Reifen geht mit der Radmasse m_F bzw. der Reifenmasse m_R in die Energiebilanz ein. Die rotatorischen Trägheiten werden durch die zugehörigen Massenträgheitsmomente J_F bzw. J_R abgebildet. Zur Abbildung der Trägheiten des Komplettrads wird innerhalb dieser Arbeit die translatorische Ersatzmasse m_E herangezogen, welche sich entsprechend (Société de Technologie Michelin, 2005) (Heißing & Ersoy, 2013) nach Formel (2.13) berechnet.

$$m_E = m_F + m_R + \frac{J_F + J_R}{r_{R,d}^2} \quad (2.13)$$

Die Größe $r_{R,d}$ beschreibt dabei den dynamischen Rollradius des Reifens und ist näherungsweise durch Formel (2.14) definiert. (The European Tyre and Rim Technical Organisation, 2018) Der tatsächliche Abrollumfang des Reifens, welcher sich aus dem dynamischen Rollradius ergibt, ist grundsätzlich geringer als der geometrisch berechenbare Abrollumfang. Grund hierfür sind Gleitvorgänge zwischen Gummi und Fahrbahn beim Durchlaufen der Latschfläche. (Breuer & Rohrbach-Kerl, 2015)

$$r_{R,d} = \frac{3,05 \cdot D_R}{2 \cdot \pi} \quad (2.14)$$

2.2.3.2 Einflüsse der Rad- und Reifendimension

In (Strigel, Peckelsen, Unrau, & Gauterin, 2018) werden Formeln zur näherungsweisen Berechnung der Masseneigenschaften von Rad und Reifen hergeleitet. Zur Näherung der Reifenmasse m_R werden dabei jeweils die Lauffläche sowie die beiden Flankenflächen herangezogen. Die Radmasse m_F wird entsprechend durch die Flächen der Radscheibe und der Felge genähert. Es gelten die Zusammenhänge aus Formel (2.15) und Formel (2.16), wobei jeweils die Beträge in Metern für die geometrischen Größen von Rad und Reifen zu verwenden sind. Die Faktoren resultieren dabei aus einer Datenbasis von 54 Reifen bzw. 23 Rädern unterschiedlicher Dimensionen.

$$m_R = -2,99 \text{ kg} + \frac{21,32 \text{ kg}}{m^2} \cdot \pi \cdot D_R \cdot B_{R,N} + \frac{8,56 \text{ kg}}{m^2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_R^2}{4} - \frac{D_F^2}{4} \right) \quad (2.15)$$

$$m_F = -1,71 \text{ kg} + \frac{39,62 \text{ kg}}{m^2} \cdot \pi \cdot \frac{D_F^2}{4} + \frac{24,70 \text{ kg}}{m^2} \cdot \pi \cdot D_F \cdot B_F \quad (2.16)$$

Zur Näherung des Massenträgheitsmoments wird der Reifen in (Strigel, Peckelsen, Unrau, & Gauterin, 2018) als rotierender Hohlzylinder betrachtet. Das Rad wird entsprechend als rotierender Vollzylinder mit gleichverteilter Materialdichte angesehen. Unter Verwendung der jeweiligen Massen ergeben sich die Massenträgheitsmomente J_R und J_F von Reifen und Rad näherungsweise nach Formel (2.17) und Formel (2.18). Auch hierbei sind die Beträge in Metern für die geometrischen Parameter zu verwenden. Die Faktoren resultieren aus einer Datenbasis von 19 Reifen bzw. 23 Rädern unterschiedlicher Dimensionen.

$$J_R = -1,01 \text{ kg} \cdot m^2 + 5,04 \cdot m_R \cdot \frac{D_R^2}{4} - 3,32 \text{ m} \cdot m_R \cdot \frac{D_R}{2} + 0,76 \text{ m}^2 \cdot m_R \quad (2.17)$$

$$J_F = 0,01 \text{ kg} \cdot m^2 + 1,31 \cdot \frac{1}{2} \cdot m_F \cdot \frac{D_F^2}{4} \quad (2.18)$$

Die erläuterten Formeln weisen mit Bestimmtheitsmaßen von mindestens 0,79 in allen Fällen eine hohe Näherungsgüte auf (Strigel, Peckelsen, Unrau, & Gauterin, 2018) und werden daher im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit zur Berechnung der Masseneigenschaften von Rad und Reifen herangezogen.

2.2.3.3 Einflüsse der Radlast und des Fülldrucks

Im Gegensatz zum Reifen, welcher die Radlast größtenteils durch das Luftvolumen trägt (siehe Kapitel 2.1.2), muss die Festigkeit des Rads durch entsprechenden Materialeinsatz gewährleistet werden. Daher ist die Radmasse nicht nur von der Dimension und dem Raddesign, sondern auch von der konzeptionellen Radlast des jeweiligen Fahrzeugs abhängig. Die in Kapitel 2.2.3.2 vorgestellten Formeln zur Näherung der Masseneigenschaften des Rads basieren auf einer Datenbasis von 23 Aluminiumguss-Rädern unterschiedlicher Dimensionen und Fahrzeuge. (Strigel, Peckelsen, Unrau, & Gauterin, 2018) Dabei wird innerhalb identischer Raddimensionen jeweils der Mittelwert aller Radmassen derselben Dimension zur Näherung herangezogen. Vorhandene Streuungen der Radmasse in Folge unterschiedlicher Radlasten werden auf diese Weise ausgeblendet und eine belastbare Näherung der mittleren Radmasse ermöglicht. Für die Festlegung einer Raddimension innerhalb der Grundauslegung ist die Kenntnis über die mittlere Radmasse ausreichend, da alle verfügbaren Dimensionen gleichermaßen von Anpassungen entsprechend den Festigkeitsanforderungen betroffen wären.

Aufgrund der geringen Dichte der Luft im Verhältnis zur Dichte der Werkstoffe von Rad und Reifen, werden Einflüsse des Reifenfülldrucks auf die Masseneigenschaften des Komplettrads vernachlässigt.

2.3 Grundlagen Fahrdynamik

Nach (Heißing & Ersoy, 2013) beinhaltet der Begriff Fahrdynamik alle Bewegungen eines Fahrzeugs sowie die auf das Fahrzeug einwirkenden Kräfte und Momente. Klassischerweise erfolgt dabei eine Unterscheidung zwischen den translatorischen Freiheitsgraden in Längs-, Quer- und Vertikalrichtung. (Heißing & Ersoy, 2013) (Braess, 2013) Die Reaktion des Fahrzeugs auf Fahrerhandlungen oder äußere Störungen wird als Fahrverhalten bezeichnet, wobei ein unmittelbarer Zusammenhang zur subjektiven Wahrnehmung des Fahrers hinsichtlich Agilität, Fahrsicherheit sowie Fahrkomfort besteht. (Becker, 2000) (Heißing & Ersoy, 2013) (Käppler, 2015) Die Fahrdynamik trägt daher wesentlich zur Ausprägung des Fahrzeugcharakters bei und ist damit ein wichtiges Merkmal zur optimalen Marktpositionierung. (Heißing & Ersoy, 2013) (Braess, 2013) (Decker, 2009)

Neben den Einflüssen durch konstruktive und geometrische Fahrzeugeigenschaften, wie beispielsweise der Fahrzeugmasse, dem Radstand oder der Spurweite, wird das Fahrverhalten grundlegend durch die Fahrwerkskinematik sowie durch die verschiedenen Komponenten des Fahrwerks beeinflusst. Auch die Ausprägung der funktionalen Eigenschaften von Rad und Reifen hat erheblichen Einfluss auf die Fahrdynamik des Gesamtfahrzeugs. (Braess, 2013) (Heißing & Ersoy, 2013) (Mitschke & Wallentowitz, 2014) (Trzesniowski, 2008) Im Umfeld neuer Fahrzeugarchitekturen, Antriebskonzepte und Anwendungsfälle kommt es derzeit sowohl zu Veränderungen der konstruktiven und geometrischen Fahrzeugeigenschaften wie auch zu veränderten oder neuen Anforderungen an das Fahrverhalten der jeweiligen Fahrzeuge. (Proff, Brand, Mehnert, Schmidt, & Schramm, 2016) (Wiedemann, 2014) (Fuchs, 2014) (Schönemann, Henze, Küçükay, & Kudritzki, 2013) Um die Erreichung der Gesamtfahrzeugziele langfristig sicherzustellen, sollten die hieraus resultierenden Komponentenanforderungen bereits in der frühen Entwicklungsphase berücksichtigt werden.

In diesem Abschnitt werden zunächst verschiedene Methoden zur Messung und Modellierung fahrdynamisch relevanter Reifeneigenschaften vorgestellt. Anschließend werden jene FTC eingeführt, welche entsprechend den Erkenntnissen vorhergehender Arbeiten starke Korrelationen zur Fahrdynamik des Fahrzeugs

und zur subjektiven Wahrnehmung des Fahrverhaltens durch den Fahrer aufweisen. Darüber hinaus werden jeweils die bekannten Einflüsse der Dimensionen von Rad und Reifen sowie der Betriebsbedingungen auf die einzelnen FTC erläutert.

2.3.1 Reifenmodelle

Reifenmodelle bilden die Grundlage zur objektiven Beschreibung des dynamischen Reifenverhaltens. Im Laufe der letzten Jahrzehnte wurde hierbei eine Vielzahl an Modellen unterschiedlicher Genauigkeit und Komplexität entwickelt. Die vergleichsweise geringste Komplexität weisen empirische Modelle auf, welche das Reifenverhalten durch mathematische Formeln beschreiben. Die Zusammenhänge werden dabei anhand von Mess- oder Simulationsdaten parametrisiert und bieten die Möglichkeit zur echtzeitfähigen Einbindung in Fahrdynamiksimulationen. Eine Prognose des Reifenverhaltens anhand konstruktiver Parameter ist aufgrund der fehlenden Berücksichtigung physikalischer Zusammenhänge hingegen nicht möglich. Zur Lösung dieses Problems können physikalische Reifenmodelle eingesetzt werden, welche das Reifenverhalten, unter Berücksichtigung mechanischer Zusammenhänge oder auf Basis von Mehrkörper- und FEM-Modellen, abbilden. Physikalische Reifenmodelle benötigen aufgrund der höheren Komplexität mehr Rechenleistung gegenüber empirischen Modellen und sind daher in den meisten Fällen nicht echtzeitfähig in Fahrdynamiksimulationen integrierbar. Der verwendete Modelltyp ist jeweils entsprechend den Anforderungen des vorliegenden Anwendungsfalls auszuwählen. (Pacejka, 2002) (Leister, 2015) (Heißing & Ersoy, 2013) (Einsle, 2010) (Adamski, 2014)

Zur objektiven Erfassung des dynamischen Reifenverhaltens wird in der vorliegenden Arbeit das sogenannte Magic Formula-Reifenmodell verwendet, welches auf eine Kooperation zwischen der TU Delft und Volvo gegen Mitte der 1980er-Jahre zurückgeht. (Pacejka & Bakker, 1993) (Pacejka, 2002) Das Modell ermöglicht die Beschreibung des quasistationären Reifenverhaltens anhand trigonometrischer Funktionen und wurde unter Berücksichtigung physikalischer Zusammenhänge entwickelt. In (Pacejka, 2002) wird das Modell daher als „semiempirisch“ bezeichnet. Der allgemeine Ansatz der „Magic Formula“ ist in den Formeln (2.19) bis (2.21) dargestellt.

$$y_P = P_D \cdot \sin \left(P_C \cdot \arctan \left(P_B \cdot x_P - P_E \cdot (P_B \cdot x_P - \arctan(P_B \cdot x_P)) \right) \right) \quad (2.19)$$

$$x_P = X_P + S_{H,P} \quad (2.20)$$

$$Y_P = y_P + S_{V,P} \quad (2.21)$$

Die abhängige Variable Y_P beschreibt dabei die Reifenkräfte oder –momente bei gegebenen Werten der Radlast und des Radsturzes. Die Betriebsbedingungen Längsschlupf oder Schräglaufwinkel gehen jeweils durch die Variable X_P in die Berechnung ein. Anhand der Parameter P_D , P_C , P_B , P_E , $S_{H,P}$ und $S_{V,P}$ können sowohl die Form wie auch die Lage des Funktionsverlaufs variiert werden. Für weiterführende Informationen sei hierbei auf die Erläuterungen in (Pacejka, 2002) verwiesen.

2.3.2 Messung am Flachbahnprüfstand

In weiterführenden Kapiteln dieser Arbeit werden unterschiedliche Einflüsse auf die fahrdynamisch relevanten FTC anhand der Messdaten vorhergehender Reifenentwicklungen analysiert. Die Daten wurden dabei jeweils auf dem in Abbildung 2.6 dargestellten Flachbahnprüfstand der Firma IABG ermittelt. (Schmid & Förschl, 2009)



Abbildung 2.6: Flachbahnprüfstand der Firma IABG (Schmid & Förschl, 2009)

Das umlaufende Edelstahlband des Prüfstands ist etwa 0,7 mm dick und weist eine nach (ISO 6344-2, 1998) genormte Oberfläche der Rauigkeit P120 auf. Die Umgebungstemperatur in der Prüfkammer beträgt 23°C und wird auch zur Vorkonditionierung der Reifen verwendet. Zur Ermittlung des dynamischen Reifenverhaltens werden jeweils die Parameter Längsschlupf, Schräglaufwinkel, Radlast, Radsturz und Fülldruck auf Basis eines vorgegebenen Messprogramms variiert und die resultierenden Kräfte und Momente in der Radnabe gemessen. Die Messung der längs- und vertikaldynamischen Reifeneigenschaften erfolgt bei einer Abrollgeschwindigkeit von 80 km/h, während das querdynamische Reifenverhalten bei Abrollgeschwindigkeiten von 40 km/h bzw. 20 km/h im transienten Fall gemessen wird. Es ist zu beachten, dass sowohl die Betriebsbedingungen wie auch die Oberflächeneigenschaften des Stahlbands Auswirkungen auf die gemessenen Reifenkräfte und -momente haben. Aufgrund der einheitlichen Prüfabläufe und Messbedingungen bei allen Reifenmessungen ist innerhalb der vorliegenden Arbeit jedoch von vergleichbaren Messergebnissen auszugehen. Mögliche Einflüsse der Betriebsbedingungen und des Prüfstands werden daher vernachlässigt.

2.3.3 Vertikaldynamik

Die Auslegung der Vertikaldynamik erfolgt grundsätzlich im Hinblick auf ein stabiles, agiles und gleichzeitig komfortables Fahrzeugverhalten. Dabei sind die vertikalen Aufbaubeschleunigungen entscheidend für das Komfortverhalten, während die Minimierung der dynamischen Radlastschwankungen zu einem stabilen und agilen Fahrverhalten beiträgt. Die Ausprägung der jeweiligen Merkmale wird wesentlich durch die Steifigkeit der Aufbaufedern, die Dämpfungskonstanten der Aufbaudämpfer sowie durch die Vertikalsteifigkeit der Reifen beeinflusst. (Heißing & Ersoy, 2013) (Braess, 2013) (Mitschke & Wallentowitz, 2014) (Breuer B. , 2012) Im Falle der Reifensteifigkeit wird zwischen der statischen Steifigkeit beim stehenden Rad, der quasistatischen Steifigkeit beim rollenden Rad sowie der dynamischen Steifigkeit bei sinusförmiger Anregung unterschieden. (Hilscher, 2008)

2.3.3.1 FTC-Definition

Nach (Hilscher, 2008), (Peckelsen, 2017) und (Di Luise, 2015) weist die quasistatische Vertikalsteifigkeit $c_{R,z}$ des bei 80 km/h rollenden Reifens eine starke Korrelation zum Abrollkomfort des Fahrzeugs auf. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird diese Größe daher als FTC zur objektiven Erfassung des vertikaldynamischen Reifenverhaltens herangezogen. Die Vertikalsteifigkeit ist grundsätzlich durch den Gradienten der Radlast über dem Einfederungsweg definiert (Heißing & Ersoy, 2013), wobei im Bereich üblicher Radlasten ein annähernd linearer Verlauf vorliegt. (Pottinger & Yager, 1986) (Hilscher, 2008) (Heißing & Ersoy, 2013) (Holtschulze, 2006) (Unterreiner, 2013) Unter Verwendung der Radlast F_z und dem vertikalen Einfederungsweg s_z lässt sich die Berechnung der Vertikalsteifigkeit $c_{R,z}$ damit zu Formel (2.22) vereinfachen.

$$c_{R,z} = \frac{F_z}{s_z} \tag{2.22}$$

2.3.3.2 Einflüsse der Rad- und Reifendimension

Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.1.2 wirken sich Veränderungen der Dimensionen von Rad oder Reifen unmittelbar auf das Tragverhalten des Reifens

und damit auch auf die Steifigkeit in vertikaler Richtung aus. Aufgrund der geometrischen Zusammenhänge ergibt sich die Länge des Reifenlatsches dabei hauptsächlich aus dem Außendurchmesser sowie aus der vertikalen Einfederung des Reifens. (Holtschulze, 2006) Demnach führt die Erhöhung des Außendurchmessers bei konstanter Vertikalverformung zu einer Verlängerung des Reifenlatsches und damit zu einer Vergrößerung der Reifenaufstandsfläche. Dies ist aufgrund der Zusammenhänge aus Kapitel 2.1.2 mit einer Erhöhung der Vertikalsteifigkeit des Reifens verbunden. Auch die Verbreiterung des Reifens führt bei gleichbleibender Vertikalverformung zu einer Vergrößerung der Latschfläche und nach (Braess, 2013) zu einer Zunahme der vertikalen Reifensteifigkeit. Darüber hinaus ist die Erhöhung der Reifenflanke mit einer Verringerung der Vertikalsteifigkeit des Reifens verbunden (Braess, 2013) (Einsle, 2010), was auf die geringere Flankensteifigkeit bzw. die geringere relative Verformung der Reifenflanken zurückzuführen ist. In (Niemeyer, 2017) wird die Vertikalsteifigkeit von sechs Reifen verschiedener Fahrzeugkonzepte bei jeweils drei unterschiedlichen Maulweiten analysiert. Im Falle des rollenden Reifens führen Erhöhungen der Felgenmaulweite dabei zu einer Zunahme der vertikalen Steifigkeit des Reifens.

2.3.3.3 Einflüsse der Radlast und des Fülldrucks

In den Radlastbereichen des üblichen Fahrbetriebs weist der Verlauf der vertikalen Reifenverformung über der Radlast einen annähernd linearen Zusammenhang auf (siehe Kapitel 2.3.3.1). Dementsprechend sind die Auswirkungen der Radlast auf die vertikale Reifensteifigkeit in diesen Betriebspunkten gering. Aufgrund der unmittelbaren, physikalischen Auswirkungen der Traglast und des Fülldrucks auf die Aufstandsfläche eines Reifens (siehe Kapitel 2.1.2), ist die Senkung des Reifenfülldrucks grundsätzlich mit einer Verringerung der Vertikalsteifigkeit des Reifens verbunden. (Hilscher, 2008) (Heißing & Ersoy, 2013) (Einsle, 2010) (Holtschulze, 2006)

2.3.4 Querdynamik

Das querdynamische Verhalten eines Fahrzeugs ist sowohl für den subjektiven Fahreindruck wie auch für die Fahrsicherheit von großer Bedeutung. (Heißing &

Ersoy, 2013) (Decker, 2009) (Braess, 2013) Nach (Mitschke & Wallentowitz, 2014) und (Heißing & Ersoy, 2013) sollte das Fahrzeug dabei leicht kontrollierbar sein und ein vorhersehbares Fahrverhalten aufweisen. Darüber hinaus sollten die erreichbaren Kurvengeschwindigkeiten und Querbeschleunigungen eine ausreichende Stabilitätsreserve bieten und die Fahrgrenzen gleichzeitig deutlich erkennbar sein. Die zur Kurshaltung erforderlichen Fahrzeugbewegungen werden in erster Linie durch Lenkbewegungen des Fahrers und die daraus resultierenden Reifenseitenkräfte hervorgerufen. (Heißing & Ersoy, 2013) (Zomotor, 1991) Der subjektive Fahreindruck ist dabei sowohl von den Reifenkräften in stationären Betriebspunkten wie auch vom zeitlichen Verlauf des Kraftaufbaus abhängig. (Heißing & Ersoy, 2013) (Decker, 2009) (Braess, 2013)

2.3.4.1 FTC-Definition

Das Vorliegen von Reifenseitenkräften ist grundsätzlich mit einer Verformung der Kontaktfläche in Querrichtung verbunden, wodurch das Abrollen des Reifens in Richtung der Radmittelebene von seitlichem Schlupf überlagert wird. Der vom Geschwindigkeitsvektor des Reifens und der Radmittelebene eingeschlossene Winkel wird als Schräglaufwinkel α bezeichnet. (Heißing & Ersoy, 2013) (Mitschke & Wallentowitz, 2014) (Zomotor, 1991)

Durch den Anstieg der Seitenkraft F_y über den Schräglaufwinkel α aus der Nulllage ist die Schräglaufsteifigkeit c_α definiert. Es gilt der Zusammenhang aus Formel (2.23). (Peckelsen, 2017) Nach (Niedermeier, 2015) stellt die Schräglaufsteifigkeit die einflussreichste Reifeneigenschaft im Bezug auf das querdynamische Fahrzeugverhalten dar. Aufgrund der niedrigeren erforderlichen Schräglaufwinkel zum Aufbringen einer bestimmten Seitenkraft tragen hohe Schräglaufsteifigkeiten zu einem geringen Lenkwinkelbedarf sowie zu einem schnellen Ansprechverhalten mit niedrigen Phasenverzügen der Fahrzeugreaktion bei. (Gutjahr, 2013) (Niedermeier, 2015)

$$c_\alpha = \left| \frac{\delta F_y}{\delta \alpha} (\alpha = 0^\circ) \right| \quad (2.23)$$

Im Hinblick auf das Verhalten im höherdynamischen Bereich sind insbesondere die maximale Querbeschleunigung sowie das Lastwechselverhalten des Fahrzeugs von großer Bedeutung. Beide Eigenschaften werden erheblich durch den

maximalen Reibwert $\mu_{y,max}$ des Reifens beeinflusst. (Gutjahr, 2013) Entsprechend Formel (2.24) ist der maximale Reibwert $\mu_{y,max}$ durch den Quotienten der maximalen Seitenkraft $F_{y,max}$ und der Radlast F_z des jeweiligen Betriebspunkts festgelegt. (Peckelsen, 2017)

$$\mu_{y,max} = \frac{F_{y,max}}{F_z} \quad (2.24)$$

Bei sprunghafter Erhöhung des Schräglaufwinkels α kann der zeitliche Verlauf $F_y(t)$ der Seitenkraft näherungsweise durch den Zusammenhang aus Formel (2.25) beschrieben werden. (Heißing & Ersoy, 2013) Die Größe v_x bezeichnet dabei die Abrollgeschwindigkeit des Reifens. Durch die Größe σ_y ist die sogenannte Einlauflänge definiert. Anschaulich ist unter der Einlauflänge die Abrollstrecke des Reifens zu verstehen, bei welcher etwa zwei Drittel der stationären Seitenkraft des jeweiligen stationären Betriebspunkts vorliegen. (Heißing & Ersoy, 2013) Hierbei ist zu beachten, dass sowohl eine hohe Quersteifigkeit c_y des Reifens wie auch ein niedriger Absolutwert der stationären Seitenkraft, festgelegt durch die Schräglaufsteifigkeit c_α , zu einer Senkung der Einlauflänge führen können. Demzufolge kann die Einlauflänge anhand von Formel (2.26) abgeschätzt werden. (Heißing & Ersoy, 2013) (Braess, 2013) Eine geringe Einlauflänge der Reifen ist grundsätzlich mit einer schnellen Reaktion des Fahrzeugs auf Lenkwinkeländerungen durch den Fahrer verbunden. (Niedermeier, 2015) (Gutjahr, 2013)

$$F_y(t) = F_y(\alpha) \cdot \left(1 - e^{-\frac{v_x t}{\sigma_y}} \right) \quad (2.25)$$

$$\sigma_y = \frac{c_\alpha}{c_y} \quad (2.26)$$

Neben der Schräglaufsteifigkeit c_α , dem maximalen Reibwert in Querrichtung $\mu_{y,max}$ und der Einlauflänge σ_y existieren diverse weitere FTC, welche Einfluss auf das querdynamische Fahrzeugverhalten haben. Basierend auf den Erkenntnissen vorhergehender Arbeiten (z. B. (Niedermeier, 2015) (Gutjahr, 2013) (Peckelsen, 2017)) erscheinen die erläuterten FTC jedoch als sinnvolle Auswahl zur grundlegenden Charakterisierung der Querdynamik bei stationären wie auch

bei transienten Fahrmanövern. Auf eine Betrachtung weiterer, querdynamisch relevanter FTC wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit daher verzichtet.

2.3.4.2 Einflüsse der Rad- und Reifendimension

Die Einflüsse der Rad- und Reifengeometrie auf das querdynamischen Reifenverhalten werden in (Strigel, Peckelsen, Unrau, & Gauterin, 2019) ausführlich analysiert. Hierbei wird deutlich, dass die vorliegenden Zusammenhänge in allen Fällen entweder auf die Ausprägung der Reifenaufstandsfläche oder auf die Quersteifigkeit des Reifens zurückzuführen sind. Eine große und homogen belastete Aufstandsfläche wirkt sich grundsätzlich positiv auf die in einem bestimmten Betriebspunkt vorliegende Seitenkraft aus. (Heißing & Ersoy, 2013) (Braess, 2013) (Holtschulze, 2006) (Bachmann, 1996) Hohe Quersteifigkeiten des Reifens tragen insbesondere zu einem schnellen Seitenkraftaufbau sowie zu einer geringen Reifenverformung unter Seitenkraft bei. (Pfeffer & Harrer, 2013) (Holtschulze, 2006) (Guiggiani, 2014) Auf Basis dieser physikalischen Grundlagen lassen sich die Einflüsse der Rad- und Reifendimension anschaulich erläutern.

Bei Erhöhung der Reifenbreite bei gleichbleibender Radlast kommt es nach (Trzesniowski, 2008) (Pfeffer & Harrer, 2013) zu einer Verkürzung des Reifenlatsches und damit zu einer geringeren vertikalen Einfederung des Reifens. Dies ist mit einer Verkleinerung der Biegewinkel im Einlaufbereich sowie einer geringeren Belastung der Reifenflanken verbunden, was sich positiv auf die Homogenität der Druckverteilung in der Kontaktfläche zur Fahrbahn auswirkt. In Folge der geringeren vertikalen Einfederung wird darüber hinaus der Traganteil der Reifenstruktur verringert, während der Traganteil der Luft und damit die Latschfläche größer werden (siehe Kapitel 2.1.2). Breite Reifen verfügen aufgrund der geometrischen Hebelverhältnisse in der Regel über eine höhere Quersteifigkeit als schmale Reifen. (Holtschulze, 2006) Hierdurch ist die Reifenverformung bei der Übertragung von Seitenkräften geringer, was wiederum zu einer homogeneren Belastung der Aufstandsfläche beiträgt. Die Kombination aus hoher Quersteifigkeit, homogener Druckverteilung und großer Aufstandsfläche wirkt sich grundsätzlich positiv auf die Schräglaufsteifigkeit, den maximalen Reibwert in Querrichtung sowie einen geringen zeitlichen Verzug beim Aufbau von Seitenkräften aus. Im Falle einer Zunahme des Reifenaußendurchmessers

bei konstantem Raddurchmesser kommt es zu einer Erhöhung der Reifenflanke und damit zu einer Abnahme der Quersteifigkeit des Reifens. (Mitschke & Wallentowitz, 2014) (Braess, 2013) Entsprechend den Erläuterungen aus (Strigel, Peckelsen, Unrau, & Gauterin, 2019) führt dies zu einer Abnahme der Schräglaufsteifigkeit und zu einem größeren Zeitverzug beim Seitenkraftaufbau. In Folge der geringeren Quersteifigkeit wird der Reifen bei der Übertragung von Seitenkräften darüber hinaus stärker verformt, wodurch eine weniger homogene Druckverteilung im Reifenlatsch und damit ein geringerer maximaler Reibwert in Querrichtung vorliegen. Sowohl die Erhöhung des Raddurchmessers bei konstantem Reifenaußendurchmesser wie auch die Erhöhung der Felgenmaulweite bei einer bestimmten Reifenbreite führen zu einer Erhöhung der Quersteifigkeit des Reifens. (Heißing & Ersoy, 2013) (Niemeyer, 2017) (Einsle, 2010) Entsprechend den Erläuterungen des vorhergehenden Absatzes wirkt sich dies vorteilhaft auf die Schräglaufsteifigkeit, den maximalen Reibwert in Querrichtung sowie das Einlaufverhalten des Reifens aus.

2.3.4.3 Einflüsse der Radlast und des Fülldrucks

Aufgrund der größeren Reifenaufstandsfläche ist eine Erhöhung der Radlast, im Bereich üblicher Betriebspunkte, mit einer Zunahme der Schräglaufsteifigkeit verbunden. (Einsle, 2010) Gleichzeitig sinkt der maximale Reibwert in Querrichtung, was auf die weniger homogene Druckverteilung in der Latschfläche und den daraus resultierenden, degressiven Verlauf der maximalen Seitenkraft über der Radlast zurückzuführen ist. (Bachmann, 1996) (Klempau, 2003) (Heißing & Ersoy, 2013) Nach (Einsle, 2010) ist die Erhöhung der Radlast darüber hinaus mit einer deutlichen Vergrößerung der Einlaufänge verbunden, was auf die stärkeren erforderlichen Reifenverformungen zum Erreichen der höheren Seitenkräfte zurückzuführen ist. Dieser Zusammenhang lässt sich auch mathematisch anhand von Formel (2.26) erklären, wobei die Erhöhung der Schräglaufsteifigkeit im Zähler der vergleichsweise geringen Veränderung der Quersteifigkeit des Reifens im Nenner überwiegt. Die Erhöhung des Reifenfülldrucks führt zu einer Verkleinerung der Latschfläche und gleichzeitig zu einer Erhöhung der Quersteifigkeit des Reifens. (Heißing & Ersoy, 2013) (Jeschor, 2005) Im Bereich üblicher Radlasten führt die Verkleinerung der Latschfläche zu einer Verringerung der Schräglaufsteifigkeit. (Einsle, 2010) (Pfeffer & Harrer, 2013) Die höhere Quersteifigkeit bei Erhöhung des Reifenfülldrucks wirkt sich hingegen vorteilhaft auf

den zeitlichen Kraftaufbau, in Form einer geringeren Einlauflänge, aus. (Einsle, 2010) Im Bezug auf den maximalen Reibwert in Querrichtung stellt die kleinere Aufstandsfläche des Reifens einen Nachteil dar, während die geringeren Reifenverformungen in Folge der höheren Quersteifigkeit zu einer homogeneren Druckverteilung in der Latschfläche beitragen. In (Strigel, Peckelsen, Unrau, & Gauterin, 2019) wird angenommen, dass sich die beiden Effekte größtenteils kompensieren.

2.3.5 Längsdynamik

In Kapitel 2.2 wird mit den Fahrwiderständen bereits eine für die Längsdynamik relevante Kraftkomponente erläutert. Im fahrdynamischen Umfeld steht insbesondere die Übertragung von Antriebs- und Bremskräften durch die Reifen im Fokus der Entwicklung. (Heißing & Ersoy, 2013) (Braess, 2013)

2.3.5.1 FTC-Definition

Ebenso wie bei der Kraftübertragung in Querrichtung (siehe Kapitel 2.3.4.1), ist auch die Übertragung von Längskräften mit einer Verformung der Kontaktfläche des Reifens verbunden. Hierdurch kommt es zu einer Differenz zwischen der Umfangsgeschwindigkeit v_R des Reifens und der Abrollgeschwindigkeit v_x gegenüber der Fahrbahn. Nach (Haken, 2013) und (Heißing & Ersoy, 2013) ist der Schlupf κ im gebremsten Fall durch Formel (2.27) und im angetriebenen Fall durch Formel (2.28) definiert.

$$\kappa_B = \frac{v_x - v_R}{v_x} \quad (2.27)$$

$$\kappa_A = \frac{v_R - v_x}{v_R} \quad (2.28)$$

Der maximale Reibwert in Längsrichtung $\mu_{x,max}$ ist entsprechend Formel (2.29) durch den Quotient der maximal übertragbaren Längskraft $F_{x,max}$ und der Radlast F_z festgelegt und hat unmittelbare Auswirkungen auf den Bremsweg bzw. die übertragbaren Antriebskräfte des Fahrzeugs. (Haken, 2013) (Heißing & Ersoy, 2013) (Leister, 2015)

$$\mu_{x,max} = \frac{F_{x,max}}{F_z} \quad (2.29)$$

Die physikalischen Vorgänge der Kraftübertragung sind im angetriebenen und im gebremsten Fall grundsätzlich vergleichbar. Aufgrund der hohen Relevanz für die Fahrsicherheit wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit ausschließlich der maximale Reibwert des gebremsten Falls zur Berücksichtigung des längsdynamischen Reifenverhaltens herangezogen.

2.3.5.2 Einflüsse der Rad- und Reifendimension

Im Bezug auf die Auswirkungen der Dimensionen von Rad und Reifen auf die längsdynamischen Reifeneigenschaften gelten ähnliche Zusammenhänge wie im Falle der querdynamischen Reifeneigenschaften (siehe Kapitel 2.3.4.2). Demnach tragen eine große und homogen belastete Latschfläche zu einem hohen Kraftübertragungspotential bei.

Nach (Klempau, 2003) (Bachmann, 1996) ist eine Erhöhung der Reifenbreite daher mit einem höheren maximalen Reibwert in Längsrichtung verbunden. Bei großen Außendurchmessern des Reifens ist eine geringere vertikale Einfederung zum Erreichen einer bestimmten Aufstandsfläche erforderlich als bei kleinen Außendurchmessern. (Holtschulze, 2006) Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.1.2 wird der Traganteil der Reifenstruktur hierdurch verringert, was mit einer Vergrößerung der Reifenaufstandsfläche einhergeht. Im Falle einer Erhöhung des Reifenaußendurchmessers bei konstanter Flankenhöhe ist daher von einer Zunahme des Reibwerts in Längsrichtung auszugehen. Aufgrund der geringeren Vertikalsteifigkeit (siehe Kapitel 2.3.3.2) führt die Erhöhung der Reifenflanke zu einer Vergrößerung der Latschfläche. Gleichzeitig ist von einer Abnahme der Struktursteifigkeit des Reifens bei der Übertragung von Kräften in Längsrichtung auszugehen. Nach (Bachmann, 1996) (Einsle, 2010) hat die Veränderung der Flankenhöhe keine einheitlichen Auswirkungen auf den maximalen Reibwert in Längsrichtung bzw. auf die Längssteifigkeit des Reifens, was auf eine gegenseitige Kompensation der beiden zuvor genannten Effekte hindeutet. In (Niemeyer, 2017) werden die Einflüsse der Maulweite auf die maximal übertragbare Längskraft untersucht, wobei ebenfalls keine einheitliche Tendenz identifiziert wird.

2.3.5.3 Einflüsse der Radlast und des Fülldrucks

Ebenso wie im querdynamischen Fall, weist die Zunahme der maximal übertragbaren Längskraft über der Radlast einen degressiven Verlauf auf, weshalb der maximale Reibwert mit zunehmender Radlast abnimmt (Bachmann, 1996) (Heißing & Ersoy, 2013) Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.1.2 ist die Senkung des Reifenfülldrucks mit einer Vergrößerung der Kontaktfläche zur Fahrbahn verbunden. Nach (Klempau, 2003) (Gengenbach, 1967) führt dies auf trockener Fahrbahn zu einer Erhöhung des maximalen Reibwerts in Längsrichtung.

2.3.6 Lenkungskräfte

Neben der Fahrzeugreaktion auf Lenkbefehle durch den Fahrer wird das Lenkgefühl eines Fahrzeugs maßgeblich durch das Lenkradmoment beeinflusst. Hierbei sollen zum einen Kursänderungen direkt und vorhersehbar umgesetzt werden. Darüber hinaus sollten die zur Einordnung der jeweiligen Fahrsituation relevanten Informationen ausreichend an den Fahrer rückgemeldet und mögliche Störinformationen gleichzeitig ausgeblendet werden. Die wirksamen Kräfte werden dabei grundsätzlich über die Reifen eingeleitet und in Abhängigkeit von der Achskinematik auf das Lenksystem übertragen. (Pfeffer & Harrer, 2013) Moderne Lenkunterstützungssysteme bieten vielseitige Möglichkeiten zur applikativen Optimierung des Lenkgefühls. (Mehrjerdian, 2015) (Heißing & Ersoy, 2013) (Braess, 2013) Zur Auslegung der Lenkleistung und der Betriebsfestigkeit, sowie zur Absicherung des Verhaltens bei einem möglichen Ausfall der Lenkunterstützung sind die Eigenschaften des Reifens nach wie vor von großer Bedeutung. (Braess, 2013) (Pfeffer & Harrer, 2013) (Heißing & Ersoy, 2013)

2.3.6.1 FTC-Definition

Wie in Kapitel 2.3.4.1 erläutert, kommt es bei der Übertragung von Seitenkräften zu einer Verformung der Kontaktfläche in Querrichtung. Ausgehend vom Einlaufbereich, nimmt die Auslenkung bei kleinen Schräglaufwinkeln dabei näherungsweise linear über die Länge des Reifenlatsches zu. Aufgrund dieser Tatsache greift die resultierende Seitenkraft F_y nicht in der Latschmitte, sondern um

den pneumatischen Nachlauf bzw. Reifennachlauf n_R versetzt, hinter der Latschmitte an. (Pfeffer & Harrer, 2013) (Heißing & Ersoy, 2013) Das hieraus resultierende Rückstellmoment M_z lässt sich anhand von Formel (2.30) berechnen und weist einen unmittelbaren Zusammenhang zur Lenkkraft bzw. dem Lenkleistungsbedarf auf. (Mitschke & Wallentowitz, 2014) (Haken, 2013) (Gutjahr, 2013) Durch den Anstieg des Rückstellmoments über den Schräglaufwinkel aus der Nulllage ist die sogenannte Aligning Stiffness bzw. Rückstellmomentsteifigkeit festgelegt. (Unrau, 2012) (SAE J2047, 1998) Es gilt der Zusammenhang aus Formel (2.31).

$$M_z = -F_y \cdot n_R \quad (2.30)$$

$$A_\alpha = \left| \frac{\delta M_z}{\delta \alpha} (\alpha = 0^\circ) \right| \quad (2.31)$$

Die Rotation des Reifens um seine Hochachse beim Lenken im Stand stellt einen Sonderfall des Rückstellmoments dar. Hierbei kommt es zunächst zu einer ausschließlich elastischen Verformung. Nach Erreichen eines gewissen Verformungswegs wird die elastische Verformung zunehmend von Gleitvorgängen überlagert, bis das Rückstellmoment M_z ein plateauförmiges Maximum erreicht. Durch dieses Maximum ist das Bohrmoment M_B definiert, welches für die Lenkungsauslegung beim Parkieren von großer Bedeutung ist. (Einsle, 2010) (van der Jagt, 1999) Unter Berücksichtigung der Abrollgeschwindigkeit v_x gilt der Zusammenhang aus Formel (2.32).

$$M_B = M_{z,max}(v_x = 0 \text{ km/h}) \quad (2.32)$$

Aufgrund der vorliegenden Datenbasis wird im Rahmen dieser Arbeit jeweils das entsprechend Formel (2.33) auf die Radlast F_z normierte Bohrmoment $M_{B,n}$ zur Analyse herangezogen.

$$M_{B,n} = \frac{M_B}{F_z} \quad (2.33)$$

2.3.6.2 Einflüsse der Rad- und Reifendimension

Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.3.6.1 ergibt sich das Rückstellmoment des Reifens aus dem Produkt der Seitenkraft und dem pneumatischen Nachlauf. Der pneumatische Nachlauf ist dabei maßgeblich von der Länge des Reifenlatsches und somit auch von der Rad- bzw. Reifendimension abhängig.

Nach (Mitschke & Wallentowitz, 2014) (Heißing & Ersoy, 2013) führt die Verlängerung des Reifenlatsches grundsätzlich zu einer Zunahme des pneumatischen Nachlaufs. Durch Erhöhung der Reifenbreite wird die Latschfläche verkürzt und der pneumatische Nachlauf auf diese Weise verringert. Nach (Pfeffer & Harrer, 2013) führt dies zu einer Verringerung des Rückstellmoments. Hierbei ist zu beachten, dass die Verbreiterung des Reifens gleichzeitig zu einer Erhöhung der Schräglaufsteifigkeit führt (siehe Kapitel 2.3.4.2), wodurch die wirksamen Seitenkräfte sowie die hierdurch induzierten Rückstellmomente wiederum zunehmen. Aufgrund der geringeren Schräglaufsteifigkeit (siehe Kapitel 2.3.4.2) ist auch bei einer Zunahme der Flankenhöhe oder einer Verringerung der Felgenmulweite von einer Abnahme des Rückstellmoments auszugehen.

Im Bezug auf die Auswirkungen der Rad- und Reifendimension auf das Bohrmoment sind keine Arbeiten bekannt, in welchen eine separate Analyse aller Einflussparameter erfolgt. In (Weinberger, Becker, & Schramm, 2018) wird jedoch deutlich, dass das Bohrmoment maßgeblich von der Bodendruckverteilung sowie von der Ausprägung der Aufstandsfläche abhängig ist. Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.1.2 besteht daher ein unmittelbarer Zusammenhang zur Rad- bzw. Reifendimension. In (Einsle, 2010) wird auf eine Zunahme des Bohrmoments bei Erhöhung der Reifenbreite hingewiesen. In (Vilela, Luzetti, & Anderson, 2010) werden die Bohrmomente von Reifen vier unterschiedlicher Dimensionen gemessen, wobei ebenfalls die breiten Reifen jeweils höhere Werte des Bohrmoments aufweisen. Nach (Einsle, 2010) führt eine Erhöhung der Reifenflanke zu einer Senkung des Bohrmoments. Möglicherweise ist dies auf die geringere Torsionssteifigkeit des Reifens zurückzuführen, wodurch stärkere Verformungen und eine weniger homogene Bodendruckverteilung vorliegen. Eine Abnahme der Torsionssteifigkeit des Reifens wird nach (Niemeyer, 2017) auch durch Verringerung der Felgenmulweite hervorgerufen.

2.3.6.3 Einflüsse der Radlast und des Fülldrucks

Ebenso wie im Falle der Einflüsse durch die Dimensionen von Rad und Reifen, sind auch die Einflüsse der Radlast und des Fülldrucks auf das Rückstellmoment anhand von Veränderungen der Reifenaufstandsfläche begründbar. In (Unrau, 2012) (Heißing & Ersoy, 2013) werden die Rückstellmomente unterschiedlicher Reifen jeweils bei mehreren Radlasten und Fülldrücken gegenübergestellt. Demnach führen die Senkung des Reifenfülldrucks sowie die Erhöhung der Radlast zu einer Zunahme des Rückstellmoments. Dieser Zusammenhang wird auch in (Trzesniowski, 2008) (Reimpell & Betzler, 2005) bestätigt. Nach (Pfeffer & Harrer, 2013) lassen sich die positive Korrelation des Rückstellmoments mit der Radlast und die negative Korrelation des Rückstellmoments mit dem Fülldruck auf die Verlängerung des Reifenlatsches und die damit einhergehende Zunahme des pneumatischen Nachlaufs zurückführen. Darüber hinaus nimmt auch die Schräglaufsteifigkeit zu (siehe Kapitel 2.3.4.3), was zu einem zusätzlichen Anstieg des Rückstellmoments führt.

In (Einsle, 2010) und (Vilela, Luzetti, & Anderson, 2010) werden die Bohrmomente von Reifen unterschiedlicher Dimensionen und Hersteller bei verschiedenen Betriebsbedingungen analysiert. Hierbei wird deutlich, dass die Einflüsse von Radlast und Fülldruck gegenüber sämtlichen anderen Einflussparametern überwiegen. Sowohl die Erhöhung des Reifenfülldrucks wie auch die Senkung der Radlast führen grundsätzlich zu einer Verringerung des Bohrmoments, was nach (Einsle, 2010) auf die Verkleinerung des Reifenlatsches zurückzuführen ist. In (Weinberger & Schramm, 2017) (Vilela, Luzetti, & Anderson, 2010) (Weinberger, Becker, & Schramm, 2018) wird darüber hinaus deutlich, dass die Erhöhung des Reifenfülldrucks zu einer Erhöhung des Bodendrucks im Bereich der Latschmitte und zu einer Entlastung der äußeren Latschbereiche führt. Die bei der Entstehung des Bohrmoments wirksamen Hebelarme werden auf diese Weise verkürzt.

2.3.7 Spurrillenverhalten

Neben dem Geradeauslauf auf ebener Fahrbahn ist die Fahrzeugreaktion beim Überfahren von Spurrillen in Längsrichtung ein wichtiges Kriterium zur subjektiven Wahrnehmung der Fahrstabilität und des Fahrkomforts. (Heißing & Ersoy, 2013) (Dettki, 2005) Zusätzlich zur Kraftanregung durch Ungleichförmigkeiten des Reifens oder durch Seitenwinde, erfolgt der Eintrag von Störkräften in beiden Fällen durch die Auslenkungen des Reifens in Folge von Neigungen oder Störungen der Fahrbahn. (Gutjahr, 2013) (Heißing & Ersoy, 2013) (Dettki, 2005)

2.3.7.1 FTC-Definition

Nach (Gutjahr, 2013) (Niedermeier, 2015) ist für den Geradeauslauf auf ebener Fahrbahn insbesondere die in Kapitel 2.3.4.1 eingeführte Schräglaufsteifigkeit von großer Bedeutung. Demnach sind geringe Schräglaufsteifigkeiten mit einem geringeren Krafteintrag beim Überfahren von Fahrbahnstörungen verbunden.

Die Neigung der Fahrbahn beim Durchfahren von Spurrillen in Längsrichtung kann nach (Dettki, 2005) (Segatori, 2017) einer Veränderung des Radsturzes gleichgesetzt werden. Hierdurch kommt es zu Verformungen der Latschfläche, welche mit einer Seitenkraft einhergehen. (Gutjahr, 2013) (Segatori, 2017) Die Veränderung der Seitenkraft F_y über dem Radsturz γ ist durch die Sturzsteifigkeit c_γ des Reifens entsprechend Formel (2.34) festgelegt. (Segatori, 2017) Aufgrund der niedrigeren Seitenkräfte bei einer bestimmten Fahrbahnneigung ist eine geringe Sturzsteifigkeit des Reifens mit einem weniger empfindlichen Verhalten des Fahrzeugs gegenüber Spurrillen verbunden. (Heißing & Ersoy, 2013) (Gutjahr, 2013)

$$c_\gamma = \left| \frac{\delta F_y}{\delta \gamma} (\gamma = 0^\circ) \right| \quad (2.34)$$

2.3.7.2 Einflüsse der Rad- und Reifendimension

Eine umfassende Analyse der Dimensionseinflüsse von Rad und Reifen auf die Sturzsteifigkeit ist bisher nicht bekannt. In (Pacejka, 2002) wird jedoch deutlich, dass die unter Sturz vorliegende Seitenkraft unter anderem aus einer Querverformung des Reifens resultiert. Es ist daher anzunehmen, dass eine Reduzierung der

Reifensteifigkeit in Querrichtung zu einer geringen Sturzsteifigkeit beiträgt. Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.3.4.2 werden niedrige Quersteifigkeiten insbesondere durch schmale Reifen mit hohen Flanken sowie durch geringe Felgenmaulweiten erreicht.

2.3.7.3 Einflüsse der Radlast und des Fülldrucks

Nach (Pauwelussen, Dalhuijsen, & Merts, 2007) ist die Erhöhung der Radlast mit einer Zunahme der unter Sturz vorliegenden Seitenkraft verbunden. Dies ist durch die stärkere Reifenverformung bei höheren Radlasten zu begründen. In (Massaro, Cossalter, & Cusimano, 2013) wird der Einfluss des Reifenfülldrucks auf die Sturzsteifigkeit am Beispiel von Motorradreifen analysiert. Die Sturzsteifigkeit nimmt dabei, trotz der höheren Quersteifigkeit des Reifens (siehe Kapitel 2.3.4.3), mit zunehmendem Fülldruck ab. Physikalisch ist dies auf die kleinere Reifenaufstandsfläche zurückzuführen, wodurch weniger Profilelemente relativ zur Fahrbahn ausgelenkt werden. Trotz der unterschiedlichen Bauweise ist auch im Falle von Pkw-Reifen von vergleichbaren Zusammenhängen auszugehen.

2.4 Grundlagen Vibroakustik

Neben der Reaktion des Fahrzeugs auf äußere Einflüsse oder Lenkbefehle wird der subjektive Fahrkomfort maßgeblich durch die im Fahrbetrieb auftretenden vibroakustischen Schwingungen beeinflusst. (Zeller, 2012) Die Schwingungen gelangen dabei entweder über elastische Festkörper, als Körperschall, oder durch Schwankungen des Luftdrucks, als Luftschall, zu den Fahrzeuginsassen. Luftschwingungen infolge der Schallabstrahlung von Körperschallschwingungen werden als sekundärer Luftschall bezeichnet. (Zeller, 2012) Nach (Thomaier, 2008) werden mechanische Schwingungen im Frequenzbereich zwischen 0,5 Hz und 1 kHz vom Menschen taktil, als Vibration wahrgenommen. Luftschwingungen mit Frequenzen zwischen 16 Hz und 16 kHz werden hingegen auditiv, als Geräusch verarbeitet. (Thomaier, 2008)

Die Interaktion zwischen Reifen und Fahrbahn ist, neben den Anregungen durch die Antriebseinheit oder Luftströmungen, eine der dominanten Schwingungsquellen heutiger Personenkraftwagen. (Laschet, 2007) (Zeller, 2012) (Dietsche,

2019) Im Laufe der letzten Jahre ist es dabei gelungen, das Geräusch- und Vibrationsniveau der Fahrzeuge stetig zu reduzieren. (Zeller, 2012) Die gleichzeitig gestiegenen Kundenanforderungen sowie die veränderten Geräuschquellen bei neuen Fahrzeugkonzepten erfordern jedoch auch in Zukunft die vibroakustische Weiterentwicklung aller relevanten Fahrzeugkomponenten. (Thomaier, 2008) (Lepoittevin, Horak, & Caprioli, 2019) (Caprioli, Ferrali, & Cardillo, 2018)

In den folgenden Kapiteln werden zunächst die in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn auftretenden Schwingungsphänomene erläutert. Anschließend werden der zur Durchführung der Körperschallmessungen dieser Arbeit verwendete Reifenprüfstand vorgestellt sowie ein FTC zur Bewertung der Querkraftanregung des Reifens auf rauher Fahrbahn eingeführt. Dieser FTC weist entsprechend den Erkenntnissen vergangener Arbeiten eine starke Korrelation zum Fahrzeuginnengeräusch auf und wird im weiteren Verlauf der Arbeit exemplarisch zur Charakterisierung des vibroakustischen Reifenverhaltens verwendet. Analog zur Vorgehensweise bei den Eigenschaftsbereichen Energieeffizienz und Fahrodynamik, werden auch hierbei die bekannten Einflüsse der Rad- und Reifendimension sowie der Betriebsbedingungen erörtert.

2.4.1 Entstehungsmechanismen

In weiterführenden Kapiteln dieser Arbeit werden die Einflüsse der Rad- und Reifendimension sowie der Betriebsbedingungen auf das vibroakustische Reifenverhalten analysiert. Zur Interpretation der dabei vorliegenden Wechselwirkungen sind Kenntnisse über die physikalischen Entstehungsmechanismen erforderlich, welche im Folgenden erläutert werden.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Erfindung des Luftreifens im Jahre 1845 zu einer erheblichen Verbesserung des Fahrkomforts führte, indem Fahrbahnanregungen gefedert und gedämpft werden. (Société de Technologie Michelin, 2002) (Zeller, 2012) (French, 1989) Dennoch ist der Reifen, als einziges Verbindungselement zur Fahrbahn, weiterhin von großer Bedeutung im Bezug auf die Übertragung von Fahrbahnanregungen und ist auch selbst an der Entstehung vibroakustischer Phänomene beteiligt. (Société de Technologie Michelin, 2002) (Zeller, 2012)

Ein Teil der Phänomene wird dabei durch Verformungen des Reifens in Folge von Fahrbahnunebenheiten und -rauigkeiten verursacht, wobei die Reifenstruktur sowie die Luft im Inneren des Reifens zu Schwingungen angeregt werden. Diese Schwingungen werden daraufhin über das Fahrwerk auf die Fahrzeugkarosserie übertragen und im Innenraum als Vibration oder als sekundärer Luftschall wahrgenommen. (Société de Technologie Michelin, 2002) (Sandberg & Ejsmont, 2002) (Zeller, 2012) (French, 1989) (Löfdahl, Johnsson, & Nykänen, 2015) Nach (Société de Technologie Michelin, 2002) kommt es bei Anregungen im Bereich zwischen 30 und 250 Hz zusätzlich zu Resonanzeffekten, welche die akustische Wahrnehmung der Fahrbahnrauigkeit besonders prägen. Auch die Eigenfrequenz der Luftsäule im Reifeninneren im Bereich zwischen 200 und 250 Hz führt zur Verstärkung von Fahrbahnanregungen in diesem Frequenzbereich, welche über die Karosserie als tonales Geräusch, häufig auch als Kavitätsgeschall bezeichnet, abgestrahlt werden. (Société de Technologie Michelin, 2002)

Ein weiterer Anteil der vibroakustischen Phänomene resultiert aus der Schwingungsanregung durch das Aufschlagen bzw. Ausknappen der einzelnen Profilklötze in den Ein- bzw. Auslaufbereichen der Latschfläche. Weitere Schwingungen werden durch Schlupfeffekte beim Durchlaufen der Latschfläche sowie durch Luftbewegungen in den Hohlräumen des Reifenprofils hervorgerufen. Die zuletzt genannten Phänomene treten grundsätzlich in Frequenzbereichen oberhalb von 250 Hz auf und werden hauptsächlich als Luftschall im Bereich der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn abgestrahlt. (Société de Technologie Michelin, 2002) (Sandberg & Ejsmont, 2002) (Zeller, 2012) (Beckenbauer, 2008) (Morello, Rosti Rossini, Pia, & Tonoli, 2011)

2.4.2 Messung am Außentrommelprüfstand

In (Hoffmann, 2018) werden die im Fahrbetrieb vorliegenden Fahrbahnanregungen an einem Außentrommelprüfstand mit rauer Oberfläche nachgebildet. Die Messung der Radnabenkräfte in Längs-, Quer-, und Vertikalrichtung ermöglicht dabei die objektive Erfassung der auftretenden Reifenschwingungen. Auch die im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Analyse des vibroakustischen Reifenverhaltens herangezogene Datenbasis basiert auf Messungen an dem in Abbildung 2.7 gezeigten Prüfstand.



Abbildung 2.7: Außentrommelprüfstand zur Körperschallmessung

Die Prüftrommel weist einen Radius von etwa 2 m und ein Oberflächenprofil mit hoher Rauigkeit auf. Die Reifen werden vor Messbeginn zunächst über mehrere Stunden in der Prüfkammer bei Raumtemperatur akklimatisiert und anschließend auf den gewünschten Fülldruck konditioniert. Die Radlast wird über eine Gewindestange mit einer Toleranz von 100 N eingestellt. Um geometrische Einflüsse auf die Radlast auszublenden, wird bei allen Messungen auf eine identische Position der Prüftrommel zur Kalibrierung der Kraftsensoren geachtet. Im Anschluss wird der Reifen über die Dauer von 15 Minuten bei einer konstanten Abrollgeschwindigkeit von 80 km/h aufgewärmt. Auf diese Weise werden starke Veränderungen der Reifentemperatur im weiteren Verlauf der Messung vermieden. Im eigentlichen Prüfzyklus wird der Reifen daraufhin in 180 Sekunden von 20 km/h auf 80 km/h linear beschleunigt und dabei durch die Prüftrommel angetrieben.

Die in der Radnabe gemessenen Kraftverläufe in Längs-, Quer- und Vertikalrichtung werden nach der Messung, unter Anwendung einer Fouriertransformation, in die einzelnen Frequenzanteile zerlegt. Die Fouriertransformation basiert auf der Tatsache, dass jede periodische Funktion durch die Summe einer endlichen Anzahl harmonischer Funktionen genähert werden kann. (Jäger, Mastel, & Knaebel, 2016) (Arens, et al., 2018) Gemessene Signale liegen in der Regel nicht als kontinuierliche Funktionsverläufe vor, sondern bestehen aus einer begrenzten Anzahl diskreter Messwerte. Bei der sogenannten diskreten Fouriertransformation werden diese Messpunkte periodisch fortgesetzt, woraus ein unendlich langer Verlauf resultiert, welcher anschließend durch ein trigonometrisches Interpolationspolynom genähert werden kann. Bei einer Anzahl von $2n$ Messpunkten $f(x_j)$ gelten die Zusammenhänge aus Formel (2.35) und Formel (2.36) zur Bestimmung des Approximationspolynoms $p(x)$. Die Berechnungsvariable c_k entspricht dabei jeweils der Amplitude der einzelnen Frequenzanteile. Die Größen j und k werden innerhalb der Berechnung als Zählvariablen verwendet. (Arens, et al., 2018) Für weiterführende Erläuterungen sei auf die Ausführungen in (Arens, et al., 2018) (Hermann, 2010) (Arenz, 2005) verwiesen.

$$p(x) = \sum_{k=-n+1}^n c_k \cdot e^{I k x_j}, \quad j \in [0, 2n - 1] \quad (2.35)$$

$$c_k = \frac{1}{2n} \cdot \sum_{j=0}^{2n-1} f(x_j) \cdot e^{-I k x_j}, \quad k \in [-n + 1, n] \quad (2.36)$$

2.4.3 Fahrbananregung in Querrichtung

Bei der Betrachtung des Reifens hinsichtlich des Fahrkomforts stehen häufig die Fahrbananregungen in Vertikal- oder Längsrichtung im Fokus der Untersuchungen (z. B. (Hilscher, 2008) (Guiggiani, 2014) (Röske, 2012) (Sandberg & Ejsmont, 2002)). In (Böhm & Knothe, 1998) (Grollius, 2013) wird deutlich, dass es beim Abrollen auf rauen Fahrbananoberflächen auch zu deutlichen Auslenkungen des Reifens in Querrichtung kommt. Die hierdurch hervorgerufenen Schwingungen werden über das Fahrwerk in die Karosserie eingeleitet und weisen insbesondere im Bereich der Eigenfrequenzen des Reifens eine starke Korrelation zur akustischen Wahrnehmung der Fahrbananraugigkeit im Innenraum auf.

(Hoffmann, 2018) Durch den Einsatz von Gummilagern können die Schwingungen vom Fahrzeugaufbau entkoppelt und teilweise gedämpft werden. (Heißing & Ersoy, 2013) (Braess, 2013) Gleichzeitig verändern sich dabei die elastokinetischen Eigenschaften des Fahrwerks und damit auch das dynamische Kurvenverhalten des Fahrzeugs. Aufgrund dieses Spannungsfelds ist die Fahrbahnanregung in Querrichtung bei der Grundausslegung von Reifen von besonders großer Bedeutung.

2.4.3.1 FTC-Definition

Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.4.1 treten besonders bei Fahrbahnanregungen im Bereich zwischen 30 Hz und 250 kHz Resonanzeffekte auf, welche über das Fahrwerk in die Karosserie eingeleitet und als sekundärer Luftschall in den Innenraum abgestrahlt werden. Zur objektiven Erfassung der Körperschallschwingungen in Querrichtung wurde im Rahmen vergangener Untersuchungen ein Ersatzwert entwickelt, welcher eine starke Korrelation zum Innengeräusch des Fahrzeugs aufweist. Zur Berechnung des vibroakustischen Ersatzwerts $F_{y,E}$ wird dabei zunächst der gemessene Kraftverlauf des in Kapitel 2.4.2 vorgestellten Prüfstands anhand einer Fouriertransformation im Geschwindigkeitsbereich $[v_u, v_o]$, in die einzelnen Frequenzanteile zerlegt. Aus den separierten Kraftamplituden $F_y(f)$ wird daraufhin die energetische Summe innerhalb des Frequenzintervalls $[f_u, f_o]$ gebildet, wobei der Zusammenhang aus Formel (2.37) gilt. Die detaillierte Angabe des betrachteten Geschwindigkeits- und Frequenzbereichs ist aus Gründen der Geheimhaltung nicht möglich.

$$F_{y,E} = \sqrt{\sum_{f=f_u}^{f_o} F_y(f)^2} \quad (2.37)$$

Die starke Korrelation des vorgestellten FTC zum Innengeräusch des Fahrzeugs wird in Abbildung 2.8 am Beispiel eines Fahrzeugs der Oberklasse deutlich. Dabei sind jeweils die Innengeräusche in dB(A) beim Einsatz unterschiedlicher Reifen gegenüber den zugehörigen vibroakustischen Ersatzwerten in N aufgetragen. Aus Gründen der Geheimhaltung wurden die Werte normiert und jeweils die Abweichungen der Messwerte vom minimalen Wert auf den gesamten Variationsbereich bezogen.

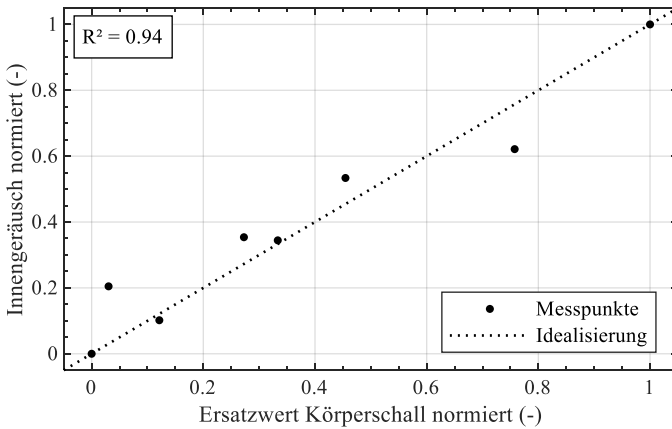


Abbildung 2.8: Korrelation des vibroakustischen Ersatzwerts zum Innengeräusch

Wie in Kapitel 2.4.3 erläutert, sind auch die Kraftanregungen des Reifens in Vertikal-, und Längsrichtung für den Fahrkomfort relevant. Aufgrund des starken Einflusses auf das Kurvenverhalten des Fahrzeugs ist bei der Grundausslegung des Reifens in der frühen Entwicklungsphase jedoch insbesondere die Kraftanregung in Querrichtung von großer Bedeutung. Der vorgestellte FTC wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit daher exemplarisch zur Charakterisierung des Komfortverhaltens herangezogen.

2.4.3.2 Einflüsse der Rad- und Reifendimension

In (Hoffmann, 2018) werden die Einflüsse der Dimensionen von Rad und Reifen auf die Fahrbahnanregung in Querrichtung anhand mehrerer Regressionsansätze unterschiedlicher Komplexität analysiert. Die Verwendung von Termen höherer Ordnung führt dabei zu starken Nichtlinearitäten und unrealistischen Näherungsergebnissen außerhalb der Wertebereiche der verwendeten Datenbasis. Die folgenden Erläuterungen beziehen sich daher auf den vereinfachten Regressionsansatz von (Hoffmann, 2018) mit linearen Näherungstermen. Grundsätzlich wird dabei deutlich, dass der Ersatzwert $F_{y,E}$ in erster Linie von der Ausprägung der Reifenaufstandsfläche sowie von der Steifigkeit des Reifens abhängig ist.

Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.3.4.2 führt die Erhöhung der Reifenbreite zu einer Verkürzung des Reifenlatsches und damit zu einer geringeren Verformung des Reifens in vertikaler Richtung. Die Reifenaufstandsfläche wird hierdurch homogener belastet, was nach (Hoffmann, 2018) mit einer Abnahme der Körperschallanregung in Querrichtung einhergeht. Die reduzierte Anregung von Strukturschwingungen des Reifens in Folge einer homogenen Bodendruckverteilung wird auch in (Zeller, 2012) bestätigt. Im Falle einer Erhöhung der Reifenbreite bei gleichbleibender Felgenmaulweite ist darüber hinaus von einer verringerten Quersteifigkeit des Reifens auszugehen, wodurch die Kraftanregung in Folge von Auslenkungen durch die Fahrbahn reduziert wird. Entsprechend führt auch die Erhöhung der Felgenmaulweite bei gleichbleibender Reifenbreite zu einer Zunahme der Quersteifigkeit des Reifens und damit zu einer stärkeren Kraftanregung in Querrichtung. Aus demselben Grund wirkt sich auch die Erhöhung des Raddurchmessers bei gleichbleibendem Reifenaußendurchmesser negativ auf das vibroakustische Komfortverhalten des Reifens auf rauer Fahrbahn aus. (Hoffmann, 2018) Gleichzeitig weist jedoch der Regressionsparameter des Querschnittsverhältnisses in (Hoffmann, 2018) ein positives Vorzeichen auf. Dies bedeutet eine Verschlechterung des vibroakustischen Reifenverhaltens bei Erhöhung des Reifenaußendurchmessers bei gleichbleibendem Raddurchmesser, was angesichts der geringeren Quersteifigkeit des Reifens (siehe Kapitel 2.3.4.2) zunächst nicht plausibel erscheint. Aufgrund des verringerten Traganteils der Reifenflanken (siehe Kapitel 2.3.4.2) kommt es bei Erhöhung des Reifenaußendurchmessers jedoch auch zu einer Vergrößerung der Latschfläche und damit zu einer vergrößerten Angriffsfläche zur Anregung von Reifenschwingungen durch die Fahrbahn.

2.4.3.3 Einflüsse der Radlast und des Fülldrucks

Ebenso wie im Falle der Dimensionseinflüsse, lassen sich auch die Einflüsse der Betriebsbedingungen auf das vibroakustische Reifenverhalten durch die Ausprägung der Reifenaufstandsfläche sowie durch die Reifensteifigkeit begründen. Nach (Hoffmann, 2018) führt die Erhöhung der Radlast unter gleichbleibendem Fülldruck zu einer Vergrößerung der Reifenaufstandsfläche und damit zu einer stärkeren Schwingusanregung des Reifens in Querrichtung. Trotz der kleineren Reifenaufstandsfläche führt eine Erhöhung des Reifenfülldrucks zu einer Zu-

nahme der Körperschallanregung in Querrichtung. Entsprechend den Erläuterungen aus (Hoffmann, 2018) lässt sich dieser Zusammenhang auf die höhere Reifensteifigkeit in Querrichtung bzw. den höheren Kräfteintrag bei vergleichsweise geringen Auslenkungen des Reifens zurückführen.

2.5 Grundlagen Zielkonflikte

In den vorhergehenden Kapiteln wird deutlich, dass die funktionalen Eigenschaften eines Reifens einerseits durch die Dimensionen von Rad und Reifen sowie durch die Betriebsbedingungen in Form von Radlast und Fülldruck beeinflusst werden. Die Festlegung eines geeigneten Dimensionsportfolios in der frühen Entwicklungsphase ist damit eine wichtige Voraussetzung zur bestmöglichen Erreichung der Gesamtfahrzeugziele des jeweiligen Anwendungsfalls. Innerhalb der einzelnen Dimensionskonfigurationen können die funktionalen Eigenschaften darüber hinaus durch den Einsatz unterschiedlicher Gummimischungen, durch Veränderungen der Profilgeometrie oder durch konstruktive Anpassungen des inneren Lagenaufbaus verändert werden. Die dabei vorliegenden Wechselwirkungen sind in den meisten Fällen stark multidimensional und teilweise gegenläufig, weshalb die konfliktfreie Verbesserung einzelner Reifeneigenschaften in der Regel nicht möglich ist. Das Abwägen der Vor- und Nachteile einzelner Anpassungsmöglichkeiten sowie das Auffinden optimaler Kompromisse sind daher eine Schlüsselkompetenz erfolgreicher Reifenhersteller. (Leister, 2015) (Heißing & Ersoy, 2013) (Braess, 2013) (Haken, 2013)

Einer der bekanntesten Zielkonflikte besteht in der Wechselwirkung des Rollwiderstands mit dem Haftungspotential eines Reifens und wird in einer Vielzahl wissenschaftlicher Arbeiten thematisiert (z. B. (Schulze, Bolz, Strübel, & Wies, 2010) (Greiner & Heimann, 2013) (Klempau, 2003) (Fach, 1996) (Koblitz, 2016) (Saemann, 2010)). Die gegenläufige Korrelation der beiden Eigenschaften basiert dabei auf den viskoelastischen Eigenschaften des Reifengummis und den unter Verformung auftretenden Dämpfungskräften. Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.2.1 führt der Einsatz von Gummimischungen mit geringer Dämpfung zu einer Abnahme der Walkarbeit beim Abrollen und damit zu einer Verringerung des Rollwiderstands. Bei Gleitvorgängen des Reifens gegenüber

der Fahrbahn entstehen durch die viskoelastischen Eigenschaften des Gummis hingegen Kräfte in Längs- und Querrichtung. Die Entstehung dieser sogenannten Hysteresereibung wird durch den Einsatz stark dämpfender Gummimischungen begünstigt und ist insbesondere bei der Kraftübertragung auf nasser Fahrbahn von großer Bedeutung. (Kummer, 1966) (Geyer, 1971) (Schulze, Bolz, Strübel, & Wies, 2010) Durch den Einsatz von Silika als Füllstoff seit Anfang der 1990er-Jahre ist es gelungen, die Dämpfungseffekte im Bereich niedriger Anregungsfrequenzen von etwa 10 Hz zu senken und die Dämpfung im Bereich höherer Anregungsfrequenzen zwischen 10^3 Hz und 10^5 Hz gleichzeitig zu erhöhen. Aufgrund der unterschiedlichen Verformungsfrequenz des Reifens beim Abrollen im Vergleich zur Verformungsfrequenz bei Gleitvorgängen gegenüber der Fahrbahn, wird auf diese Weise eine teilweise entkoppelte Optimierung der beiden Eigenschaften ermöglicht. (Schulze, Bolz, Strübel, & Wies, 2010) (Haken, 2013) (Klempau, 2003) Der vorhandene Zielkonflikt kann dennoch nicht vollständig aufgelöst werden und wird neben der Gummimischung auch durch die konstruktiven Eigenschaften des Reifens beeinflusst.

In (Peckelsen, 2017) werden diverse weitere Zielkonflikte auf Basis eines physikalischen Reifenmodells analysiert und ein umfassender Überblick hinsichtlich der verschiedenen Wechselwirkungen gegeben. Hierfür werden die funktionalen Reifeneigenschaften (FTC) von 5000 Kombinationen unterschiedlicher konstruktiver Merkmale, sogenannter Tyre Design Parameters (TDP), berechnet und die Ergebnisse statistisch ausgewertet. Ein starker Zielkonflikt besteht demnach zwischen dem Rollwiderstand und den Komforteigenschaften eines Reifens. Hohe Steifigkeiten führen einerseits zu geringeren Verformungen und damit zu einer Abnahme der Walkarbeit, während Fahrbahnanregungen hingegen schlechter vom Fahrzeug entkoppelt werden. Entsprechend liegt auch ein Zielkonflikt zwischen den fahrdynamisch relevanten Reifeneigenschaften und dem Komfortverhalten vor. Hohe Steifigkeiten führen zwar zu geringen Reifenverformungen bei der Übertragung von Längs- und Seitenkräften, gleichzeitig wird die Kraftanregung infolge rauer oder unebener Fahrbahnbeschaffenheiten jedoch begünstigt. Es ist zu beachten, dass die Sensitivitätsanalyse durch (Peckelsen, 2017) auch Variationen der geometrischen Eigenschaften von Rad und Reifen beinhaltet, wodurch die Zielkonflikte innerhalb einzelner Dimensionen nicht unabhängig bewertet werden können. Aufgrund der vergleichbaren physikalischen

Wirkketten ist jedoch auch innerhalb einzelner Kombinationen von Rad und Reifen von ähnlichen Abhängigkeiten auszugehen.

2.6 Grundlagen Statistik

In den weiterführenden Kapiteln sollen zum einen die Einflüsse geometrischer und physikalischer Parameter auf die FTC unterschiedlicher Eigenschaftsbereiche quantifiziert werden. Zum anderen sollen Näherungsmodelle zur Prognose der einzelnen FTC anhand der relevanten Einflussparameter entwickelt werden. Hierbei kommen statistische Methoden zum Einsatz, welche im Folgenden erläutert werden.

2.6.1 Regressionsanalyse

Die Regressionsanalyse ist ein statistisches Näherungsverfahren, welches in vielen Bereichen der Wissenschaft Anwendung findet. Bei der Regressionsanalyse wird ein funktionaler Zusammenhang zur Beschreibung einer Zielgröße anhand zuvor festgelegter Einflussparameter ermittelt. Hierbei wird einerseits eine hohe Näherungsgüte zur Prognose der Zielgröße angestrebt. Darüber hinaus, können sowohl Stärke wie auch Richtung der einzelnen Einflüsse quantifiziert werden. (Kosfeld, Eckey, & Türck, 2016) (Weisberg, 2005)

2.6.1.1 Multiple lineare Regression erster Ordnung

Die multiple lineare Regression erster Ordnung stellt einen Sonderfall der Regressionsanalyse dar. Dabei wird der Datenpunkt y_i der Ausgangsvariable y durch eine Linearkombination der Datenpunkte x_{ij} der k unabhängigen Eingangsvariablen x_j genähert. Der Fehlerterm ε_i wird als Residuum bezeichnet und beinhaltet diejenigen Einflüsse, welche nicht durch das Regressionsmodell abgebildet werden. Es gilt der Zusammenhang aus Formel (2.38). (Siebertz, van Bebber, & Hochkirchen, 2010) (Arens, et al., 2018)

$$y_i = a_0 + \sum_{j=1}^k a_j \cdot x_{ij} + \varepsilon_i \quad (2.38)$$

Die zugehörigen Regressionsparameter a_j werden auf Basis von n Messpunkten (x_i, y_i) so festgelegt, dass die Abweichungen zwischen den Messwerten y_i und den Näherungswerten \hat{y}_i möglichst gering sind. Mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate wird hierfür die Summe q der quadrierten Residuen ε_i^2 minimiert, wobei die partiellen Ableitungen von q nach den einzelnen Regressionsparametern a_j jeweils den Wert null aufweisen müssen. Die entsprechenden Zusammenhänge werden durch die Formeln (2.39) und (2.40) beschrieben. (Fahrmeir, Heumann, Künstler, Pigeot, & Tutz, 2016) (Kosfeld, Eckey, & Türck, 2016)

$$q = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \quad (2.39)$$

$$\frac{\delta q}{\delta a_j} \stackrel{!}{=} 0 \quad (2.40)$$

Neben der linearen Regression erster Ordnung existieren auch weitere Verfahren zur Regressionsanalyse. Dabei können entweder die unabhängigen Eingangsvariablen mit höheren Ordnungen in das Regressionsmodell eingehen (lineare Regression höherer Ordnung) oder mehrere Regressionsparameter als nichtlineare Kombination vorliegen (nichtlineare Regression). (Fahrmeir, Heumann, Künstler, Pigeot, & Tutz, 2016) Ein Vorteil von linearen Regressionsmodellen höherer Ordnung oder nichtlinearen Regressionsmodellen liegt in der hohen Näherungsgüte bei der Auswertung komplexer Zusammenhänge. Bei der Extrapolation in Wertebereichen außerhalb der Datenbasis können die nichtlinearen Terme jedoch zu starken Approximationsfehlern führen.

2.6.1.2 Standardisierte Regressionsparameter

Die in Kapitel 2.6.1.1 erläuterten Regressionsparameter a_j sind unstandardisiert und weisen, je nach Einheiten und Wertebereichen der Eingangsvariablen, unterschiedliche Größenordnungen auf. Aus diesem Grund können die Stärken der einzelnen Einflüsse zwar quantifiziert, jedoch nicht unmittelbar verglichen werden. Eine Möglichkeit zur Lösung dieser Problematik bieten standardisierte Regressionsparameter. (Langer, 2002) Zur Ermittlung der standardisierten Regressionsparameter werden die Ein- und Ausgangsvariablen normiert, sodass der Mittelwert jeweils den Wert 0 und die Varianz den Wert 1 aufweist. (Arens, et

al., 2018) (Fahrmeir, Heumann, Künstler, Pigeot, & Tutz, 2016) Bei linear unabhängigen Eingangsvariablen liegen die Werte der standardisierten Regressionsparameter im Intervall zwischen -1 und 1 und charakterisieren damit die Stärke der jeweiligen Einflüsse. (Langer, 2002)

Ausgehend von den unstandardisierten Regressionsparametern a_j berechnen sich die standardisierten Regressionsparameter $a_{s,j}$ entsprechend Formel (2.41). Die Größen σ_{x_j} und σ_y bezeichnen dabei die Standardabweichungen der Eingangs- bzw. Ausgangsvariablen. (Siebertz, van Bebber, & Hochkirchen, 2010) (Langer, 2002)

$$a_{s,j} = a_j \cdot \frac{\sigma_{x_j}}{\sigma_y} \quad (2.41)$$

Zur Normierung der Eingangs- und Ausgangsvariablen wird innerhalb der vorliegenden Arbeit die Software Matlab verwendet. Weiterführende Erläuterungen befinden sich in (MathWorks, III-2018).

2.6.2 Künstliche Neuronale Netze (KNN)

Künstliche Neuronale Netze (KNN) sind Näherungsmodelle, welche sich an den Organisations- und Verarbeitungsprinzipien des menschlichen Gehirns orientieren. (Strecker, 1997) (Mainzer, 2019) Im Gegensatz zu anderen Näherungsmodellen werden die einzelnen Näherungsterme dabei nicht vorgegeben, sondern anhand vorliegender Trainingsdaten optimiert. (Männer & Lange, 1994) (Siebertz, van Bebber, & Hochkirchen, 2010) Wichtigster Bestandteil von KNN sind die sogenannten Neuronen, welche die Eingangsgrößen verarbeiten und die enthaltenen Informationen untereinander austauschen. (Siebertz, van Bebber, & Hochkirchen, 2010) Je nach Anordnung der einzelnen Neuronen wird zwischen diversen Topologien der KNN unterschieden. Bei mehrschichtigen KNN sind die Neuronen beispielsweise in mehreren Ebenen hintereinander angeordnet, wobei innerhalb jeder Ebene jeweils eine parallele Neuronenstruktur vorliegt. Die optimale Neuronenanzahl und -topologie sind entsprechend den Anforderungen des jeweiligen Anwendungsfalls festzulegen. (Strecker, 1997) Im Falle der vorliegenden Arbeit kommen ausschließlich vorwärtsgerichtete KNN mit einer Ebene

und einem Neuron zum Einsatz (siehe Erläuterungen Kapitel 3.2). Die zugehörige Topologie ist in Abbildung 2.9 schematisch dargestellt.

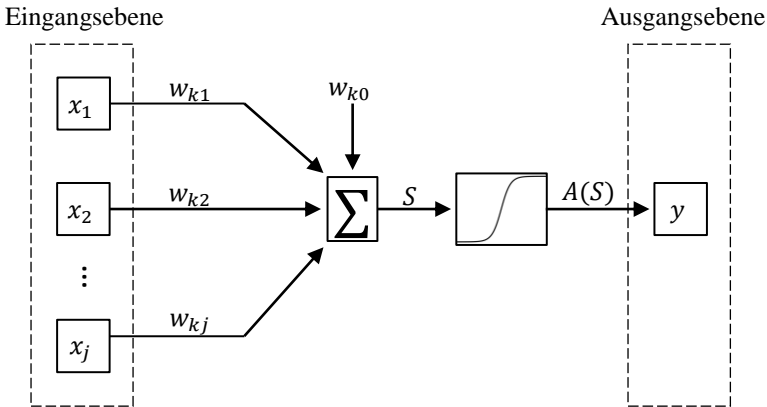


Abbildung 2.9: Vorwärtsgerichtetes KNN mit einem Neuron

Die Hauptinformation eines Neurons der Ebene $k + 1$ ist die sogenannte Aktivierung $A(S_{k+1})$. Der Term S_{k+1} ist dabei entsprechend Formel (2.42) durch die Aktivierungen A_k der n_e Neuronen aus der vorhergehenden Ebene k sowie durch die zugehörigen Gewichte w_k definiert. Im Falle der KNN der vorliegenden Arbeit mit einer Ebene und einem Neuron entsprechen die Aktivierungen A_k den normierten Eingangsvariablen x_j . Die Aktivierung $A(S_{k+1})$ berechnet sich anhand einer sigmoidalen Aktivierungsfunktion nach Formel (2.43). (Siebertz, van Bebber, & Hochkirchen, 2010) (MathWorks, II-2018)

$$S_{k+1} = w_{k0} + \sum_{j=1}^{n_e} A_{kj} \cdot w_{kj} \quad (2.42)$$

$$A(S_{k+1}) = \frac{1}{1 + e^{-S_{k+1}}} \quad (2.43)$$

Die einzelnen Gewichte w_k werden im Rahmen der Lernphase anhand vorliegender Beispieldatensätze festgelegt. Dabei werden die Lerndaten in Trainings-

und Validierungsdaten aufgeteilt. Unter Verwendung von Optimierungsalgorithmen werden die Parameter des KNN daraufhin variiert und ein idealer Kompromiss aus einer hohen Näherungsgüte zur Abbildung der Trainingsdaten sowie einer gleichermaßen hohen Näherungsgüte zur Abbildung der Validierungsdaten angestrebt. (Siebertz, van Bebber, & Hochkirchen, 2010) (Strecker, 1997) Innerhalb der vorliegenden Arbeit wird die Software Matlab zur Erstellung von KNN verwendet, wobei ein Levenberg-Marquardt-Algorithmus zum Training verwendet wird. Für weiterführende Informationen sei auf die Erläuterungen in (MathWorks, II-2018) verwiesen.

Ein großer Vorteil von KNN besteht in der Tatsache, dass die Näherungszusammenhänge während der Lernphase selbstständig optimiert werden und keine Vorkenntnisse über die Wechselwirkungen des betrachteten Systems erforderlich sind. (Strecker, 1997) Des Weiteren können komplexe, nichtlineare Zusammenhänge bereits mit einer geringen Neuronenanzahl abgebildet werden. (Strecker, 1997) (Siebertz, van Bebber, & Hochkirchen, 2010) Im Gegensatz zu anderen Näherungsmodellen, wie beispielsweise der Regressionsanalyse, sind die Wirkzusammenhänge bei der Verwendung von KNN jedoch nur eingeschränkt interpretierbar, was auf die komplexeren Topologien zurückzuführen ist. (Strecker, 1997) Bei der Verwendung vieler Neuronen oder einer geringen Datenbasis besteht darüber hinaus die Gefahr des sogenannten Overfittings. Dabei stehen mehr Gewichte w_k als Beispieldaten zum Training zur Verfügung. Die Beispieldaten werden daher gut approximiert, jedoch liegen starke Abweichungen gegenüber weiteren, vom Training unabhängigen Messdaten vor. (Siebertz, van Bebber, & Hochkirchen, 2010) Bei der Verwendung vieler Neuronen ist darüber hinaus von starken Extrapolationsfehlern in Wertebereichen außerhalb der Datenbasis auszugehen.

2.6.3 Bewertung der Näherungsgüte

Ein wichtiges Kriterium zur Bewertung der Güte von Näherungsmodellen ist die Varianz σ_ε^2 der Residuen ε_i , welche durch die mittlere quadratische Abweichung der Messwerte y_i von den näherungsweise berechneten Werten \hat{y}_i definiert ist. Es gilt der Zusammenhang aus Formel (2.44), wobei die Größe n dem Stichprobenumfang der Datenbasis entspricht. (Fahrmeir, Heumann, Künstler, Pigeot, &

Tutz, 2016) (Hedderich & Sachs, 2016) (Kosfeld, Eckey, & Türck, 2016) (Langer, 2002)

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \quad (2.44)$$

Die Varianz σ_y der Messwerte y_i sowie die Varianz $\sigma_{\hat{y}}$ der Näherungswerte \hat{y}_i sind entsprechend durch die Formeln (2.45) und (2.46) definiert. Die Größen \bar{y} und $\bar{\hat{y}}$ beschreiben dabei jeweils den mittleren Mess- bzw. Näherungswert.

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.45)$$

$$\sigma_{\hat{y}}^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2 \quad (2.46)$$

Entscheidend für die Bewertung der Näherungsgüte ist die Frage, welcher Anteil der Varianz der Messwerte durch das jeweilige Näherungsmodell zu erklären ist. Die zugehörige Kenngröße wird als Determinationskoeffizient bzw. Bestimmtheitsmaß R^2 bezeichnet und berechnet sich anhand der Zusammenhänge aus Formel (2.47). (Fahrmeir, Heumann, Künstler, Pigeot, & Tutz, 2016) (Hedderich & Sachs, 2016) (Kosfeld, Eckey, & Türck, 2016) (Langer, 2002)

$$R^2 = \frac{\sigma_{\hat{y}}^2}{\sigma_y^2} = 1 - \frac{\sigma_{\varepsilon}^2}{\sigma_y^2} \quad (2.47)$$

Das Bestimmtheitsmaß R^2 hat sich in vielen Bereichen der Wissenschaft als Kriterium zur Bewertung der Näherungsgüte bewährt. Trotz hoher Bestimmtheitsmaße können in Einzelfällen starke Abweichungen zwischen den Messwerten und den approximierten Werten vorliegen. Die grafische Analyse der Residuen ist daher eine unverzichtbare Ergänzung zur Auswertung der statistischen Kenngrößen. (Arens, et al., 2018)

2.6.4 Statistische Signifikanz

Betrachtet man die Messwerte einer Datenbasis als Ergebnis einer zufälligen Stichprobe, so besteht grundsätzlich eine gewisse Wahrscheinlichkeit für das Auffinden von Wechselwirkungen, obwohl diese tatsächlich nicht existieren. Im

Rahmen der Signifikanzanalyse werden derartige Unsicherheiten anhand objektiver Kriterien eingeordnet. Ausgangspunkt ist hierbei die sogenannte Nullhypothese, welche von einer normalverteilten und korrelationsfreien Datenbasis ausgeht. Wird die Nullhypothese abgelehnt bzw. eine Korrelation zwischen den Messdaten angenommen, obwohl das Ergebnis auf dem Zufall beruht, so spricht man vom Fehler erster Art. (Fahrmeir, Heumann, Künstler, Pigeot, & Tutz, 2016) (Siebertz, van Bebber, & Hochkirchen, 2010) (Hedderich & Sachs, 2016) Die Wahrscheinlichkeit für diesen Fall wird durch den sogenannten p-Wert beschrieben, welcher als verbreitete Kennzahl zur Bewertung der Signifikanz statistischer Ergebnisse dient. Der p-Wert sollte unterhalb eines vorgegebenen Grenzwerts, dem sogenannten Signifikanzniveau, liegen. In der Literatur wird häufig ein Signifikanzniveau von 0,05 als Obergrenze zur Annahme statistisch signifikanter Zusammenhänge angegeben. (Fahrmeir, Heumann, Künstler, Pigeot, & Tutz, 2016) (Hedderich & Sachs, 2016) (Weisberg, 2005) (Siebertz, van Bebber, & Hochkirchen, 2010)

Die Regressionsmodelle der vorliegenden Arbeit werden unter Verwendung der Software Matlab hinsichtlich der statistischen Signifikanz bewertet. (MathWorks, I-2018) Der zugehörige p-Wert basiert dabei auf der sogenannten F-Statistik und charakterisiert, inwiefern von einem tatsächlichen Zusammenhang zwischen der Ausgangsvariable und dem gewählten Regressionsansatz auszugehen ist. Der zur Bewertung herangezogene F-Wert berechnet sich anhand des Bestimmtheitsmaßes R^2 (siehe Kapitel 2.6.1.1), der Anzahl n an Messdaten sowie der Anzahl k an Eingangsvariablen entsprechend Formel (2.48). (Fahrmeir, Heumann, Künstler, Pigeot, & Tutz, 2016)

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{n-k-1}{k} \quad (2.48)$$

Im Falle einer normalverteilten Datenbasis würde der F-Wert der sogenannten Fisher-Verteilung folgen. Der p-Wert bzw. die Auftretenswahrscheinlichkeit für den Fehler erster Art lässt sich damit anhand der zugehörigen Dichtefunktion berechnen. Für detailliertere Informationen sei hierbei auf die Erläuterungen in (Hedderich & Sachs, 2016) und (Henze & Kadelka, 2010) verwiesen.

2.6.5 Normalverteilung nach Gauß

In weiterführenden Kapiteln der vorliegenden Arbeit werden unter anderem die Einflüsse der Gummimischung und der Reifenkonstruktion auf die FTC unterschiedlicher Eigenschaftsbereiche analysiert. Anhand von Histogrammen wird dabei deutlich, dass die Messwerte näherungsweise entsprechend der Normalverteilung nach Gauß um den jeweiligen Mittelwert einer Reifendimension verteilt sind. Die zugehörige Dichtefunktion $\varphi(x)$ der Normalverteilung ist durch Formel (2.49) definiert. Dabei entsprechen die Größen m_φ und σ_φ^2 dem Mittelwert bzw. der Varianz der Funktionsvariablen unterhalb der Dichtefunktion. (Henze & Kadelka, 2010) (Arens, et al., 2018) (Hedderich & Sachs, 2016) (Dümbgen, 2016)

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma_\varphi \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(x-m_\varphi)^2}{2 \cdot \sigma_\varphi^2}} \quad (2.49)$$

Die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Werts im Intervall $[x_u, x_o]$ wird entsprechend durch die Funktion $\Phi(x_u, x_o)$ aus Formel (2.50) beschrieben. (Henze & Kadelka, 2010) (Dümbgen, 2016)

$$\Phi(x_u, x_o) = \int_{x_u}^{x_o} \varphi(x) \cdot dx \quad (2.50)$$

Innerhalb der Statistik werden die Streuintervalle der Normalverteilung häufig als Vielfache der Standardabweichung σ_φ um den Mittelwert m_φ angegeben. Die Auftretenswahrscheinlichkeit $\Phi(x_u, x_o)$ eines Werts im jeweiligen Intervall $[x_u, x_o]$ entspricht dabei jeweils dem von der Dichtefunktion eingeschlossenen Flächenanteil. In Tabelle 2.1 sind die Auftretenswahrscheinlichkeiten bzw. Flächenanteile beispielhafter Streuintervalle in Abhängigkeit von der Standardabweichung zusammengefasst. (Hedderich & Sachs, 2016)

Tabelle 2.1: Auftretenswahrscheinlichkeiten der Normalverteilung nach Gauß

$[x_u, x_o]$	$\Phi(x_u, x_o)$
$m_\varphi \pm 1 \cdot \sigma_\varphi$	68,27 %
$m_\varphi \pm 2 \cdot \sigma_\varphi$	95,45 %
$m_\varphi \pm 3 \cdot \sigma_\varphi$	99,73 %
$m_\varphi \pm 4 \cdot \sigma_\varphi$	99,98 %

2.6.6 Lösungsräume

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden zum einen statistische Näherungsmodelle entwickelt, welche die FTC unterschiedlicher Eigenschaftsbereiche anhand der Dimensionen von Rad und Reifen, der Radlast sowie des Reifenfülldrucks prognostizieren. Darüber hinaus wird eine Methode vorgestellt, welche die Ermittlung optimaler Dimensionsbereiche für die Anforderungen spezifischer Anwendungsfälle ermöglicht. Die dabei angewandte Methodik der Lösungsräume wird erstmalig in (Zimmermann & Edler von Hoessle, 2013) vorgestellt und in (Vogt, Duddeck, Wahle, & Zimmermann, 2018) sowie (Strigel, Peckelsen, Unrau, & Gauterin, 2020) zur Auslegung diverser Fahrwerkskomponenten eingesetzt. Dabei werden zunächst die für den jeweiligen Fall relevanten Einflussparameter, wie beispielsweise die funktionalen Eigenschaften unterschiedlicher Komponenten, sowie deren mögliche Variationsbereiche festgelegt. Unter Verwendung eines Monte Carlo Samplings (siehe (Siebertz, van Bebber, & Hochkirchen, 2010)) wird innerhalb dieser Grenzen jeweils eine große Anzahl unterschiedlicher Wertekombinationen generiert und die Datenpunkte in zweidimensionale Diagramme eingetragen. Die bei den einzelnen Einflusskombinationen vorliegenden Funktionsgrößen, wie zum Beispiel objektive Kennwerte des dynamischen Fahrzeugverhaltens, werden daraufhin anhand bekannter Zusammenhänge oder Näherungen berechnet. In Abhängigkeit von der Zielerreichung

aller Funktionsgrößen werden die Samplingpunkte anschließend farblich gekennzeichnet. Auf diese Weise können gültige Datenpunkte hervorgehoben und geeignete Wertebereiche der Einflussparameter visualisiert werden. Für weiterführende Erläuterungen sei auf den beispielhaften Anwendungsfall in Kapitel 8 verwiesen.

3 Ziele und Vorgehensweise

Auf Basis der Erkenntnisse aus Kapitel 2 wird im Folgenden die Forschungsfrage der vorliegenden Arbeit identifiziert und eine wissenschaftliche Abgrenzung zu den Inhalten vorhergehender Arbeiten vorgenommen. Darüber hinaus wird eine allgemeine Vorgehensweise zur Analyse und Quantifizierung der Wirkzusammenhänge innerhalb der unterschiedlichen Eigenschaftsbereiche des Reifens vorgestellt.

3.1 Ziele

In den vorhergehenden Kapiteln wird deutlich, dass der Reifen im Hinblick auf die Energieeffizienz, die Fahrdynamik sowie das Komfortverhalten des Gesamtfahrzeugs von großer Bedeutung ist. Bei der Auslegung der Rad- und Reifendimensionen für ein neues Fahrzeugmodell sollte daher bereits in der frühen Entwicklungsphase auf die spätere Realisierbarkeit des gewünschten Fahrzeugverhaltens geachtet werden. Dabei liegen zum einen Zielkonflikte zwischen den unterschiedlichen Kombinationen der Rad- und Reifendimension vor. Darüber hinaus entstehen innerhalb der einzelnen Dimensionskombinationen weitere Zielkonflikte durch den Einsatz unterschiedlicher Reifenkonstruktionen und Gummimischungen. Um die innerhalb eines Anwendungsfalls geforderten Reifeneigenschaften bestmöglich zu erfüllen, sind quantitative Kenntnisse über die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Auslegungsparametern und den jeweils relevanten Reifeneigenschaften erforderlich.

Es liegt bereits eine Vielzahl an Arbeiten vor, welche die Einflüsse verschiedener Reifeneigenschaften auf das Gesamtfahrzeugverhalten umfassend aufzeigen (z. B. (Gutjahr, 2013) (Niedermeier, 2015) (Di Luise, 2015) (Braess, 2013) (Zomotor, 1991)). Darüber hinaus wird in diversen weiteren Arbeiten auf die unmittelbaren Auswirkungen der Dimensionen von Rad und Reifen sowie der Betriebsbedingungen auf die Reifeneigenschaften unterschiedlicher Eigen-

schaftsbereiche hingewiesen. Häufig werden die Wirkketten dabei jedoch ausschließlich qualitativ diskutiert oder anhand einzelner Messungen analysiert, und auf die Angabe quantitativer Zusammenhänge verzichtet (z. B. (Einsle, 2010) (Niemeyer, 2017) (Holtschulze, 2006) (Clark, 1977) (Vennebörger, Strübel, Wies, & Wiese, 2013) (Heißing & Ersoy, 2013)). Durch die gezielte Variation einzelner Einflussparameter oder durch die Verwendung statistischer Ansätze können die Wirkzusammenhänge in anderen Arbeiten hingegen quantitativ erfasst werden (z. B. (Wittmeier, 2014) (Schütz, 2017) (Strigel, Peckelsen, Unrau, & Gauterin, 2018) (Strigel, Peckelsen, Unrau, & Gauterin, 2019) (Vorotovic, Rakicevic, Mitic, & Stamenkovic, 2013) (Kusaka & Nagayama, 2015) (Kusaka & Suzuki, 2013) (Hoffmann, 2018) (Peckelsen, 2017)).

Trotz der teilweise detaillierten Betrachtung einzelner funktionaler Reifeneigenschaften, bieten die Ergebnisse vorhergehender Arbeiten keine ganzheitliche und eigenschaftsübergreifende Quantifizierung aller für die Grundausslegung relevanten Wirkketten. Um Entscheidungen der frühen Entwicklungsphase in Zukunft anhand objektiver Kriterien treffen zu können, soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine methodisch einheitliche Quantifizierung der Wirkzusammenhänge aus den Eigenschaftsbereichen Energieeffizienz, Fahrdynamik und Komfort erfolgen. Basierend auf diesen Erkenntnissen, soll darüber hinaus eine Methode entwickelt werden, welche die Ermittlung optimaler Dimensionsbereiche von Rad und Reifen zur bestmöglichen Erfüllung der spezifischen Anforderungen beliebiger Anwendungsszenarien ermöglicht.

3.2 Vorgehensweise

Bei der Analyse und Quantifizierung der Wirkzusammenhänge bezüglich Energieeffizienz, Fahrdynamik und Komfort wird in mehreren Schritten vorgegangen. Die allgemeine Vorgehensweise basiert dabei auf der Tatsache, dass die FTC eines Reifens einerseits durch die Dimensionen von Rad und Reifen, die Radlast sowie den Fülldruck beeinflusst werden. Innerhalb der einzelnen Konfigurationen unterschiedlicher Dimensionen und Betriebsbedingungen werden die FTC darüber hinaus durch die Gummimischung sowie durch die konstruktiven Eigenschaften des Reifens beeinflusst.

Auf Grundlage dieses Ansatzes werden die aus früheren Entwicklungsprojekten vorhandenen Messdaten zunächst anhand der Rad- und Reifendimension, der Radlast sowie des Fülldrucks kategorisiert. Innerhalb jeder Kategorie wird jeweils der Mittelwert \overline{FTC} aller enthaltenen Messwerte FTC_i berechnet. Die durch unterschiedliche Gummimischungen und Reifenkonstruktionen hervorgerufenen Streuungen werden auf diese Weise ausgeblendet und die ausschließliche Analyse der Dimensionseinflüsse sowie der Einflüsse in Folge veränderter Radlasten und Fülldrücke ermöglicht. Die vorliegenden Einflüsse können daraufhin mit Hilfe einer multiplen linearen Regression erster Ordnung (siehe Kapitel 2.6.1) quantifiziert und anhand der jeweiligen Regressionsparameter physikalisch interpretiert werden. Die Verwendung der Mittelwerte \overline{FTC} zur Näherung bietet den weiteren Vorteil, dass die statistische Gewichtung bei einer unterschiedlichen Anzahl an Messwerten in den einzelnen Kategorien vermieden wird.

Zur Berücksichtigung nichtlinearer Zusammenhänge wird darüber hinaus jeweils ein KNN zur Näherung der FTC-Mittelwerte \overline{FTC} verwendet. Um starke Extrapolationsfehler in Wertebereichen außerhalb der Datenbasis zu vermeiden, enthält das verwendete KNN ausschließlich ein Neuron (siehe Kapitel 2.6.2). Bei der Erzeugung des KNN werden 80 Prozent der Datenbasis als Trainingsdaten verwendet. 10 Prozent der Daten werden als Validierungsdaten während des Trainingsprozesses herangezogen. Die verbleibenden 10 Prozent werden als vom Trainingsprozess unabhängige Testdaten genutzt. Eine Besonderheit bei der Verwendung von KNN besteht innerhalb der vorliegenden Arbeit in der vergleichsweise geringen Menge an Messdaten. Würde ein KNN anhand dieser Datenbasis ausschließlich einmal angelehrt, so wäre die hieraus resultierende Näherungsgüte wegen der zufälligen Aufteilung in Trainings-, Test- und Validierungsdaten nicht reproduzierbar. Zur Lösung dieser Problematik wird der Anlernprozess bzw. die Aufteilung in Trainings- Test- und Validierungsdaten insgesamt 1000-mal durchgeführt und bei jedem Durchlauf die Bestimmtheitsmaße R^2_{tr} , R^2_v und R^2_t der Trainings-, Validierungs- und Testdaten bestimmt. Anschließend wird jenes KNN ausgewählt, dessen Bestimmtheitsmaße R^2_{tr} , R^2_v und R^2_t die geringste Abweichung ΔR^2 von den Bestimmtheitsmaßen $R^2_{tr,h}$, $R^2_{v,h}$ und $R^2_{t,h}$ mit der größten Auftretenswahrscheinlichkeit haben. Die Werte von $R^2_{tr,h}$, $R^2_{v,h}$ und $R^2_{t,h}$ werden dabei jeweils auf die zweite Nachkommastelle gerundet. Für die Abweichung ΔR^2 wird der Zusammenhang aus Formel (3.1) definiert. Auf

diese Weise werden eine hohe Reproduzierbarkeit des Anlernprozesses und belastbare Näherungsmodelle ermöglicht.

$$\Delta R^2 = (R^2_{tr} - R^2_{tr,h}) + (R^2_v - R^2_{v,h}) + (R^2_t - R^2_{t,h}) \quad (3.1)$$

Nach Analyse der Einflüsse der Dimensionen von Rad und Reifen sowie der Betriebsbedingungen werden im weiteren Verlauf jeweils die Streubereiche der FTC in Folge unterschiedlicher Gummimischungen und Reifenkonstruktionen untersucht. Hierfür werden die relativen Abweichungen ΔFTC_i der einzelnen Messwerte FTC_i aller Reifen von den zugehörigen Kategoriemittelwerten \overline{FTC} berechnet. Es gilt der Zusammenhang aus Formel (3.2).

$$\Delta FTC_i = \frac{(FTC_i - \overline{FTC})}{\overline{FTC}} \quad (3.2)$$

Die Abweichungen ΔFTC_i aller Messwerte, welche aus Kategorien mit mehr als einem Reifen stammen, werden daraufhin in Histogrammen visualisiert. Dabei wird innerhalb aller Eigenschaftsbereiche deutlich, dass die Messwerte näherungsweise entsprechend der Normalverteilung nach Gauß (siehe Kapitel 2.6.5) um die jeweiligen Kategoriemittelwerte \overline{FTC} verteilt sind. Die Streuungen können damit anhand von mathematischen Zusammenhängen beschrieben und die Streubreiten für spezifische Auftretenswahrscheinlichkeiten näherungsweise berechnet werden. In Kapitel 7 werden des Weiteren Methoden zur objektiven Erfassung von Zielkonflikten zwischen unterschiedlichen FTC anhand der jeweiligen Abweichungen ΔFTC_i entwickelt.

Im letzten Abschnitt der Arbeit werden die quantifizierten Wirkzusammenhänge aller Eigenschaftsbereiche in eine Software zur Visualisierung von Lösungsräumen (siehe Kapitel 2.6.6) eingebunden. Diese Software wurde bereits im Rahmen vorhergehender Arbeiten entwickelt bzw. eingesetzt (z. B. (Zimmermann & Edler von Hoessle, 2013) (Vogt, Duddeck, Wahle, & Zimmermann, 2018) (Strigel, Peckelsen, Unrau, & Gauterin, 2020)) und wird in der vorliegenden Arbeit an die spezifischen Anforderungen der Grundausslegung von Rädern und Reifen adaptiert. Damit können Wertebereiche der Dimensionen von Rad und

Reifen zur optimalen Erfüllung der Anforderungen spezifischer Anwendungsfälle abgeleitet werden. Darüber hinaus können mögliche Zielverfehlungen frühzeitig identifiziert und entsprechende Lösungsmaßnahmen aufgezeigt werden.

4 Energieeffizienz

In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen der Dimensionen von Rad und Reifen auf die für den Fahrwiderstand relevanten FTC (siehe Kapitel 2.2) untersucht, wobei die in Kapitel 3.2 erläuterte Methodik zur Anwendung kommt.

Die Masseneigenschaften von Rad und Reifen werden in (Peckelsen, 2017) den sogenannten Tyre Design Parameters (TDP) zugeordnet. Entsprechend dieser Definition werden die Parameter nicht als funktionale Eigenschaften (FTC), sondern als Optimierungsvariablen innerhalb der Konstruktionsphase des Reifens betrachtet. Veränderungen der Masseneigenschaften werden daher, ebenso wie die funktionalen Einflüsse der Gummimischung und des Lagenaufbaus, im Rahmen der jeweiligen Streubereichsanalyse (siehe Kapitel 3.2) berücksichtigt. Auf eine weiterführende Analyse der Masseneigenschaften wird in der vorliegenden Arbeit verzichtet.

Die Anwendung der in Kapitel 3.2 vorgestellten Methodik erfordert eine umfangreiche Anzahl an Messwerten. Im Falle der Einflüsse von Rad und Reifen auf den Luftwiderstand des Gesamtfahrzeugs liegt eine entsprechende Datenbasis nicht vor, weshalb auf eine erweiterte Analyse der aerodynamischen Wechselwirkungen ebenfalls verzichtet wird.

4.1 Rollwiderstand

Im Folgenden werden die Einflüsse der Rad- und Reifendimension auf den Rollwiderstandsbeiwert $c_{r,E}$ auf horizontaler Fahrbahn (siehe Kapitel 2.2.1.1) anhand der Methodik aus Kapitel 3.2 analysiert. Die zusätzliche Analyse der Einflüsse durch unterschiedliche Radlasten und Fülldrücke ist anhand der vorliegenden Datenbasis nicht möglich. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden hierbei die Zusammenhänge aus Kapitel 2.2 angenommen.

4.1.1 Datenbasis

Zur Quantifizierung der Wirkzusammenhänge werden die Rollwiderstandsmessungen von insgesamt 30 Normal Load- und 81 Extra Load-Sommerreifen ohne Notlaufeigenschaften ausgewertet. Die Räder und Reifen der Datenbasis kommen bei einer Vielzahl unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte zum Einsatz und bilden einen weiten Dimensionsbereich ab. Die Verteilung der zugehörigen Reifenbreiten, Querschnittsverhältnisse und Felgendurchmesser ist in Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 visualisiert. Die Datenbasis beinhaltet ausschließlich Reifen von Fahrzeugen mit einem Produktionsbeginn (SOP) ab dem Jahr 2013. Auf diese Weise sollen die Einflüsse technologischer Veränderungen im Laufe der Jahre minimiert werden.

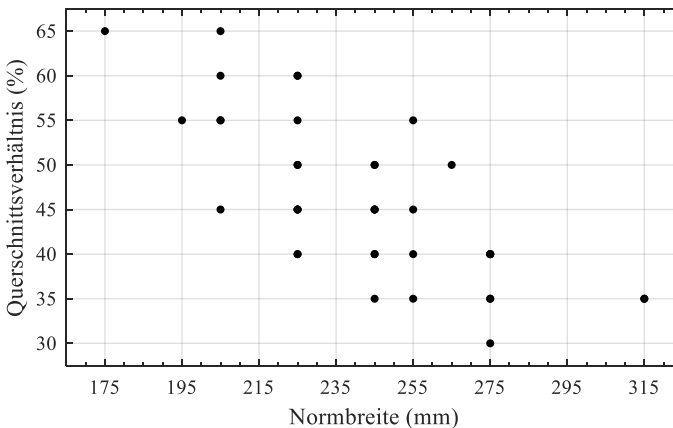


Abbildung 4.1: Reifenbreiten und Querschnittsverhältnisse der Datenbasis (Rollwiderstand)

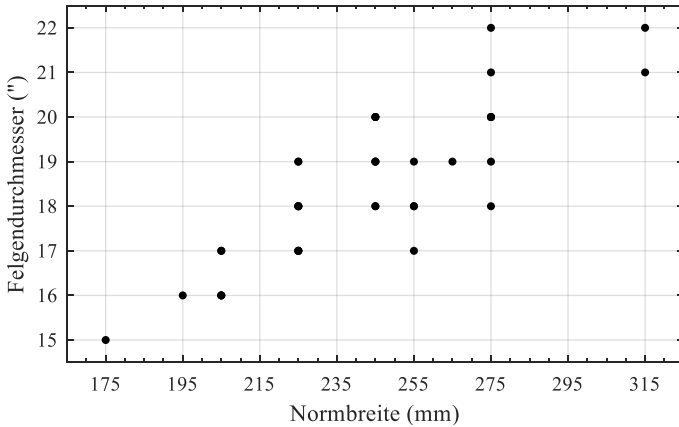


Abbildung 4.2: Reifenbreiten und Felgendurchmesser der Datenbasis (Rollwiderstand)

Entsprechend den Vorgaben nach (ISO 2850, 2009) werden die Messwerte $c_{r,T}$ des Rollwiderstandsbeiwerts jeweils auf einem Außentrommelprüfstand mit Stahlauffläche und einem Trommeldurchmesser von 2 m ermittelt. Die zur Messung verwendete Felgenmaulweite entspricht dabei jeweils der Messfelgenmaulweite nach (The European Tyre and Rim Technical Organisation, 2018). Aufgrund der unterschiedlichen Messfülldrücke von 2,1 bar bei Normal Load- und 2,5 bar bei Extra Load-Reifen sind die ermittelten Rollwiderstandsbeiwerte nicht unmittelbar vergleichbar. Unter Verwendung von Formel (2.10) nach (Société de Technologie Michelin, 2005) (siehe Kapitel 2.2.1.4) werden die Rollwiderstandsbeiwerte der Normal Load-Reifen daher auf die jeweiligen Messbedingungen von Extra Load-Reifen der identischen Dimension umgerechnet. Um die Einflüsse der stärkeren Reifenverformung auf gekrümmten Oberflächen auszublenken, werden die am Trommelprüfstand ermittelten Rollwiderstandsbeiwerte $c_{r,T}$ darüber hinaus anhand der Methodik nach (Unrau, 2012) (siehe Kapitel 2.2.1.2) in die auf horizontaler Fahrbahn vorliegenden Rollwiderstandsbeiwerte $c_{r,E}$ umgerechnet.

4.1.2 Regressionsanalyse

Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.2.1.3 haben der Felgendurchmesser D_F sowie die Normbreite $B_{R,N}$ und der Außendurchmesser D_R des Reifens wesentlichen Einfluss auf den Rollwiderstand. Die Parameter werden daher als Eingangsvariablen des Regressionsmodells verwendet. Einflüsse der Felgenmaulweite werden aufgrund der Erläuterungen in Kapitel 2.2.1.3 hingegen vernachlässigt. Es ergibt sich der Regressionsansatz nach Formel (4.1) zur Näherung des Rollwiderstandsbeiwerts $c_{r,E}$ auf horizontaler Fahrbahn.

$$c_{r,E} = a_0 + a_1 \cdot B_{R,N} + a_2 \cdot D_R + a_3 \cdot D_F \quad (4.1)$$

Zur Vermeidung statistischer Gewichtung wird innerhalb der einzelnen Dimensionen jeweils der mittlere Rollwiderstand aller Reifen herangezogen (siehe Kapitel 3.2). In Abbildung 4.3 sind die näherungsweise berechneten Werte des Rollwiderstands gegenüber den jeweiligen Messwerten aufgetragen. Das Bestimmtheitsmaß von 0,85 sowie die geringe Streuung der Datenpunkte um die idealisierte Regressionsgerade deuten dabei auf eine hohe Näherungsgüte des Regressionsmodells hin.

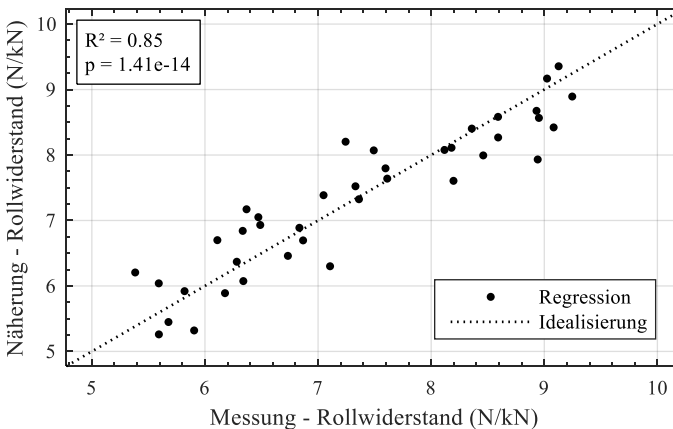


Abbildung 4.3: Mess- und Näherungswerte des Regressionsmodells (Rollwiderstand)

Die absoluten und standardisierten Regressionsparameter sind in Tabelle 4.1 bzw. Tabelle 4.2 zusammengefasst und beziehen sich jeweils auf die Eingangsvariablen in Metern.

Tabelle 4.1: Regressionsparameter (Rollwiderstand)

FTC	a_0	a_1	a_2	a_3
$c_{r,E}$	7,7 E0	-1,2 E1	-2,8 E1	4,6 E1

Tabelle 4.2: Standardisierte Regressionsparameter (Rollwiderstand)

FTC	$a_{s,0}$	$a_{s,1}$	$a_{s,2}$	$a_{s,3}$
$c_{r,E}$	-	-0,32	-1,00	1,65

Die Regressionsparameter a_1 und $a_{s,1}$ zeigen eine Abnahme des Rollwiderstandsbeiwerts mit zunehmender Reifenbreite. Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.2.1.3 ist dies auf den kürzeren Latsch breiter Reifen und die damit verbundene Verringerung der Einlaufwinkel sowie die insgesamt geringere Vertikalverformung des Reifens zurückzuführen. Das Regressionsmodell deutet darüber hinaus auf eine Abnahme des Rollwiderstands mit zunehmender Flankenhöhe hin (a_2 , $a_{s,2}$, a_3 , $a_{s,3}$). Demzufolge führen die Senkung des Felgendurchmessers bei konstantem Reifenaußendurchmesser sowie die Erhöhung des Reifenaußendurchmessers bei konstantem Felgendurchmesser jeweils zu einer Reduzierung des Rollwiderstands. Nach Kapitel 2.2.1.3 ist dieser Zusammenhang auf die geringere relative Verformung der Reifenflanke zurückzuführen. Die Vergrößerung des Reifenaußendurchmessers bei konstanter Flankenhöhe (a_2 , $a_{s,2}$, a_3 , $a_{s,3}$) ist innerhalb des Regressionsmodells hingegen mit einer Zunahme des Rollwiderstandsbeiwerts verbunden, indem der Betrag von a_3 größer als Betrag von a_2 ist. Damit besteht ein Widerspruch zu den physikalischen

Erläuterungen in Kapitel 2.2.1.3, wonach der größere Außendurchmesser zu einer geringeren Vertikalverformung und damit zu einer Abnahme der Walkarbeit führen sollte. Ein möglicher Grund für die Zunahme des Rollwiderstands innerhalb des Regressionsmodells könnten geringere Betriebstemperaturen von Reifen mit großem Außendurchmesser während der Rollwiderstandsmessung sein. In Folge des größeren Abrollumfangs nimmt hierbei die Frequenz der vertikalen Anregung ab, wodurch die Abkühlphasen nach Durchlaufen des Reifenlatsches verlängert werden. Ein weiterer Beitrag zur Senkung der Betriebstemperatur beruht auf der geringeren Vertikalverformung bei großen Außendurchmessern des Reifens. Die Abnahme Reifentemperatur führt wiederum zu einer stärkeren Dämpfung des Reifengummis und damit zu einer Zunahme der Walkarbeit. Ein Widerspruch zu dieser Annahme ergibt sich hingegen aus der Tatsache, dass der Rollwiderstand von Reifen mit größerem Außendurchmesser bei höheren Radlasten ermittelt wird, was wiederum mit einer Erhöhung der Reifentemperatur während der Messung einhergeht. Dies würde zu einer Kompensation des zuvor genannten Effekts führen. Eine weitere, mögliche Ursache für die Erhöhung des Rollwiderstands bei Vergrößerung des Reifenaußendurchmessers könnte jedoch auf den erhöhten Anforderungen an große Reifen hinsichtlich ihrer mechanischen Belastbarkeit Reifen beruhen. Üblicherweise kommen Reifen mit größerem Außendurchmesser bei leistungsfähigeren und schwereren Fahrzeugen zum Einsatz, was mit höheren Längs- und Seitenkräften im Fahrbetrieb verbunden ist. Zur Sicherstellung der erforderlichen mechanischen Belastbarkeit sind Reifenkonstruktionen mit erhöhtem Materialaufwand erforderlich, welche wiederum nachteilige Auswirkungen auf die jeweiligen Walkverluste haben.

4.1.3 Näherung durch KNN

Zur Näherung des Rollwiderstandsbeiwerts $c_{r,E}$ auf horizontaler Fahrbahn wird, basierend auf den Erläuterungen in Kapitel 3.2, ein vorwärtsgerichtetes KNN mit einem Neuron verwendet. Zum Training des KNN werden die gleichen Eingangsvariablen und Messdaten wie bei der Regressionsanalyse verwendet. Der Anlernprozess erfolgt dabei in 1000 Iterationen, wobei 80 Prozent der Datenbasis

als Trainingsdaten und jeweils 10 Prozent als Test- und Validierungsdaten genutzt werden. Die Verteilungen der zugehörigen Bestimmtheitsmaße sind in Abbildung 4.4 bis Abbildung 4.6 dargestellt.

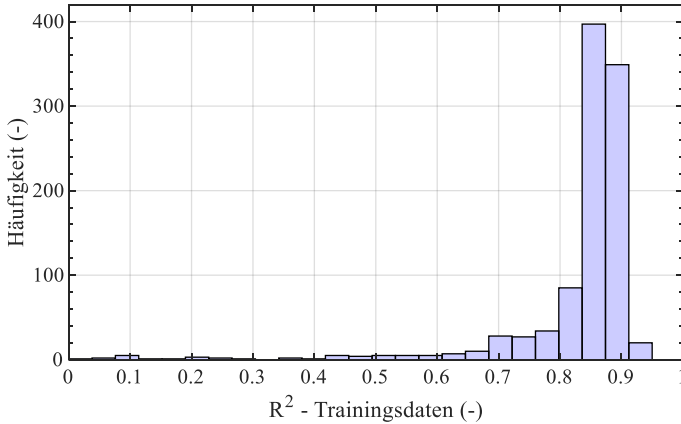


Abbildung 4.4: Bestimmtheitsmaße der Trainingsdaten (Rollwiderstand)

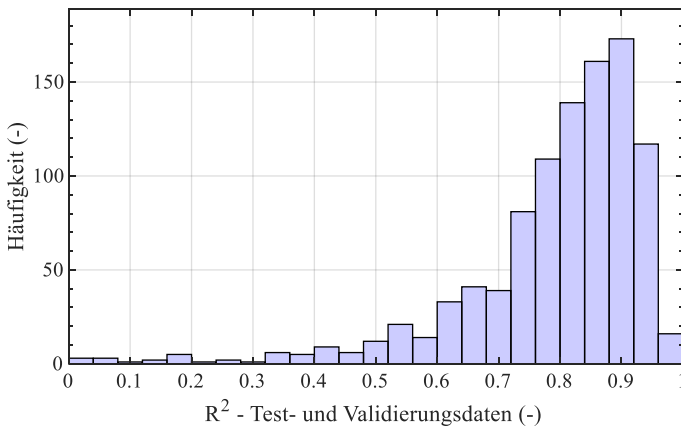


Abbildung 4.5: Bestimmtheitsmaße der Test- und Validierungsdaten (Rollwiderstand)

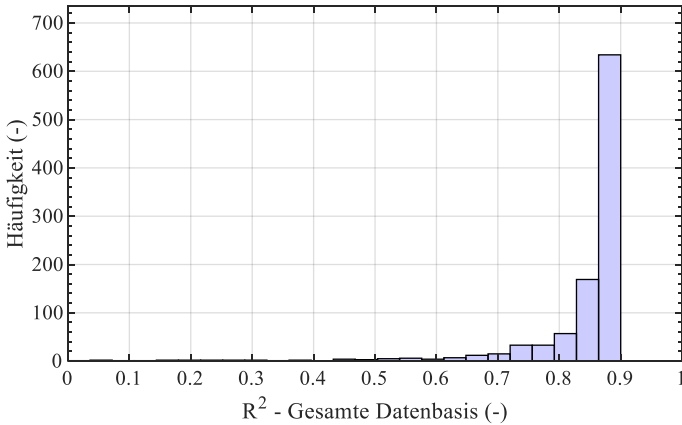


Abbildung 4.6: Bestimmtheitsmaße der gesamten Datenbasis (Rollwiderstand)

Die Histogramme verdeutlichen, dass die unterschiedlichen Konfigurationen von Trainings-, Test- und Validierungsdaten zu Streuungen der Näherungsgüte führen. Insbesondere im Falle der Test- und Validierungsdaten werden die Messdaten vereinzelt nur unzureichend durch das KNN abgebildet. Bei der überwiegenden Anzahl an Konfigurationen belegen die Histogramme jedoch eine hohe Näherungsgüte. Zur Näherung des Rollwiderstandsbeiwerts $c_{r,E}$ auf horizontaler Fahrbahn wird im Folgenden jenes KNN ausgewählt, dessen Bestimmtheitsmaße die geringste Abweichung von den jeweiligen Bestimmtheitsmaßen mit den höchsten Auftretenswahrscheinlichkeiten aufweisen (siehe Kapitel 3.2). Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst.

Tabelle 4.3: Bestimmtheitsmaße des KNN (Rollwiderstand)

FTC	R^2_{tr}	$R^2_{t,v}$	R^2
$c_{r,E}$	0,87	0,88	0,88

In Abbildung 4.7 sind die durch des KNN genäherten Rollwiderstandsbeiwerte den zugehörigen Messwerten gegenübergestellt. Die hohe Näherungsgüte wird dabei durch die geringe Streuung der Datenpunkte um die idealisierte Näherungsgerade bestätigt.

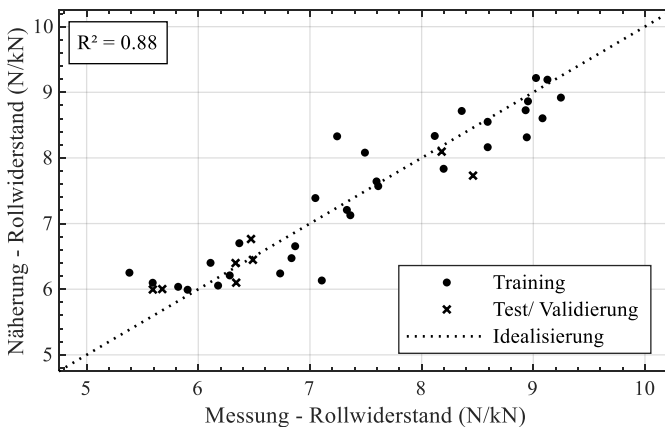


Abbildung 4.7: Mess- und Näherungswerte des KNN (Rollwiderstand)

4.1.4 Analyse der Streubereiche

Zur Quantifizierung der Streuungen durch unterschiedliche Gummimischungen und Reifenkonstruktionen wird für jeden Reifen die prozentuale Abweichung des Rollwiderstandsbeiwerts vom jeweiligen mittleren Rollwiderstandsbeiwert aller

Reifen der identischen Dimension ausgewertet (siehe Kapitel 3.2). Das zugehörige Histogramm ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

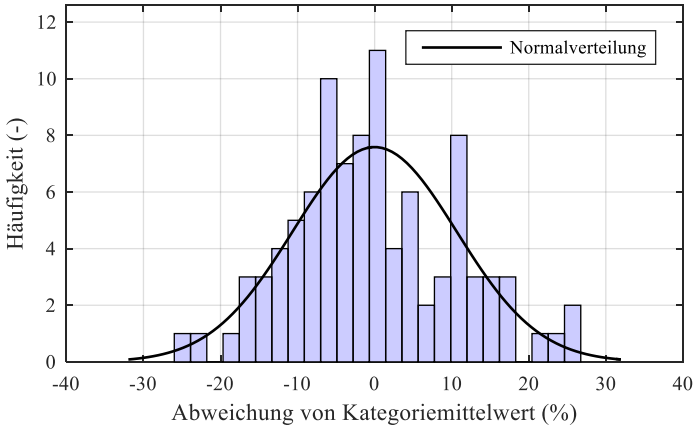


Abbildung 4.8: Streuungshistogramm des Rollwiderstandsbeiwerts

Aus dem Histogramm ist ersichtlich, dass die Werte des Rollwiderstandsbeiwerts näherungsweise entsprechend der Normalverteilung nach Gauß um die zugehörigen Kategoriemittelwerte streuen. In Tabelle 4.4 ist das prozentuale Streuintervall $[x_u, x_o]$ entsprechend der Auftretenswahrscheinlichkeit $\Phi(x_u, x_o)$ nach $2 \cdot \sigma_\varphi$ angegeben.

Tabelle 4.4: Streuintervall des Rollwiderstandsbeiwerts ($2 \cdot \sigma_\varphi$)

FTC	x_u	x_o	$\Phi(x_u, x_o)$
$c_{r,E}$	-21,30 %	21,30 %	95,45 %

Das Streuintervall des Rollwiderstandsbeiwerts ist im Verhältnis zu den Streuungen anderer FTC dieser Arbeit sehr groß. In Kapitel 2.2.1.1 wird deutlich, dass der Rollwiderstand in erster Linie durch die dämpfenden Eigenschaften des Reifens hervorgerufen wird. Entsprechend werden durch den Einsatz unterschiedlicher Reifenkonstruktionen und Gummimischungen innerhalb der einzelnen Dimensionen von Rad und Reifen erhebliche Veränderungen des Rollwiderstandsbeiwerts hervorgerufen.

4.2 Fazit

Bei der statistischen Analyse des Rollwiderstandsbeiwerts $c_{r,E}$ anhand der Dimensionen von Rad und Reifen weisen sowohl das Regressionsmodell wie auch das KNN eine hohe Näherungsgüte auf. Der geringe Unterschied zwischen dem Bestimmtheitsmaß von 0,85 der multiplen linearen Regression erster Ordnung und dem Bestimmtheitsmaß von 0,88 des KNN deutet darauf hin, dass keine Abhängigkeiten höherer Ordnung vorliegen und der lineare Ansatz zur Näherung des Rollwiderstandsbeiwerts ausreicht.

Der physikalischen Interpretation der Regressionsparameter zufolge haben breite Reifen mit hohen Flanken grundsätzlich vorteilhafte Auswirkungen auf den Rollwiderstandsbeiwert. Die Erhöhung des Reifenaußendurchmessers bei konstanter Flankenhöhe führt innerhalb des Regressionsmodells hingegen zu einer Erhöhung des Rollwiderstandsbeiwerts.

Das Streuintervall des Rollwiderstandsbeiwerts innerhalb der einzelnen Kombinationen aus Rad- und Reifendimension ist gegenüber den Variationsbereichen anderer FTC vergleichsweise groß. Dies ist auf den erheblichen Einfluss der verwendeten Gummimischung und Reifenkonstruktion auf die beim Abrollen des Reifens vorliegenden Dämpfungskräfte (siehe Kapitel 2.2.1.1) zurückzuführen.

5 Fahrdynamik

Innerhalb dieses Kapitels werden die Einflüsse der Rad- und Reifendimension, der Radlast sowie des Reifenfülldrucks auf die fahrdynamisch relevanten FTC (siehe Kapitel 2.3) anhand der Methodik aus Kapitel 3.2 analysiert.

Als Grundlage zur statistischen Auswertung dienen die Messdaten des in Kapitel 2.3.2 erläuterten Flachbahnprüfstands. Je nach thematischer Zugehörigkeit der FTC (Vertikal-, Quer-, Längsdynamik, Lenkkräfte, Spurrillenverhalten) variieren sowohl die Anzahl der verfügbaren Messdaten wie auch die Stützstellen der untersuchten Einflussparameter. Auf eine separate Darstellung aller einzelnen Datenbasen wird aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet und jeweils auf die Diagramme im Anhang verwiesen.

Der zur Quantifizierung der vorliegenden Wirkzusammenhänge verwendete Regressionsansatz beruht auf den in Kapitel 2.3 erläuterten physikalischen Grundlagen und wird einmalig in Kapitel 5.1.2 erläutert. Auf eine erneute Aufführung innerhalb der weiteren Unterkapitel wird, ebenfalls aus Gründen der Übersichtlichkeit, verzichtet.

5.1 Vertikaldynamik

Im Folgenden werden die Auswirkungen der Dimensionen von Rad und Reifen sowie der Betriebsbedingungen auf die quasistatische Vertikalsteifigkeit $c_{R,z}$ (siehe Kapitel 2.3.3.1) untersucht.

5.1.1 Datenbasis

Zur Analyse werden die Ergebnisse von insgesamt 486 Messungen unterschiedlicher Rad- und Reifendimensionen bei jeweils mehreren Radlasten und Fülldrücken herangezogen. Ebenso wie bei der Auswertung des Rollwiderstands (siehe

Kapitel 4.1) werden ausschließlich Sommerreifen ohne Notlaufeigenschaften betrachtet, welche bei Fahrzeugen mit einem Produktionsbeginn (SOP) ab dem Jahr 2013 zum Einsatz kommen. Die Stützstellen der Datenbasis hinsichtlich Reifenbreiten, Querschnittsverhältnissen, Felgendurchmessern und Maulweiten sind in Abbildung 5.1 und Abbildung 5.2 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Datenbasis einen weiten Dimensionsbereich unterschiedlichster Fahrzeugkonzepte beinhaltet.

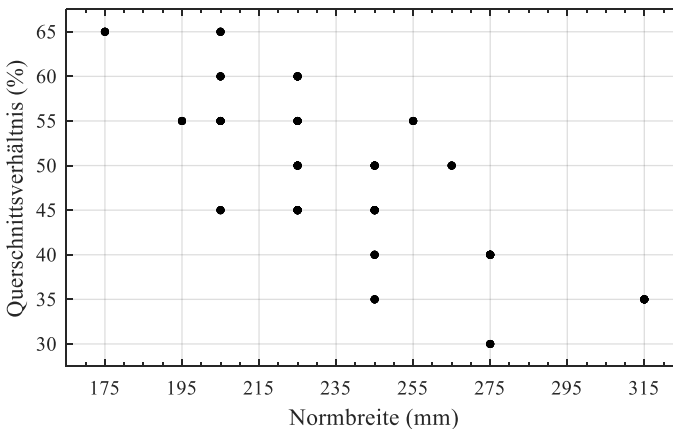


Abbildung 5.1: Reifenbreiten und Querschnittsverhältnisse der Datenbasis (Vertikalsteifigkeit)

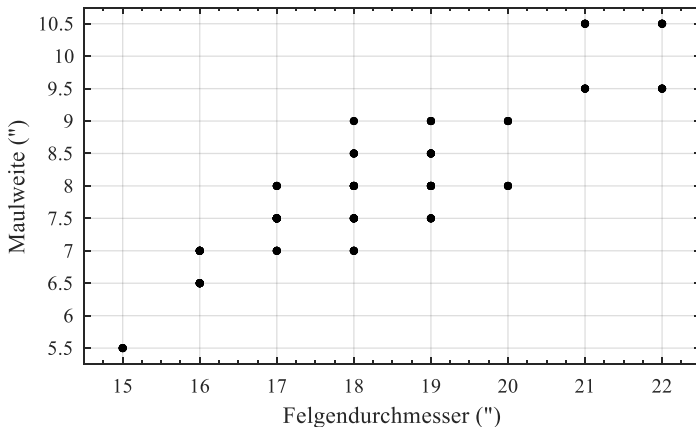


Abbildung 5.2: Felgendurchmesser und Maulweiten der Datenbasis (Vertikalsteifigkeit)

Wie in Kapitel 2.3.3.1 erläutert, wird die im Rahmen der vorliegenden Arbeit betrachtete quasistatische Vertikalsteifigkeit $c_{R,z}$ bei einer Abrollgeschwindigkeit von 80 km/h am Flachbahnprüfstand ermittelt. Die Stützstellen von Radlast und Reifenfülldruck der verwendeten Datenbasis sind in Abbildung 5.3 zusammengefasst.

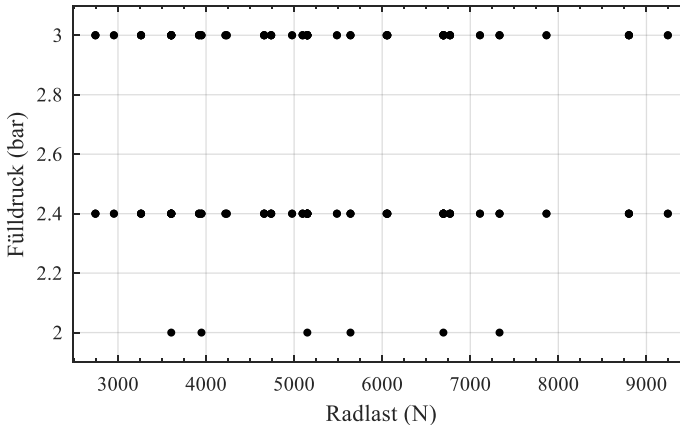


Abbildung 5.3: Radlasten und Fülldrücke der Datenbasis (Vertikalsteifigkeit)

5.1.2 Regressionsanalyse

Um die Einflüsse der Dimensionen von Rad und Reifen sowie der Betriebsbedingungen auf die quasistatische Vertikalsteifigkeit $c_{R,z}$ zu quantifizieren, wird der lineare Regressionsansatz aus Formel (5.1) verwendet. Die enthaltenen Eingangsparameter basieren jeweils auf den physikalischen Erläuterungen in Kapitel 2.3.3.2 und Kapitel 2.3.3.3. Die Größe $B_{R,Q}$ beschreibt dabei die Querschnittsbreite des Reifens nach (The European Tyre and Rim Technical Organisation, 2018) und entspricht der tatsächlichen Breite des Reifens (siehe Kapitel 2.1.3.2). Die Größen D_R bzw. D_F definieren die Außendurchmesser des Reifens bzw. der Felge. Die Differenz der Querschnittsbreite des Reifens zur Felgenmaulweite ist entsprechend Formel (5.2) durch den Parameter $\Delta B_{R,F}$ festgelegt. In Abhängigkeit von $\Delta B_{R,F}$ weist die Seitenwand eine eher ballonförmige oder eine eher trapezförmige Kontur auf. Die Betriebsbedingungen werden durch die Radlast F_z und den Reifenfülldruck p_i innerhalb des Regressionsmodells berücksichtigt.

$$c_{R,Z} = a_0 + a_1 \cdot B_{R,Q} + a_2 \cdot D_R + a_3 \cdot D_F + a_4 \cdot \Delta B_{R,F} + a_5 \cdot F_Z + a_6 \cdot p_i \quad (5.1)$$

$$\Delta B_{R,F} = B_{R,Q} - B_F \quad (5.2)$$

Entsprechend der in Kapitel 3.2 erläuterten Methodik wird innerhalb der einzelnen Kombinationen unterschiedlicher Dimensionen, Radlasten und Fülldrücke jeweils der Mittelwert aller Messwerte zur multiplen Regression herangezogen. Auf diese Weise wird die statistische Gewichtung von Kombinationen mit einer hohen Anzahl an Messwerten vermieden. In Abbildung 5.4 sind die anhand des Regressionsmodells berechneten Werte der Vertikalsteifigkeit den zugehörigen Messwerten gegenübergestellt. Sowohl das Bestimmtheitsmaß von 0,89 wie auch die geringe Streuung der Datenpunkte um die Idealisierung belegen dabei eine hohe Modellgüte.

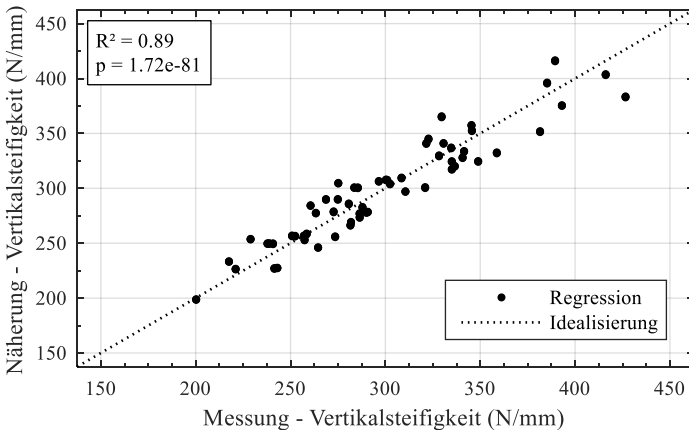


Abbildung 5.4: Mess- und Näherungswerte des Regressionsmodells (Vertikalsteifigkeit)

In Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2 sind die absoluten und standardisierten Regressionsparameter bezüglich der verwendeten Eingangsparameter in Metern, Newton bzw. bar aufgelistet.

Tabelle 5.1: Regressionsparameter (Vertikalsteifigkeit)

FTC	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
$c_{R,z}$	-2,6 E2	5,8 E2	-1,6 E2	6,5 E2	-1,0 E2	2,3 E-4	8,5 E-4

Tabelle 5.2: Standardisierte Regressionsparameter (Vertikalsteifigkeit)

FTC	$a_{s,0}$	$a_{s,1}$	$a_{s,2}$	$a_{s,3}$	$a_{s,4}$	$a_{s,5}$	$a_{s,6}$
$c_{R,z}$	-	0,35	-0,14	0,59	-0,02	0,01	0,55

Die Erhöhung der Reifenbreite führt innerhalb der multiplen linearen Regression zu einer Zunahme der Vertikalsteifigkeit (a_1 , $a_{s,1}$). Dieser Zusammenhang ist durch die größere Reifenaufstandsfläche bei einer bestimmten Vertikaleinfederung zu begründen und entspricht damit den physikalischen Erwartungen nach Kapitel 2.3.3.2. Sowohl die Erhöhung des Reifenaußendurchmessers bei konstantem Felgendurchmesser (a_2 , $a_{s,2}$) wie auch die Verringerung des Felgendurchmessers bei gleichbleibendem Außendurchmesser des Reifens (a_3 , $a_{s,3}$) sind mit einer starken Abnahme der Vertikalsteifigkeit verbunden. Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.3.3.2 ist dies auf die geringere Struktursteifigkeit hoher Reifenflanken zurückzuführen. Die Erhöhung des Reifenaußendurchmessers bei konstanter Flankenhöhe (a_2 , $a_{s,2}$, a_3 , $a_{s,3}$) bewirkt hingegen eine Zunahme der vertikalen Reifensteifigkeit, was nach Kapitel 2.3.3.2 auf der Verlängerung des Reifenlatsches bzw. der größeren Reifenaufstandsfläche bei gegebener Vertikalverformung beruht. Die Erhöhung der Felgenmaulweite bei gleichbleibender Reifenbreite (a_4 , $a_{s,4}$) ist innerhalb des Regressionsmodells mit einer leichten Zunahme der Vertikalsteifigkeit verbunden und entspricht damit ebenfalls den physikalischen Erwartungen aus Kapitel 2.3.3.2. Nach Kapitel 2.3.3.3 sind die Auswirkung der Radlast auf die vertikale Reifensteifigkeit äußerst gering, was durch die Regressionsparameter a_5 und $a_{s,5}$ belegt wird. Der Reifenfülldruck ist innerhalb des Regressionsmodells, neben der Flankenhöhe und

der Reifenbreite, hingegen einer der einflussreichsten Parameter (a_6 , $a_{s,6}$), wobei eine positive Korrelation zur vertikalen Reifensteifigkeit besteht. Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.3.3.3 ist dies durch den unmittelbaren Zusammenhang zum Traganteil der Luft zu begründen.

5.1.3 Näherung durch KNN

Zur Berücksichtigung nichtlinearer Zusammenhänge wird, neben der multiplen linearen Regression, ein vorwärtsgerichtetes KNN mit einem Neuron zur Näherung der quasistatischen Vertikalsteifigkeit $c_{R,z}$ verwendet. Der Anlernprozess erfolgt in insgesamt 1000 Iterationen (siehe Kapitel 3.2), wobei die Eingangsvariablen und Messdaten auch in diesem Fall denen des Regressionsmodells entsprechen. Die Bestimmtheitsmaße bezüglich der Test- und Validierungsdaten sind im Histogramm von Abbildung 5.5 dargestellt. Die Streuungen der Bestimmtheitsmaße bezüglich der Trainingsdaten bzw. der gesamten Datenbasis sind deutlich geringer. Auf eine separate Darstellung wird innerhalb dieses Kapitels daher verzichtet und auf Anhang 22 und Anhang 23 verwiesen.

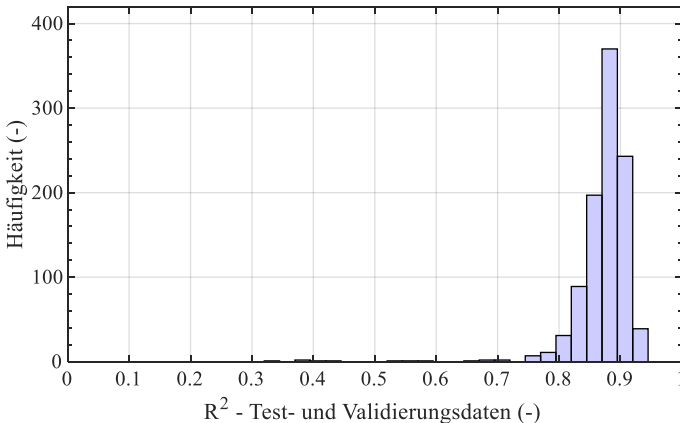


Abbildung 5.5: Bestimmtheitsmaße der Test- und Validierungsdaten (Vertikalsteifigkeit)

Die im Histogramm dargestellten Bestimmtheitsmaße liegen in den meisten Fällen oberhalb von 0,8 und belegen damit eine gute Reproduzierbarkeit des Anlernprozesses sowie eine insgesamt hohe Näherungsgüte. Niedrige Bestimmtheitsmaße in Folge ungünstiger Kombinationen von Trainings-, Test- und Validierungsdaten treten nur selten auf. Tabelle 5.3 zeigt die Bestimmtheitsmaße des KNN mit der geringsten Abweichung zur Konfiguration mit der höchsten Auftretenswahrscheinlichkeit (siehe Kapitel 3.2). Dieses KNN wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit zur Näherung der quasistatischen Vertikalsteifigkeit $c_{R,z}$ verwendet.

Tabelle 5.3: Bestimmtheitsmaße des KNN (Vertikalsteifigkeit)

FTC	R^2_{tr}	$R^2_{t,v}$	R^2
$c_{R,z}$	0,89	0,89	0,89

Die durch das ausgewählte KNN genäherten Werte der vertikalen Reifensteifigkeit sind in Abbildung 5.6 den zugehörigen Messwerten gegenübergestellt. Die Datenpunkte weisen dabei eine geringe Streuung um die idealisierte Näherungsgerade auf, was die auf Basis der hohen Bestimmtheitsmaße zu erwartende Näherungsgüte bestätigt.

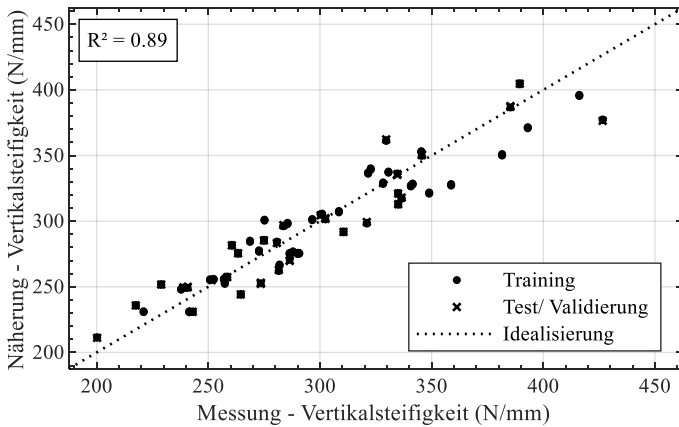


Abbildung 5.6: Mess- und Näherungswerte des KNN (Vertikalsteifigkeit)

5.1.4 Analyse der Streubereiche

Die prozentualen Abweichungen der Messwerte der quasistatischen Vertikalsteifigkeit $c_{R,z}$ von den zugehörigen Kategoriemittelwerten (siehe Kapitel 3.2) sind im Histogramm von Abbildung 5.7 visualisiert.

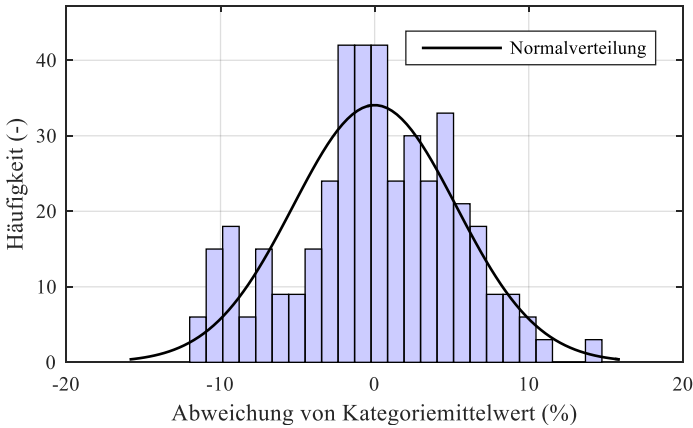


Abbildung 5.7: Streuungshistogramm der Vertikalsteifigkeit

Es wird deutlich, dass die Veränderungen der Vertikalsteifigkeit in Folge unterschiedlicher Gummimischungen und Reifenkonstruktionen näherungsweise normalverteilt um die jeweiligen Kategoriemittelwerte schwanken. Das zur Auftretenswahrscheinlichkeit $\Phi(x_u, x_o)$ nach $2 \cdot \sigma_\varphi$ gehörende prozentuale Streuintervall $[x_u, x_o]$ ist in Tabelle 5.4 angegeben.

Tabelle 5.4: Streuintervall der Vertikalsteifigkeit ($2 \cdot \sigma_\varphi$)

FTC	x_u	x_o	$\Phi(x_u, x_o)$
$c_{R,z}$	-10,60 %	10,60 %	95,45 %

5.2 Querdynamik

In diesem Kapitel werden die Einflüsse der Rad- und Reifendimension, der Radlast und des Fülldrucks auf die Schräglaufsteifigkeit c_α , auf den maximalen Reibwert in Querrichtung $\mu_{y,max}$ sowie auf die Einlauflänge σ_y (siehe Kapitel 2.3.4.1) analysiert.

5.2.1 Datenbasis

Als Datenbasis dienen wiederum Messungen des in Kapitel 2.3.2 vorgestellten Flachbahnprüfstands, welche bei einer Abrollgeschwindigkeit von 40 km/h bzw. 20 km/h im Falle der Einlauflänge durchgeführt werden. Entsprechend der Vorgehensweise vorhergehender Kapitel werden ausschließlich Sommerreifen ohne Notlaufeigenschaften betrachtet, welche bei Fahrzeugen mit einem Produktionsbeginn (SOP) ab 2013 verwendet werden. Im Falle der Schräglaufsteifigkeit c_α und der Einlauflänge σ_y führt dies zu einer Datenbasis mit insgesamt 486 Messwerten. Im Falle des Reibwerts in Querrichtung $\mu_{y,max}$ stehen 313 Messwerte für die Analyse zur Verfügung. Die Stützstellen der jeweiligen Datenbasen sind in Anhang 1 bis Anhang 9 veranschaulicht und repräsentieren einen weiten Bereich unterschiedlicher Dimensionen und Betriebsbedingungen.

5.2.2 Regressionsanalyse

Die vorliegenden Wirkzusammenhänge werden anhand des bereits in Kapitel 5.1.2 eingeführten Regressionsansatzes nach Formel (5.1) quantifiziert. Wie in Kapitel 5 erläutert, wird aus Gründen der Übersichtlichkeit auf eine erneute Detaillierung des Regressionsansatzes verzichtet.

Die durch das jeweilige Regressionsmodell geschätzten Werte der Schräglaufsteifigkeit, des Reibwerts in Querrichtung bzw. der Einlauflänge sind in den Diagrammen von Abbildung 5.8 bis Abbildung 5.10 gegenüber den zugehörigen Messwerten aufgetragen. Die Bestimmtheitsmaße liegen in allen drei Fällen oberhalb von 0,8 und deuten damit auf eine hohe Näherungsgüte hin. Auch die Streuungen der Datenpunkte um die idealisierten Näherungsgeraden sind im

Verhältnis zum gesamten Variationsbereich des jeweiligen FTC gering. Auffällig ist die im unmittelbaren Vergleich geringere Näherungsgüte des Reibwerts in Querrichtung gegenüber den Modellen zur Näherung der Schräglaufsteifigkeit oder der Einlauflänge. Der Reibwert eines Reifens wird in Betriebspunkten mit einem hohen Gleitreibungsanteil ermittelt, bei denen die Eigenschaften der Gummimischung von großer Bedeutung sind. Die Schräglaufsteifigkeit und die Einlauflänge beziehen sich hingegen auf Betriebspunkte mit geringerem Gleitreibungsanteil und sind damit weniger von der Gummimischung als von der Konstruktion und den damit verbundenen Steifigkeiten des Reifens abhängig. Basierend auf dieser Tatsache ist die geringere Näherungsgüte des Reibwerts in Querrichtung durch den von der Reifendimension unabhängigen Einsatz verschiedener Gummimischungen zu begründen. Je nach Priorisierung fahrdynamischer, effizienzbezogener oder komfortrelevanter Fahrzeugeigenschaften kommen unterschiedliche Reifendimensionen und Gummimischungen zum Einsatz.

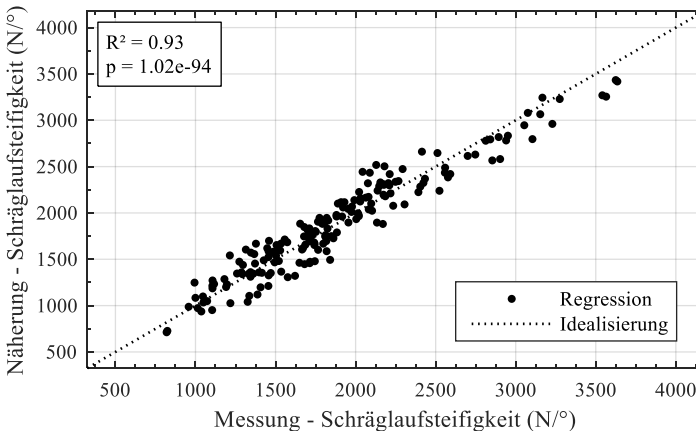


Abbildung 5.8: Mess- und Näherungswerte des Regressionsmodells (Schräglaufsteifigkeit)

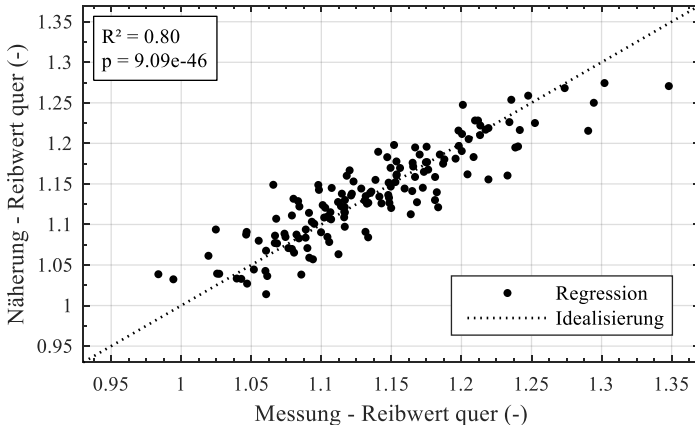


Abbildung 5.9: Mess- und Näherungswerte des Regressionsmodells (Reibwert quer)

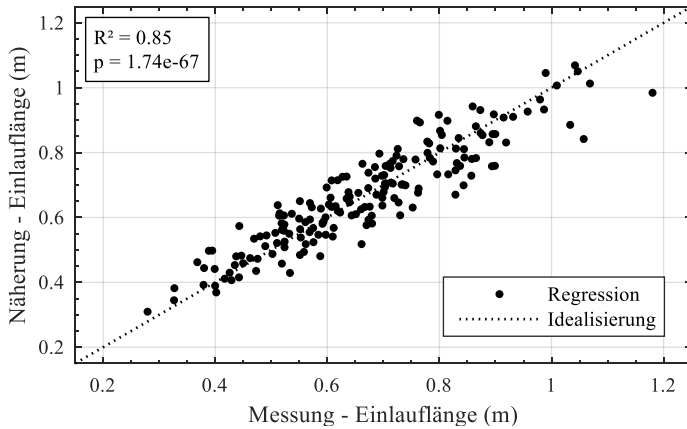


Abbildung 5.10: Mess- und Näherungswerte des Regressionsmodells (Einlaufänge)

Die absoluten und standardisierten Regressionsparameter der Modelle zur Näherung der querdynamischen FTC sind in Tabelle 5.5 und Tabelle 5.6 in zusammengefasst und beziehen sich jeweils auf die Eingangsparameter in Metern, Newton bzw. bar.

Tabelle 5.5: Regressionsparameter (Querdynamik)

FTC	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
c_α	-1,7 E3	4,6 E3	-1,6 E3	5,2 E3	-6,0 E2	2,2 E-1	-2,4 E-4
μ_y	9,5 E-1	1,4 E0	-2,6 E-1	6,6 E-1	-2,5 E0	-2,7 E-5	-1,0 E-7
σ_l	8,2 E-1	-1,3 E-1	2,4 E-1	-5,7 E-1	6,8 E0	7,0 E-5	-2,5 E-6

Tabelle 5.6: Standardisierte Regressionsparameter (Querdynamik)

FTC	$a_{s,0}$	$a_{s,1}$	$a_{s,2}$	$a_{s,3}$	$a_{s,4}$	$a_{s,5}$	$a_{s,6}$
c_α	-	0,24	-0,12	0,40	-0,01	0,62	-0,03
μ_y	-	0,62	-0,19	0,47	-0,32	-0,68	-0,05
σ_l	-	-0,02	0,06	-0,15	0,33	0,67	-0,48

Die Parameter a_1 und $a_{s,1}$ zeigen eine deutliche Zunahme des Reibwerts in Querrichtung bei Erhöhung der Reifenbreite. Gleichzeitig nimmt auch die Schräglauflastigkeit zu, während die Einlaufänge geringfügig abnimmt. Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.3.4.2 sind diese Zusammenhänge durch die höhere Quersteifigkeit, durch die homogenere Druckverteilung in der Latschfläche sowie durch die größere Aufstandsfläche breiter Reifen zu begründen.

Die Erhöhung des Reifenaußendurchmessers bei gleichbleibender Flankenhöhe ($a_2, a_{s,2}, a_3, a_{s,3}$) ist innerhalb der multiplen linearen Regression mit einer Erhöhung der Schräglaufsteifigkeit und des Reibwerts in Querrichtung verbunden. Dieser Zusammenhang lässt sich durch den erhöhten Traganteil der Luft bei großen Außendurchmessern und die damit, bei gleichbleibenden Betriebsbedingungen, einhergehende Vergrößerung der Reifenaufstandsfläche (siehe Kapitel 2.3.3.2) begründen. Darüber hinaus führt die geringere Vertikaleinfederung des Reifens zu einer homogeneren Druckverteilung in der Latschfläche (siehe Kapitel 2.3.4.2). Trotz höherer Schräglaufsteifigkeit, führt die Erhöhung des Reifenaußendurchmessers bei konstanter Flankenhöhe gleichzeitig zu einer leichten Abnahme der Einlauflänge. Unter Berücksichtigung des Zusammenhangs aus Formel (2.26) ist dieser Zusammenhang durch eine gegenüber der Schräglaufsteifigkeit überproportionale Erhöhung der Quersteifigkeit infolge der größeren Reifenaufstandsfläche zu begründen. Eine Verringerung der Flankenhöhe ($a_2, a_{s,2}, a_3, a_{s,3}$) führt innerhalb des Regressionsmodells grundsätzlich zu einer Zunahme der Schräglaufsteifigkeit und des Reibwerts in Querrichtung sowie zu einer Abnahme der Einlauflänge. Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.3.4.2 ist dies durch die höhere Reifensteifigkeit in Querrichtung zu erklären. Dementsprechend führt auch die Erhöhung der Felgenmaulweite bei gleichbleibender Reifenbreite ($a_4, a_{s,4}$) zu einer Zunahme des Reibwerts in Querrichtung sowie zu einer Abnahme der Einlauflänge. Die Auswirkungen der Felgenmaulweite auf die Schräglaufsteifigkeit sind den Regressionsparametern zufolge hingegen äußerst gering. Möglicherweise ist dies auf die höhere Vertikalsteifigkeit bei großen Felgenmaulweiten (siehe 2.3.3.2) und die damit verbundene Verkleinerung der Reifenaufstandsfläche zurückzuführen. Bei Erhöhung der Radlast ($a_5, a_{s,5}$) kommt es zu einer deutlichen Zunahme der Schräglaufsteifigkeit, was nach Kapitel 2.3.4.3 auf der größeren Aufstandsfläche des Reifens basiert. Trotz der größeren Aufstandsfläche nimmt der maximale Reibwert ab, da eine weniger homogene Druckverteilung im Reifenlatsch vorliegt (siehe Kapitel 2.3.4.3). Gleichzeitig ist die Erhöhung der Radlast mit einer höheren Einlauflänge des Reifens verbunden. Dies ist entsprechend Kapitel 2.3.4.3 durch einen überproportionalen Anstieg der Schräglaufsteifigkeit gegenüber der Reifensteifigkeit in Querrichtung zu begründen.

Die Parameter a_6 und $a_{s,6}$ zeigen eine deutliche Abnahme der Einlauflänge bei Erhöhung des Reifenfülldrucks, was nach Kapitel 2.3.4.3 auf die höhere Reifensteifigkeit in Querrichtung bzw. die geringeren Reifenverformungen zum Aufbringen einer bestimmten Seitenkraft zurückzuführen ist. Die Veränderungen der Schräglaufsteifigkeit und des maximalen Reibwerts in Querrichtung sind hingegen äußerst gering. Physikalisch ist dies durch die gegenseitige Kompensation der einerseits kleineren Aufstandsfläche und der andererseits höheren Quersteifigkeit des Reifens begründbar (siehe Kapitel 2.3.4.3). In beiden Fällen deutet das Regressionsmodell jedoch auf eine geringfügige Abnahme der FTC und damit auf einen stärkeren Effekt durch die kleinere Reifenaufstandsfläche hin.

5.2.3 Näherung durch KNN

Ergänzend zu den Regressionsmodellen aus Kapitel 5.2.2 werden die Schräglaufsteifigkeit, der maximale Reibwert in Querrichtung sowie die Einlauflänge zusätzlich anhand von KNN genähert. Die Bestimmtheitsmaße bezüglich Test- und Validierungsdaten der 1000 Anlerniterationen (siehe Kapitel 3.2) sind in den Histogrammen von Abbildung 5.11 bis Abbildung 5.12 dargestellt. Für die entsprechenden Histogramme im Bezug auf die Trainingsdaten bzw. die gesamte Datenbasis sei wiederum auf Anhang 24 bis Anhang 29 verwiesen.

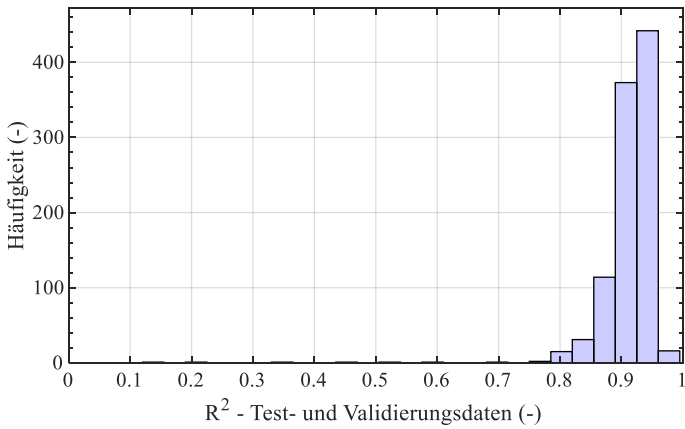


Abbildung 5.11: Bestimmtheitsmaße der Test- und Validierungsdaten (Schräglaufsteifigkeit)

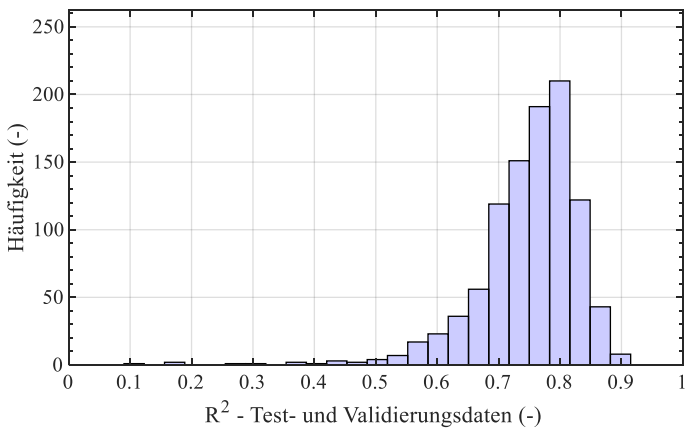


Abbildung 5.12: Bestimmtheitsmaße der Test- und Validierungsdaten (Reibwert quer)

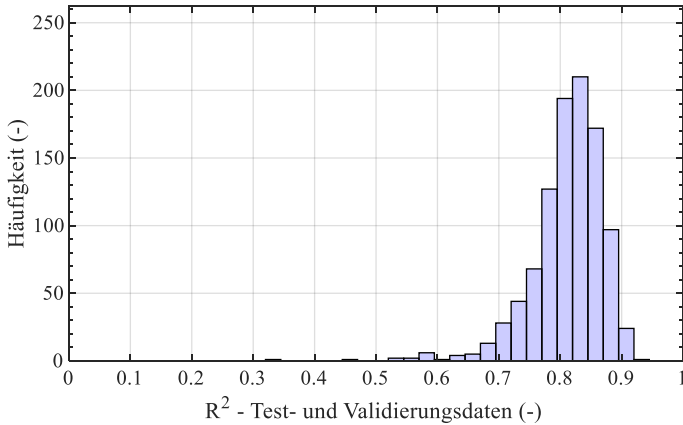


Abbildung 5.13: Bestimmtheitsmaße der Test- und Validierungsdaten (Einlaufänge)

Aus den Histogrammen geht hervor, dass die Datenkombinationen der einzelnen Anlerniterationen mit hoher Wahrscheinlichkeit Bestimmtheitsmaße oberhalb von 0,8 liefern und damit eine hohe Modellgüte zur Näherung der querdynamisch relevanten FTC gewährleisten. Gleichzeitig wird jedoch auch deutlich, dass vereinzelt ungünstige Kombinationen von Trainings-, Test- und Validierungsdaten mit geringen Bestimmtheitsmaßen einhergehen können. Dieser Zusammenhang ist insbesondere im Falle des maximalen Reibwerts in Querrichtung stark ausgeprägt, was auf die kleinere Datenbasis und die insgesamt geringere Abhängigkeit von den gewählten Eingangsparametern (siehe Kapitel 5.2.2) zurückzuführen ist. Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 3.2 werden im Folgenden die KNN mit der geringsten Abweichung zur höchsten Auftretenswahrscheinlichkeit verwendet. Die zugehörigen Bestimmtheitsmaße sind in Tabelle 5.7 zusammengefasst.

Tabelle 5.7: Bestimmtheitsmaße des KNN (Querdynamik)

FTC	R^2_{tr}	$R^2_{t,v}$	R^2
c_α	0,93	0,94	0,93
μ_y	0,80	0,80	0,80
σ_l	0,85	0,82	0,84

In den Diagrammen von Abbildung 5.14 bis Abbildung 5.16 sind die durch die KNN genäherten Werte der Schräglaufsteifigkeit, des maximalen Reibwerts in Querrichtung und der Einlauflänge den jeweiligen Messwerten gegenübergestellt. In allen Fällen liegt eine im Verhältnis zum gesamten Variationsbereich geringe Streuung der Datenpunkte um die ideale Näherungsgerade vor. Ebenso wie bei der in Kapitel 5.2.2 durchgeführten Regressionsanalyse wird der maximale Reibwert in Querrichtung etwas schlechter durch das Näherungsmodell abgebildet als die Schräglaufsteifigkeit und die Einlauflänge. Dieser Zusammenhang lässt sich nach Kapitel 5.2.2 durch die erhöhte Abhängigkeit des Reibwerts von der Gummimischung begründen.

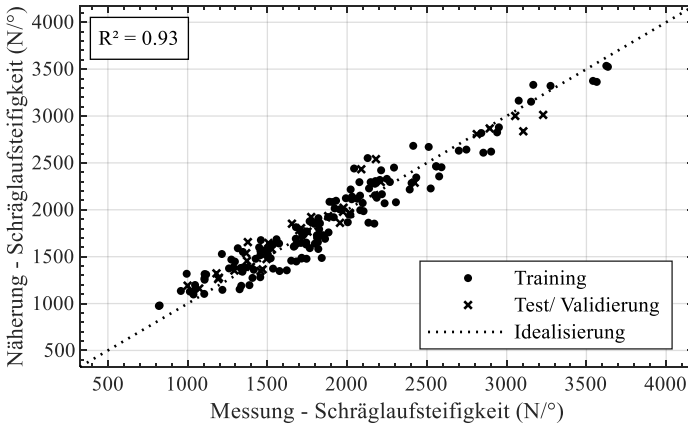


Abbildung 5.14: Mess- und Näherungswerte des KNN (Schräglaufsteifigkeit)

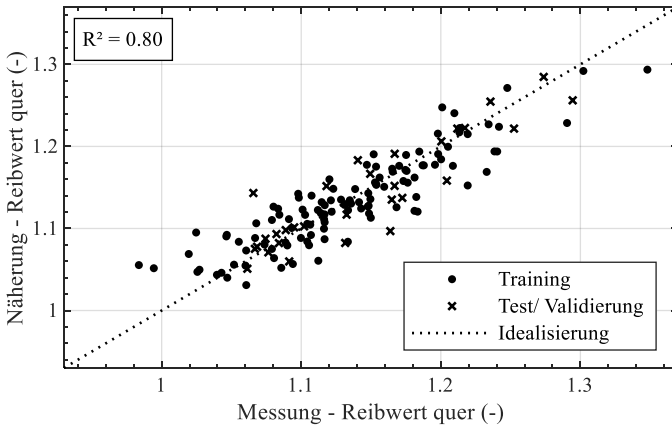


Abbildung 5.15: Mess- und Näherungswerte des KNN (Reibwert quer)

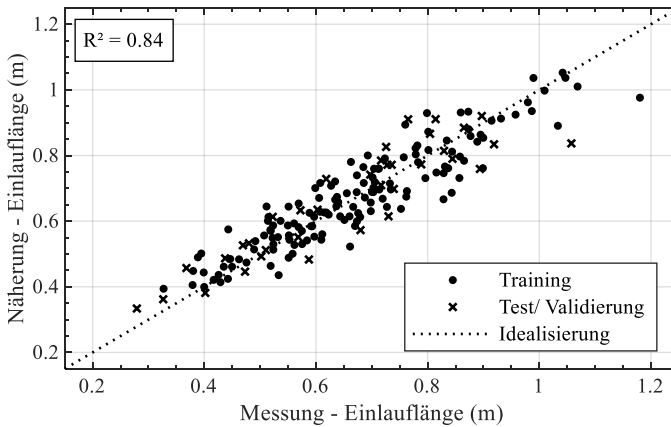


Abbildung 5.16: Mess- und Näherungswerte des KNN (Einlauflänge)

5.2.4 Analyse der Streubereiche

Die Einflüsse unterschiedlicher Reifenkonstruktionen und Gummimischungen auf die Schräglaufsteifigkeit, den maximalen Reibwert in Querrichtung sowie die Einlauflänge werden auf Basis von Abbildung 5.17 bis Abbildung 5.19 analysiert. Die Histogramme beziehen sich dabei jeweils auf die prozentualen Abweichungen der Messwerte von den zugehörigen Kategoriemittelwerten (siehe Kapitel 3.2).

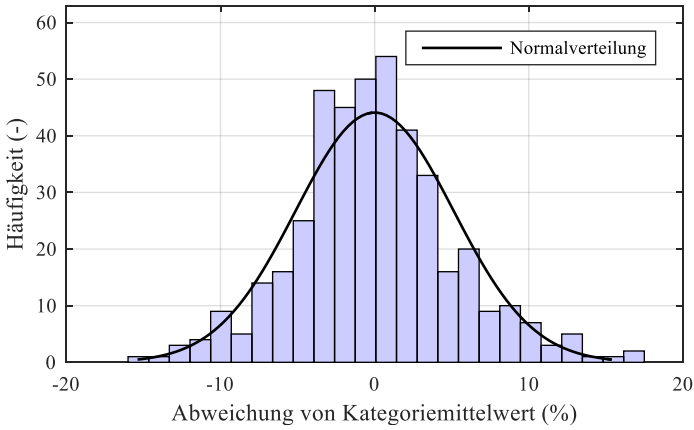


Abbildung 5.17: Streuungshistogramm der Schräglaufsteifigkeit

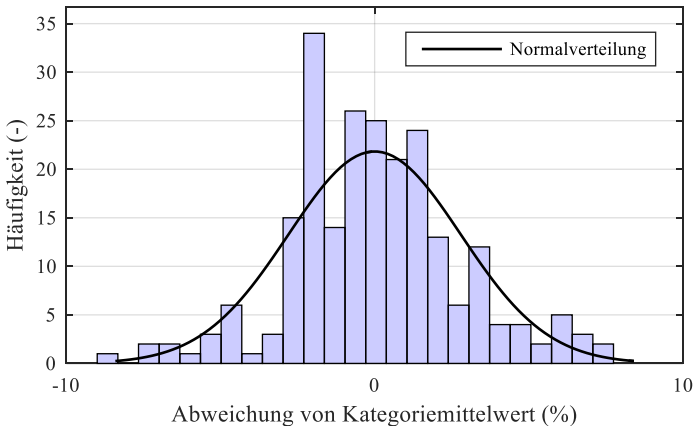


Abbildung 5.18: Streuungshistogramm des Reibwerts in Querrichtung

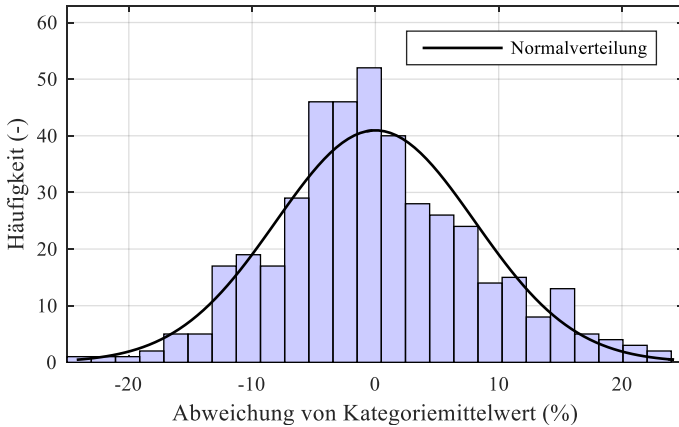


Abbildung 5.19: Streuungshistogramm der Einlaufänge

Die Histogramme zeigen, dass die einzelnen Streuungen um die jeweiligen Kategoriemittelwerte auch im Falle der querdynamischen FTC näherungsweise der Normalverteilung nach Gauß (siehe Kapitel 2.6.5) folgen. Die zugehörigen Streuintervalle $[x_u, x_o]$ bezüglich der Auftretenswahrscheinlichkeit $\Phi(x_u, x_o)$ nach $2 \cdot \sigma_\varphi$ sind in Tabelle 5.8 aufgelistet.

Tabelle 5.8: Streuintervall der querdynamischen FTC ($2 \cdot \sigma_\varphi$)

FTC	x_u	x_o	$\Phi(x_u, x_o)$
c_α	-10,26 %	10,26 %	95,45 %
μ_y	-5,61 %	5,61 %	95,45 %
σ_l	-16,15 %	16,15 %	95,45 %

Die aufgeführten Intervalle verdeutlichen, dass die Streuungen des maximalen Reibwerts in Querrichtung innerhalb der einzelnen Rad- und Reifendimensionen deutlich geringer sind als die Streuungen der Schräglaufsteifigkeit oder der Einlauf­länge. Den Ausführungen in Kapitel 5.2.2 zufolge wird der Reibwert eines Reifens wesentlich durch die Eigenschaften der Gummimischung beeinflusst, während die Schräglaufsteifigkeit und die Einlauf­länge stärker von der Reifen­konstruktion und den damit verbundenen Steifigkeiten abhängig sind. Auf dieser physikalischen Grundlage lassen sich die verschiedenen Streuintervalle durch größere Unterschiede zwischen den verwendeten Reifenkonstruktionen als zwischen den jeweiligen Gummimischungen innerhalb der betrachteten Datenbasis erklären.

5.3 Längsdynamik

Innerhalb der folgenden Kapitel werden die Auswirkungen der Dimensionen von Rad und Reifen sowie der Betriebsbedingungen auf den maximalen Reibwert in Längsrichtung $\mu_{x,max}$ (siehe Kapitel 2.3.5.1) statistisch ausgewertet. Aufgrund der hohen Relevanz für die Fahrsicherheit wird dabei ausschließlich der gebremste Fall betrachtet (vergleiche Kapitel 2.3.5.1).

5.3.1 Datenbasis

Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.3.2 werden die Reibwerte in Längsrichtung $\mu_{x,max}$ bei einer Abrollgeschwindigkeit von 80 km/h am Flachbahnprüfstand ermittelt. Der zur Erzeugung von Längskräften erforderliche Brems­schlupf wird dabei durch einen Elektromotor an der Radnabe aufgebracht, wodurch der Versuchsaufwand vergleichsweise hoch ist. Aus diesem Grund ist die Datenbasis zur Analyse der Reifenkräfte in Längsrichtung mit insgesamt 138 Messwerten deutlich geringer als im Falle der Querkraftmessungen in Kapitel 5.2. Die Auswahl beinhaltet auch hierbei ausschließlich Sommerreifen ohne Not­auf­eigenschaften, welche bei Fahrzeugen mit einem Produktionsbeginn (SOP)

ab 2013 zum Einsatz kommen. Die jeweiligen Stützstellen hinsichtlich Dimensionen und Betriebsbedingungen sind in Anhang 10 bis Anhang 12 veranschaulicht.

5.3.2 Regressionsanalyse

Die Quantifizierung der Einflüsse der Dimensionen von Rad und Reifen, der Radlast sowie des Fülldrucks erfolgt auch im Falle des maximalen Reibwerts in Längsrichtung $\mu_{x,max}$ anhand des in Kapitel 5.1.2 erläuterten Regressionsansatzes nach Formel (5.1).

Abbildung 5.20 zeigt den Vergleich zwischen den Näherungswerten und den zugehörigen Messwerten. Das Bestimmtheitsmaß von 0,89 sowie die im Verhältnis zum gesamten Variationsbereich geringe Streuung der Datenpunkte um die idealisierte Näherungsgerade deuten dabei auf die grundsätzliche Eignung des verwendeten Regressionsmodells zur Näherung des Reibwerts in Längsrichtung hin.

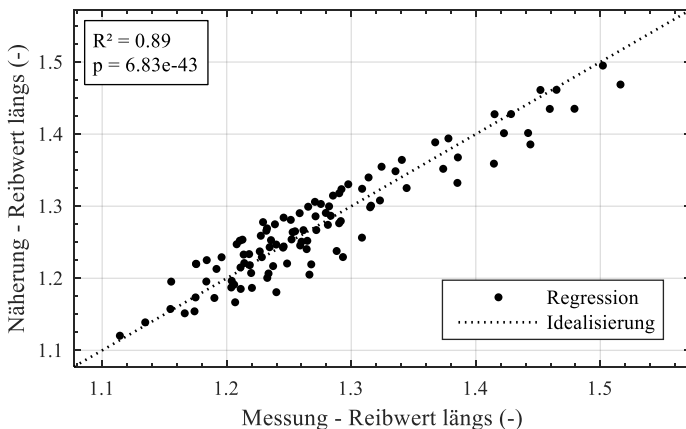


Abbildung 5.20: Mess- und Näherungswerte des Regressionsmodells (Reibwert längs)

Tabelle 5.9 und Tabelle 5.10 zeigen die absoluten und standardisierten Regressionsparameter zur Näherung des maximalen Reibwerts in Längsrichtung. Die Parameter beziehen sich dabei jeweils auf die zugehörigen Eingangsparameter in Metern, Newton bzw. bar.

Tabelle 5.9: Regressionsparameter (Reibwert längs)

FTC	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
$\mu_{x,\max}$	6,1 E-1	1,7 E-1	8,1 E-1	9,5 E-1	-2,9 E0	-1,6 E-5	5,6 E-7

Tabelle 5.10: Standardisierte Regressionsparameter (Reibwert längs)

FTC	$a_{s,0}$	$a_{s,1}$	$a_{s,2}$	$a_{s,3}$	$a_{s,4}$	$a_{s,5}$	$a_{s,6}$
$\mu_{x,\max}$	-	0,06	0,47	0,54	-0,27	-0,31	-0,20

Entsprechend den physikalischen Erwartungen aus Kapitel 2.3.5.2, deuten die Regressionsparameter a_1 und $a_{s,1}$ auf eine geringfügige Zunahme des maximalen Reibwerts in Längsrichtung bei Erhöhung der Reifenbreite hin. Aufgrund des geringeren Traganteils der Reifenflanken und der damit verbundenen Vergrößerung der Reifenaufstandsfläche (siehe Kapitel 2.1.2) erscheint das Ergebnis des Regressionsmodells plausibel. Bei Erhöhung des Reifenaußendurchmessers (a_2 , $a_{s,2}$) kommt es innerhalb des Regressionsmodell grundsätzlich zu einer Zunahme der maximal übertragbaren Kräfte in Längsrichtung. Dieser Zusammenhang entspricht den Erläuterungen in Kapitel 2.3.5.2 und ist auf die geringere Vertikalverformung des Reifens und die damit verbundene Homogenität der Druckverteilung im Reifenlatsch zurückzuführen. Darüber hinaus führt der verringerte Traganteil der Reifenstruktur zu einer Vergrößerung der Reifenaufstandsfläche (siehe Kapitel 2.3.5.2). Im Rahmen vorhergehender Untersuchungen werden keine einheitlichen Aussagen zum Einfluss der Flankenhöhe auf die maximal

übertragbaren Kräfte in Längsrichtung getroffen (siehe Kapitel 2.3.5.2). Innerhalb des Regressionsmodells ist die Erhöhung des Felgendurchmessers bei gleichbleibendem Außendurchmesser des Reifens (a_3 , $a_{s,3}$) hingegen mit einer deutlichen Erhöhung des maximalen Reibwerts in Längsrichtung verbunden. Physikalisch lässt sich dieser Zusammenhang durch die höhere Steifigkeit bzw. die geringere Verformung niedriger Flanken nachvollziehen, wodurch die Latschfläche homogener belastet wird als bei hohen Reifenflanken. Auch die Erhöhung der Felgenmaulweite bei unveränderter Reifenbreite (a_4 , $a_{s,4}$) ist nach dem Ergebnis des Näherungsmodells mit einer Zunahme des maximalen Reibwerts in Längsrichtung verbunden. Entsprechend Kapitel 2.3.4.2, führt die trapezförmige Abstützung des Reifens gegenüber der Felge dabei zu einer Erhöhung der Quersteifigkeit des Reifens. Auch im Falle der Übertragung von Längskräften ist daher von geringeren Verformungen des Reifens und einer homogeneren Belastung der Aufstandsfläche auszugehen. Die Regressionsparameter a_5 und $a_{s,5}$ weisen ein negatives Vorzeichen auf und bilden damit die in 2.3.5.3 beschriebene Degression des maximalen Reibwerts in Längsrichtung über der Radlast ab. Ebenso entsprechen auch die Parameter a_6 und $a_{s,6}$ den physikalischen Erwartungen und zeigen eine Abnahme der maximal übertragbaren Längskräfte bei Erhöhung des Reifenfülldrucks. Nach Kapitel 2.3.5.3 ist dieser Zusammenhang auf die kleinere Reifen aufstandsfläche bei hohen Fülldrücken zurückzuführen.

5.3.3 Näherung durch KNN

Auch im Falle des maximalen Reibwerts in Längsrichtung $\mu_{x,max}$ wird zusätzlich zu den Regressionsmodellen aus Kapitel 5.3.2 ein KNN zur Näherung verwendet. Entsprechend der in Kapitel 3.2 erläuterten Vorgehensweise wird die Reproduzierbarkeit des Anlernprozesses auch hierbei anhand von insgesamt 1000 Anlerniterationen ausgewertet. Die Bestimmtheitsmaße bezüglich der Test- und Validierungsdaten aller 1000 Anlerniterationen sind im Histogramm von Abbildung 5.21 dargestellt.

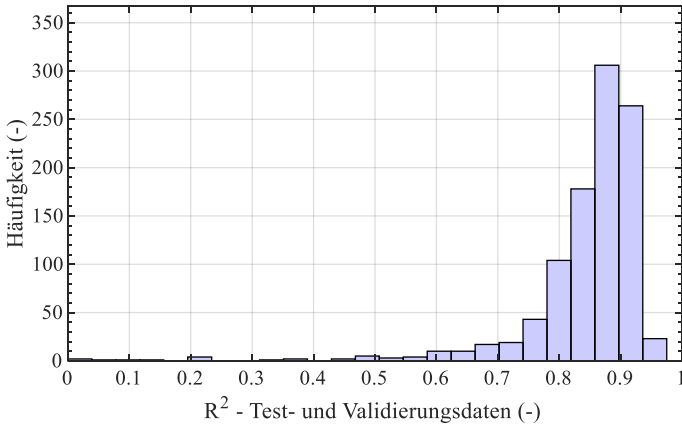


Abbildung 5.21: Bestimmtheitsmaße der Test- und Validierungsdaten (Reibwert längs)

Die Verteilung der Bestimmtheitsmaße zeigt eine große Häufigkeit hoher Bestimmtheitsmaße im Bereich oberhalb von 0,8. Dies deutet auf eine insgesamt hohe Näherungsgüte sowie auf eine gute Reproduzierbarkeit des Anlernprozesses hin. Die jeweiligen Bestimmtheitsmaße im Bezug auf Trainings-, Test- und Validierungsdaten des im weiteren Verlauf der Arbeit verwendeten KNN sind in Tabelle 5.11 zusammengefasst.

Tabelle 5.11: Bestimmtheitsmaße des KNN (Reibwert längs)

FTC	R^2_{tr}	$R^2_{t,v}$	R^2
$\mu_{x,max}$	0,90	0,90	0,90

In Abbildung 5.22 sind die anhand des KNN berechneten Werte des maximalen Reibwerts in Längsrichtung den zugehörigen Messwerten gegenübergestellt. Wie bereits im Falle des Regressionsmodells aus Kapitel 5.3.2 ist die Streuung

der Datenpunkte um die Idealisierung im Verhältnis zum gesamten Variationsbereich des FTC gering, was eine hohe Näherungsgüte belegt.

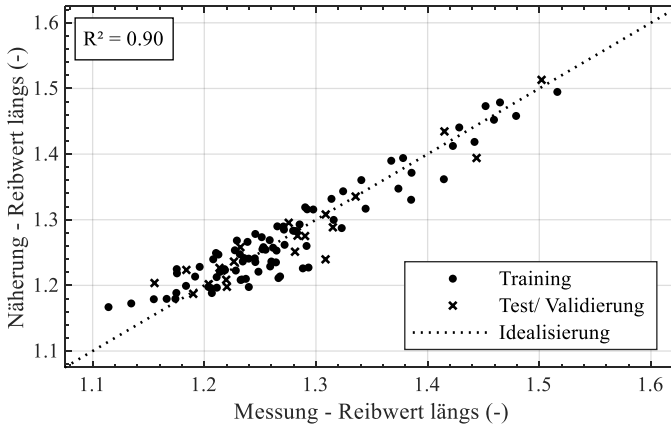


Abbildung 5.22: Mess- und Näherungswerte des KNN (Reibwert längs)

5.3.4 Analyse der Streubereiche

Im Histogramm von Abbildung 5.23 sind die prozentualen Abweichungen der gemessenen maximalen Reibwerte in Längsrichtung gegenüber den entsprechenden Kategoriemittelwerten (siehe Kapitel 3.2) dargestellt.

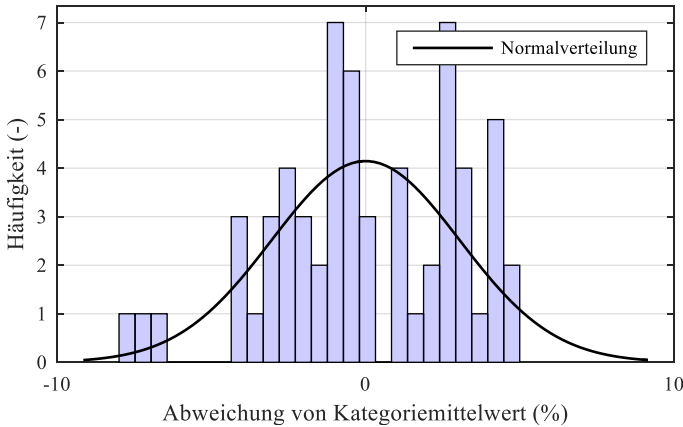


Abbildung 5.23: Streuungshistogramm des Reibwerts in Längsrichtung

Im Histogramm wird deutlich, dass die Anzahl an Kategorien mit mehreren Messwerten sehr gering ist, weshalb keine Übereinstimmung mit der Normalverteilung nach Gauß erkennbar ist. Dennoch ist ersichtlich, dass die Auftretenswahrscheinlichkeit um die Nulllage größer ist als in den äußeren Bereichen mit großen Abweichungen von den mittleren Messwerten einer Kategorie. Aufgrund der Tatsache, dass bei allen anderen FTC dieser Arbeit ein näherungsweise normalverteilter Verlauf vorliegt, wird im Folgenden auch für den maximalen Reibwert in Längsrichtung eine Normalverteilung des Streubereichs angenommen. Die Streuintervalle $[x_u, x_o]$ zur Auftretenswahrscheinlichkeit $\Phi(x_u, x_o)$ nach $2 \cdot \sigma_\varphi$ ergeben sich damit zu den Werten aus Tabelle 5.12.

Tabelle 5.12: Streuintervall des Reibwerts in Längsrichtung ($2 \cdot \sigma_\varphi$)

FTC	x_u	x_o	$\Phi(x_u, x_o)$
$\mu_{x,max}$	-6,11 %	6,11 %	95,45 %

Das Streuintervall des maximalen Reibwerts in Längsrichtung ist im Vergleich zu den Bereichen anderer FTC sehr gering. Bei der Analyse der querdynamisch relevanten FTC in Kapitel 5.2.4 werden innerhalb der betrachteten Datenbasis größere Unterschiede zwischen den einzelnen Reifenkonstruktionen als zwischen den Gummimischungen vermutet. Ebenso ist davon auszugehen, dass der maximale Reibwert in Längsrichtung sehr stark von der Gummimischung anhängig ist. Die geringe Streuung des maximalen Reibwerts in Längsrichtung ist damit ein weiteres Indiz für geringe Unterschiede zwischen den verschiedenen Gummimischungen innerhalb der herangezogenen Datenbasis und stützt damit die Annahme aus Kapitel 5.2.4.

5.4 Lenkungskräfte

In diesem Kapitel werden die Einflüsse der Dimensionen von Rad und Reifen sowie der Betriebsbedingungen auf die Aligning Stiffness A_α und auf das radlastnormierte Bohrmoment $M_{B,n}$ analysiert.

5.4.1 Datenbasis

Zur Analyse der für die Lenkungskräfte relevanten FTC liegen jeweils unterschiedliche Datenbasen vor. In beiden Fällen werden ausschließlich Sommerreifen ohne Notlaufeigenschaften betrachtet, welche bei Fahrzeugen mit einem Produktionsbeginn (SOP) ab 2013 zum Einsatz kommen. Dabei beinhaltet die Datenbasis der Aligning Stiffness A_α die gleichen Messungen wie die querdynamisch relevanten FTC aus Kapitel 5.2.1. Die Stützstellen hinsichtlich Rad- und Reifendimensionen, Radlasten und Fülldrücken der insgesamt 486 Messwerte sind in Anhang 13 bis Anhang 15 visualisiert. Die Datenbasis des radlastbezogenen Bohrmoments $M_{B,n}$ ist mit 327 verfügbaren Messwerten etwas geringer. Aus Anhang 16 bis Anhang 18 geht jedoch hervor, dass dennoch ein weiter Bereich unterschiedlicher Rad- und Reifendimensionen repräsentiert wird.

5.4.2 Regressionsanalyse

Auch im Falle der für die Lenkungskräfte relevanten FTC wird der bereits in Kapitel 5.1.2 erläuterte Regressionsansatz nach Formel (5.1) zur Quantifizierung der Wirkzusammenhänge verwendet.

In Abbildung 5.24 und Abbildung 5.25 sind die Näherungswerte der Alignment Stiffness bzw. des radlastbezogenen Bohrmoments gegenüber den zugehörigen Messwerten aufgetragen. In beiden Fällen liegt eine hohe Näherungsgüte des Regressionsmodells vor, was sowohl aus der geringen Streuung der Datenpunkte um die Idealisierung wie auch aus den hohen Bestimmtheitsmaßen von 0,91 bzw. 0,89 hervorgeht. In Abbildung 5.24 ist ein leicht gekrümmter Verlauf der Datenpunkte erkennbar. Dies ist auf das Vorliegen nichtlinearer Zusammenhänge zurückzuführen, welche durch den linearen Regressionsansatz erster Ordnung nicht abgebildet werden. Effekte höherer Ordnung werden, entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 3.2, durch die zusätzliche Verwendung von KNN berücksichtigt.

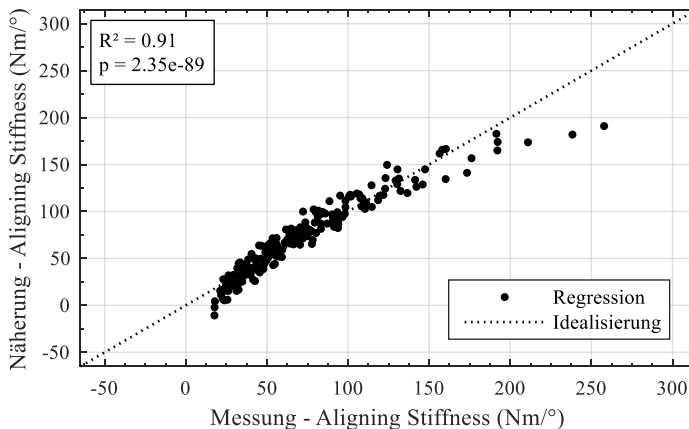


Abbildung 5.24: Mess- und Näherungswerte des Regressionsmodells (Aligning Stiffness)

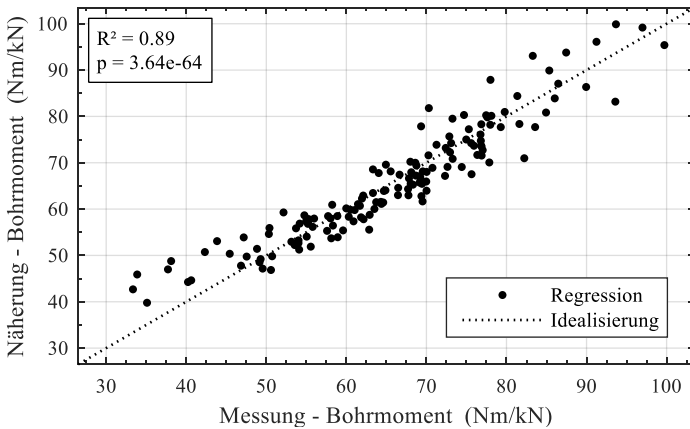


Abbildung 5.25: Mess- und Näherungswerte des Regressionsmodells (Bohrmoment)

Die absoluten und standardisierten Regressionsparameter der Modelle zur Näherung der Aligning Stiffness und des radlastbezogenen Bohrmoments sind in Tabelle 5.13 und Tabelle 5.14 zusammengefasst.

Tabelle 5.13: Regressionsparameter (Lenkungskräfte)

FTC	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
A_α	1,2 E1	3,2 E2	-1,3 E2	7,7 E1	-3,1 E2	2,3 E-2	-2,8 E-4
$M_{B,n}$	3,7 E1	5,9 E1	-4,9 E-1	4,5 E1	-2,5 E2	6,0 E-3	-1,0 E-4

Tabelle 5.14: Standardisierte Regressionsparameter (Lenkungskräfte)

FTC	$a_{s,0}$	$a_{s,1}$	$a_{s,2}$	$a_{s,3}$	$a_{s,4}$	$a_{s,5}$	$a_{s,6}$
A_α	-	0,22	-0,13	0,08	-0,06	0,86	-0,20
$M_{B,n}$	-	0,13	0,00	0,16	-0,16	0,75	-0,23

Den Regressionsparametern a_1 und $a_{s,1}$ zufolge, kommt es bei Erhöhung der Reifenbreite zu einer Zunahme der Aligning Stiffness. Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.3.6.2 ist dies auf die höhere Schräglaufsteifigkeit breiter Reifen (siehe Kapitel 5.2.2) zurückzuführen, wodurch die Effekte des kürzeren Reifenlatsches überkompensiert werden. Auch das auf die Radlast bezogene Bohrmoment nimmt innerhalb des Regressionsmodells mit steigender Reifenbreite zu, was mit den Beobachtungen in vergangenen Arbeiten übereinstimmt (siehe Kapitel 2.3.6.2). Die Erhöhung der Reifenflanke (a_2 , $a_{s,2}$, a_3 , $a_{s,3}$) führt grundsätzlich zu einer leichten Abnahme der Aligning Stiffness, was nach Kapitel 2.3.6.2 auf die niedrigere Schräglaufsteifigkeit bei hohen Reifenflanken zurückzuführen ist. Auch das radlastbezogene Bohrmoment nimmt bei Erhöhung der Reifenflanke unter gleichbleibendem Reifenaußendurchmesser (a_3 , $a_{s,3}$) ab. Dieser Zusammenhang deckt sich ebenfalls mit den Erwartungen aus Kapitel 2.3.6.2, wobei die stärkeren Reifenverformungen bzw. die weniger homogene Bodendruckverteilung beim Rotieren im Stand als Ursache vermutet werden. Bei Erhöhung der Reifenflanke durch Vergrößerung des Reifenaußendurchmessers (a_3 , $a_{s,3}$) bleibt das radlastbezogene Bohrmoment hingegen annähernd unverändert, obwohl die stärkeren Reifenverformungen auch hierbei zu einer weniger homogenen Bodendruckverteilung beim Rotieren im Stand führen. Entsprechend den physikalischen Erläuterungen aus Kapitel 2.1.2 ist der größere Reifenaußendurchmesser jedoch auch mit einer geringeren vertikalen Einfederung bzw. mit einem geringeren Traganteil der Reifenflanken verbunden. Infolge der damit einhergehenden Vergrößerung der Reifenaufstandsfläche wird die durch die höhere Reifenflanke hervorgerufene Abnahme des Bohrmoments wiederum kompensiert. Aufgrund der höheren Quersteifigkeit des Reifens (siehe Kapitel 2.3.4.2)

erscheint auch die geringfügige Zunahme der Aligning Stiffness bzw. des radlastbezogenen Bohrmoments bei Erhöhung der Felgenmaulweite (a_4 , $a_{s,4}$) plausibel. Die Radlast ist innerhalb der multiplen linearen Regression der stärkste Einflussparameter hinsichtlich Aligning Stiffness und radlastbezogenem Bohrmoment. Demnach führt die Erhöhung der Radlast (a_5 , $a_{s,5}$) zu einer deutlichen Zunahme der Aligning Stiffness, was nach Kapitel 2.3.6.3 durch den größeren pneumatischen Nachlauf sowie die höhere Schräglaufsteifigkeit zu begründen ist. Gleichzeitig kommt es wegen der größeren Reifenaufstandsfläche zu einem deutlichen Anstieg des radlastbezogenen Bohrmoments. Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.3.6.3 führt auch ein sinkender Reifenfülldruck zu einer Vergrößerung der Reifenaufstandsfläche sowie zu einer Zunahme des pneumatischen Nachlaufs. Dies ist sowohl mit einer Erhöhung der Aligning Stiffness wie auch mit höheren Werten des radlastbezogenen Bohrmoments verbunden. Auch diese physikalischen Zusammenhänge werden durch die Parameter a_6 und $a_{s,6}$ des Regressionsmodells bestätigt.

5.4.3 Näherung durch KNN

Zur Abbildung nichtlinearer Zusammenhänge werden KNN zur Näherung der Aligning Stiffness A_α und des radlastbezogenen Bohrmoments $M_{B,n}$ verwendet. Die Histogramme von Abbildung 5.26 und Abbildung 5.27 zeigen die Bestimmtheitsmaße der insgesamt 1000 Anlerniterationen entsprechend der Methodik aus Kapitel 3.2. Die Daten beziehen sich dabei jeweils auf die Test- und Validierungsdaten des zugehörigen KNN. Für die Darstellungen hinsichtlich der Trainingsdaten sowie der gesamten Datenbasis sei auf Anhang 32 bis Anhang 35 verwiesen.

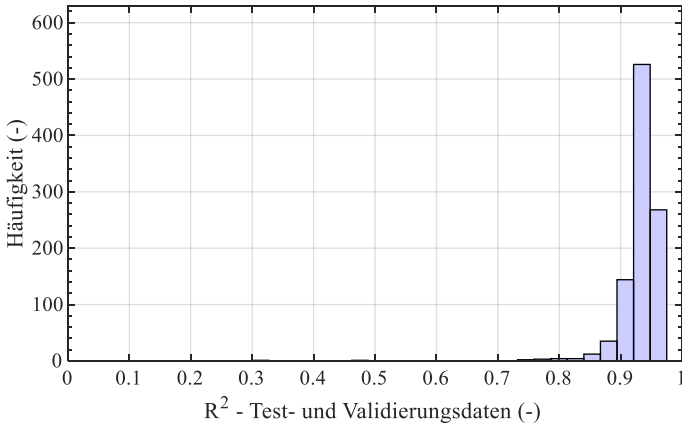


Abbildung 5.26: Bestimmtheitsmaße der Test- und Validierungsdaten (Aligning Stiffness)

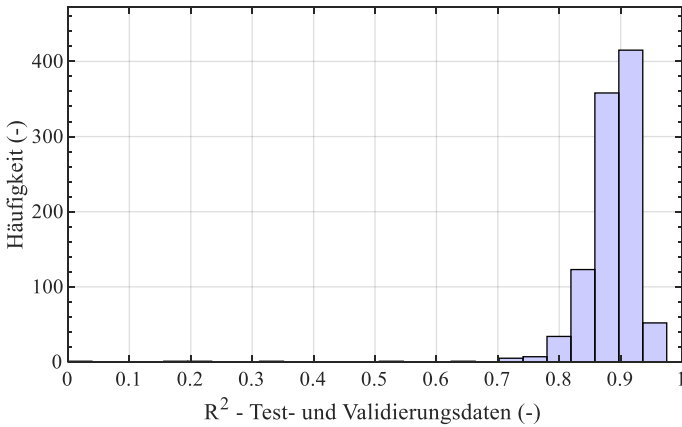


Abbildung 5.27: Bestimmtheitsmaße der Test- und Validierungsdaten (Bohrmoment)

In beiden Fällen zeigen die Histogramme eine hohe Auftretenswahrscheinlichkeit im Bereich hoher Bestimmtheitsmaße sowie eine geringe Anzahl niedriger

Bestimmtheitsmaße infolge ungünstiger Kombinationen aus Trainings-, Test- und Validierungsdaten. Insbesondere im Falle der Aligning Stiffness belegt dies eine sehr hohe Näherungsgüte sowie eine gute Reproduzierbarkeit des Anlernprozesses. Im Falle des auf die Radlast normierten Bohrmoments ist die vorliegende Streuung etwas größer, was durch die kleinere Datenbasis (siehe Kapitel 5.4.1) begründbar ist. Die Bestimmtheitsmaße der auf methodischer Grundlage von Kapitel 3.2 ausgewählten KNN sind in Tabelle 5.15 aufgelistet.

Tabelle 5.15: Bestimmtheitsmaße des KNN (Lenkungskräfte)

FTC	R^2_{tr}	$R^2_{t,v}$	R^2
A_α	0,95	0,94	0,95
$M_{B,n}$	0,91	0,90	0,91

In Abbildung 5.28 und Abbildung 5.29 sind die anhand der KNN genäherten FTC-Werte den zugehörigen Messwerten gegenübergestellt. Die hohe Näherungsgüte wird auch hierbei durch die im Verhältnis zum gesamten Variationsbereich des jeweiligen FTC geringe Streuung der Datenpunkte um die idealisierte Näherungsgerade bestätigt. In Kapitel 5.4.2 wird bei der Näherung der Aligning Stiffness anhand des Regressionsmodells eine Krümmung der Datenpunkte beobachtet. Im Falle der Näherung durch KNN ist eine vergleichbare Krümmung nicht erkennbar, was auf die zusätzliche Berücksichtigung nichtlinearer Zusammenhänge zurückzuführen ist. Als Auslöser für das nichtlineare Verhalten ist dabei die gleichzeitige Auswirkung der Radlast auf den pneumatischen Nachlauf wie auch auf die Schräglaufsteifigkeit (siehe Kapitel 2.3.4.3) anzunehmen, wodurch die Radlast eine Korrelation höherer Ordnung zur Aligning Stiffness aufweist.

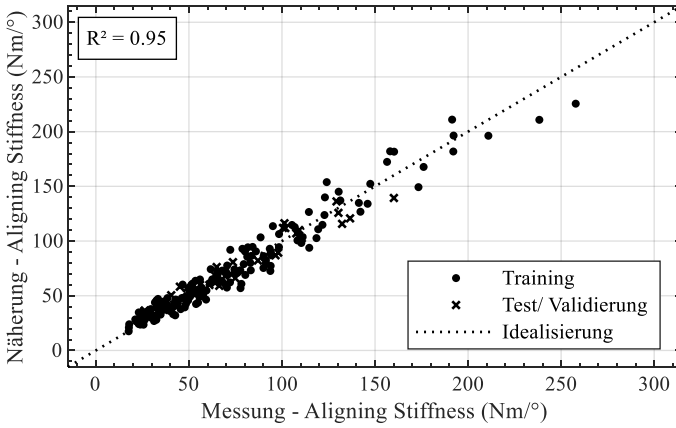


Abbildung 5.28: Mess- und Näherungswerte des KNN (Aligning Stiffness)

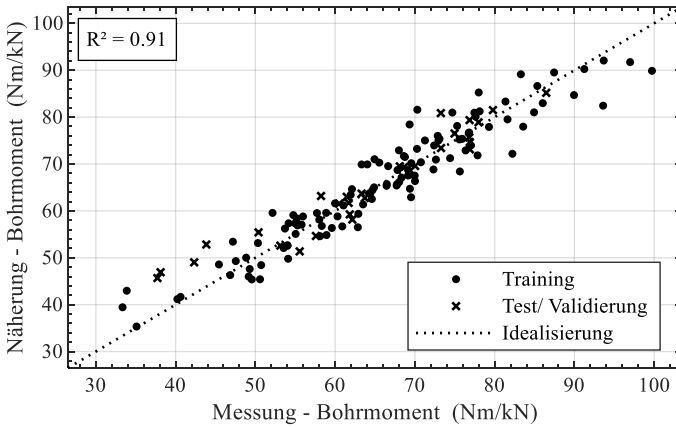


Abbildung 5.29: Mess- und Näherungswerte des KNN (Bohrmoment)

5.4.4 Analyse der Streubereiche

In Abbildung 5.30 und Abbildung 5.31 sind die prozentualen Abweichungen der Aligning Stiffness A_α bzw. des radlastbezogenen Bohrmoments $M_{B,n}$ aller gemessenen Reifen von den jeweiligen Kategoriemittelwerten (siehe Kapitel 3.2) veranschaulicht.

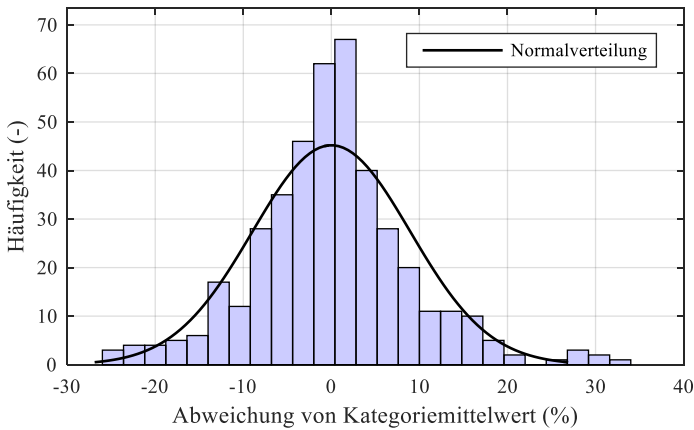


Abbildung 5.30: Streuungshistogramm der Aligning Stiffness

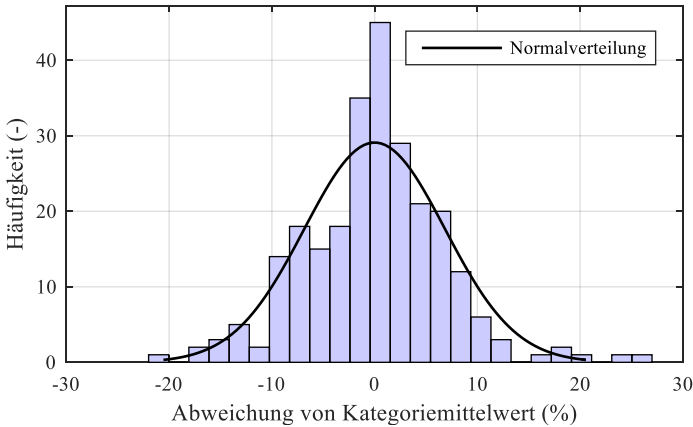


Abbildung 5.31: Streuungshistogramm des Bohrmoments

Ebenso wie im Falle der FTC anderer Eigenschaftsbereiche weisen die beiden Histogramme einen näherungsweise normalverteilten Verlauf (siehe Kapitel 2.6.5) auf. Die durch unterschiedliche Gummimischungen und Reifenkonstruktionen hervorgerufenen Streuungen innerhalb der einzelnen Dimensionen von Rad und Reifen sind dem prozentualen Intervall $[x_u, x_o]$ entsprechend der Auftretenswahrscheinlichkeit $\Phi(x_u, x_o)$ nach $2 \cdot \sigma_\varphi$ aus Tabelle 5.16 zu entnehmen.

Tabelle 5.16: Streuintervall der für die Lenkungskräfte relevanten FTC ($2 \cdot \sigma_\varphi$)

FTC	x_u	x_o	$\Phi(x_u, x_o)$
A_α	-17,92 %	17,92 %	95,45 %
$M_{B,n}$	-13,70 %	13,70 %	95,45 %

5.5 Spurrillenverhalten

Im folgenden Abschnitt werden die Einflüsse der Dimensionen von Rad und Reifen sowie der Radlast und des Fülldrucks auf die Sturzsteifigkeit c_γ untersucht.

5.5.1 Datenbasis

In den Abbildungen von Anhang 19 bis Anhang 21 sind die Stützstellen der zur Analyse verwendeten Datenbasis visualisiert, woraus ein weiter Variationsbereich der betrachteten Einflussparameter hervorgeht. Die Auswahl beinhaltet auch hierbei ausschließlich Sommerreifen ohne Notlaufeigenschaften von Fahrzeugen mit einem Produktionsbeginn (SOP) ab 2013. Die insgesamt 476 Messungen werden wiederum an dem in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Flachbahnprüfstand bei einer Abrollgeschwindigkeit von 40 km/h ermittelt.

5.5.2 Regressionsanalyse

Zur Näherung der Sturzsteifigkeit c_γ wird ebenfalls der in Kapitel 5.1.2 eingeführte Regressionsansatz nach Formel (5.1) verwendet. Der Vergleich zwischen den anhand dieses Modells berechneten Werten und den zugehörigen Messwerten ist in Abbildung 5.32 dargestellt. Sowohl das hohe Bestimmtheitsmaß von 0,88 wie auch die geringe Streuung der Datenpunkte um die Idealisierung belegen dabei eine hohe Näherungsgüte.

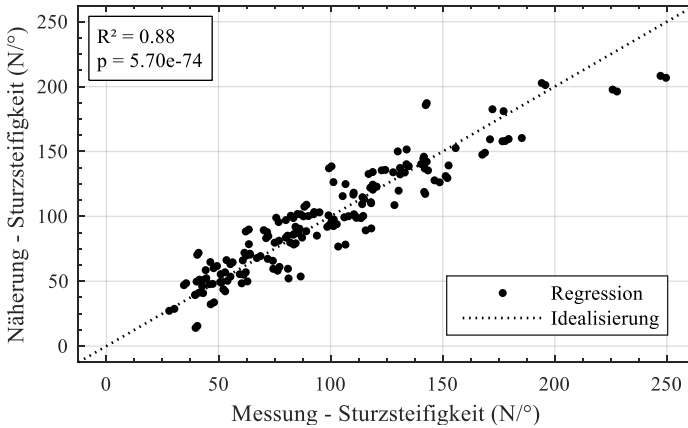


Abbildung 5.32: Mess- und Näherungswerte des Regressionsmodells (Sturzsteifigkeit)

Die absoluten und standardisierten Regressionsparameter zur Näherung der Sturzsteifigkeit c_γ sind in Tabelle 5.17 und Tabelle 5.18 aufgelistet.

Tabelle 5.17: Regressionsparameter (Sturzsteifigkeit)

FTC	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
c_γ	-6,8 E0	6,6 E2	-1,0 E2	-1,2 E2	-1,2 E3	2,4 E-2	-2,5 E-5

Tabelle 5.18: Standardisierte Regressionsparameter (Sturzsteifigkeit)

FTC	$a_{s,0}$	$a_{s,1}$	$a_{s,2}$	$a_{s,3}$	$a_{s,4}$	$a_{s,5}$	$a_{s,6}$
c_γ	-	0,40	-0,10	-0,11	-0,23	0,86	-0,02

Den physikalischen Erwartungen aus Kapitel 2.3.7.2 entsprechend, führt die Erhöhung der Reifenbreite ($a_1, a_{s,1}$) zu einer deutlichen Zunahme der Sturzsteifigkeit. Dieser Zusammenhang lässt sich durch die höhere Quersteifigkeit breiter Reifen gegenüber schmalen Reifen (siehe Kapitel 2.3.4.2) begründen. Die Erhöhung des Reifenaußendurchmessers bei unveränderter Flankenhöhe ($a_2, a_{s,2}, a_3, a_{s,3}$) ist innerhalb der multiplen linearen Regression mit einer Abnahme der Sturzsteifigkeit verbunden. Dieser Zusammenhang lässt sich anhand der Verkettung mehrerer physikalischer Zusammenhänge erklären. Zunächst ist die höhere Vertikalsteifigkeit bei großen Außendurchmessern des Reifens (siehe Kapitel 2.3.3.2) mit einer geringeren Vertikalverformung bei einer bestimmten Radlast verbunden. Hierdurch werden wiederum der Traganteil der Reifenflanken (siehe Kapitel 2.1.2) und damit die Druckbelastung im äußeren Bereich der Latschfläche verringert. Aufgrund der geometrischen Verhältnisse sind die unter Sturz vorliegenden Reifenverformungen insbesondere in diesem Bereich stark ausgeprägt. Die geringere Druckbelastung im Bereich der Reifenflanken führt folglich zu einer Senkung der unter Radsturz auftretenden Seitenkräfte des Reifens. Auf Basis der erläuterten Wirkzusammenhänge, erscheint die Abnahme der Sturzsteifigkeit unter Erhöhung des Reifenaußendurchmessers bei gleichbleibender Flankenhöhe plausibel. Interessant ist die Tatsache, dass die Verringerung der Flankenhöhe durch Erhöhung des Raddurchmessers ($a_3, a_{s,3}$) innerhalb des Regressionsmodells mit einer Verringerung der Sturzsteifigkeit verbunden ist. Hierbei besteht ein Widerspruch zu den Erwartungen aus Kapitel 2.3.7.2, wonach wegen der höheren Quersteifigkeit des Reifens von einer Erhöhung der Sturzsteifigkeit auszugehen wäre. Die geringere Flankenhöhe führt jedoch auch zu einer Erhöhung der vertikalen Reifensteifigkeit (siehe Kapitel 2.3.3.2) und damit zu einer Verkleinerung der Reifenaufstandsfläche. Hierdurch werden unter Sturz weniger Profilelemente ausgelenkt, was mit einer Verringerung der resultierenden Seitenkraft einhergeht. Die Parameter a_4 und $a_{s,4}$ verdeutlichen eine Zunahme der Sturzsteifigkeit im Falle einer Erhöhung der Felgenmaulweite bei unveränderter Reifenbreite. Dieser Zusammenhang ist nach Kapitel 2.3.7.2 auf die höhere Quersteifigkeit bei hohen Maulweiten zurückzuführen und entspricht damit den physikalischen Erwartungen. Die Erhöhung der Radlast ($a_5, a_{s,5}$) führt innerhalb des Regressionsmodells zu einer deutlichen Zunahme der Sturzsteifigkeit. Auch dieser Zusammenhang entspricht den physikalischen Erwartungen

und ist nach Kapitel 2.3.7.3 anhand der stärkeren Reifenverformung bei hohen Radlasten nachzuvollziehen. Darüber hinaus deutet die Regressionsanalyse auf eine geringfügige Abnahme der Sturzsteifigkeit bei Erhöhung des Reifenfülldrucks (a_6 , $a_{s,6}$) hin. Trotz der höheren Reifensteifigkeit in Querrichtung, entspricht dieser Zusammenhang den Erkenntnissen vergangener Arbeiten und lässt sich nach Kapitel 2.3.7.3 durch die Verkleinerung der Reifenaufstandsfläche begründen.

5.5.3 Näherung durch KNN

Analog zur Vorgehensweise der vorhergehenden Kapitel, wird auch die Sturzsteifigkeit c_γ anhand von KNN genähert. Die Bestimmtheitsmaße bezüglich der Test- und Validierungsdaten aller 1000 Anlerniterationen (siehe Kapitel 3.2) sind in Abbildung 5.33 dargestellt. Die entsprechenden Histogramme bezüglich der Trainingsdaten bzw. der gesamten Datenbasis befinden sich in Anhang 36 und Anhang 37.

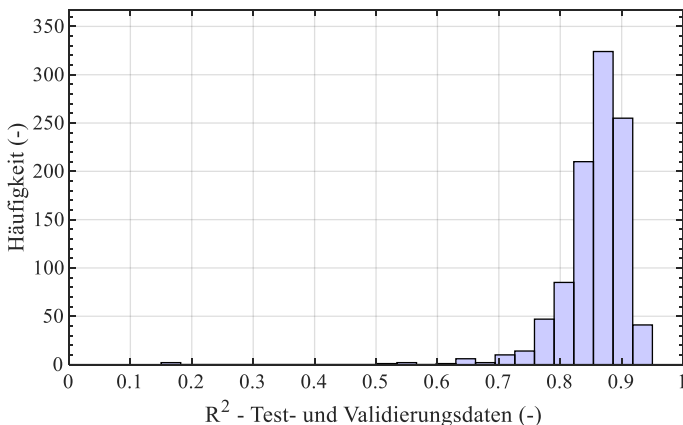


Abbildung 5.33: Bestimmtheitsmaße der Test- und Validierungsdaten (Sturzsteifigkeit)

Aus dem Histogramm ist ersichtlich, dass die Bestimmtheitsmaße der einzelnen Anlerniterationen in den meisten Fällen im Bereich oberhalb von 0,85 liegen. Dies deutet auf eine hohe Näherungsgüte hin. Vereinzelt Iterationen mit deutlich niedrigeren Bestimmtheitsmaßen treten nur in sehr wenigen Fällen auf, was eine gute Reproduzierbarkeit des Anlernprozesses belegt. Die Bestimmtheitsmaße des nach den Kriterien aus Kapitel 3.2 ausgewählten KNN sind in Tabelle 5.19 zusammengefasst.

Tabelle 5.19: Bestimmtheitsmaße des KNN (Sturzsteifigkeit)

FTC	R^2_{tr}	$R^2_{t,v}$	R^2
c_γ	0,88	0,87	0,88

Die anhand des KNN berechneten Sturzsteifigkeiten sind in Abbildung 5.34 gegenüber den jeweiligen Messwerten aufgetragen. Die aufgrund der Bestimmtheitsmaße zu erwartende hohe Näherungsgüte wird dabei durch die geringe Streuung der Datenpunkte um die Idealisierung unterstrichen.

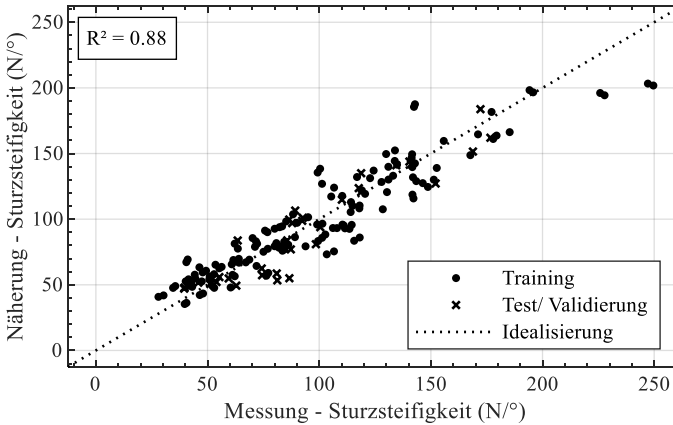


Abbildung 5.34: Mess- und Näherungswerte des KNN (Sturzsteifigkeit)

5.5.4 Analyse der Streubereiche

Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 3.2 werden die durch unterschiedliche Gummimischungen und Reifenkonstruktionen hervorgerufenen Streuungen der Sturzsteifigkeit c_y anhand der prozentualen Abweichungen von den einzelnen Kategoriemittelwerten quantifiziert. Das zugehörige Histogramm ist in Abbildung 5.35 dargestellt.

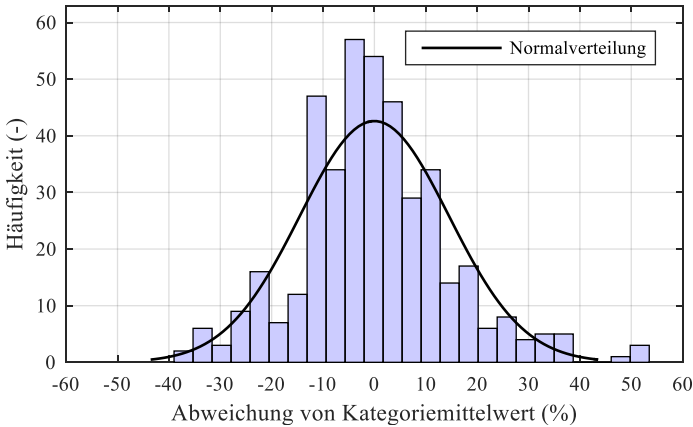


Abbildung 5.35: Streuungshistogramm der Sturzsteifigkeit

Auch im Falle der Sturzsteifigkeit folgt das Streuungshistogramm näherungsweise der Normalverteilung nach Gauß (siehe Kapitel 2.6.5). Die entsprechenden Streuintervalle $[x_u, x_o]$ für die Auftretenswahrscheinlichkeit $\Phi(x_u, x_o)$ nach $2 \cdot \sigma_\varphi$ gehen aus Tabelle 5.20 hervor.

Tabelle 5.20: Streuintervall der Sturzsteifigkeit ($2 \cdot \sigma_\varphi$)

FTC	x_u	x_o	$\Phi(x_u, x_o)$
c_γ	-29,04 %	29,04 %	95,45 %

Die Parameter x_u und x_o verdeutlichen, dass die Streuungen der Sturzsteifigkeit im Verhältnis zu den Streuintervallen anderer FTC verhältnismäßig groß sind. Aufgrund des unmittelbaren Zusammenhangs zur Quersteifigkeit des Reifens, ist von einer gleichermaßen starken Abhängigkeit der Sturzsteifigkeit von der Reifenkonstruktion auszugehen. Auf dieser Grundlage lassen sich die starken Streu-

ungen der Sturzsteifigkeit durch größere Unterschiede zwischen den verwendeten Reifenkonstruktionen als zwischen den jeweiligen Gummimischungen innerhalb der betrachteten Datenbasis erklären. Von diesem Zusammenhang wird bereits in den Ausführungen von Kapitel 5.2.4 und Kapitel 5.3.4 ausgegangen.

5.6 Fazit

Auch die fahrdynamischen Reifeneigenschaften lassen sich sowohl durch die Verwendung linearer Regressionsmodelle wie auch anhand von KNN mit insgesamt hoher Näherungsgüte abbilden. In den meisten Fällen unterscheidet sich das Bestimmtheitsmaß des Regressionsmodells dabei nur unwesentlich von dem des entsprechenden KNN, was auf eine hohe Linearität der einzelnen Einflussparameter hindeutet. Ausschließlich bei der Näherung der Aligning Stiffness kommt es durch die Verwendung des KNN zu einer deutlichen Verbesserung der Näherungsgüte und zu einer Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes von 0,91 auf 0,95.

Die Interpretation der einzelnen Regressionsparameter entspricht grundsätzlich den physikalischen Erwartungen aus Kapitel 2.3. Darüber hinaus wird deutlich, dass keine einheitlichen Möglichkeiten zur gleichzeitigen Optimierung aller fahrdynamisch relevanten FTC existieren. Die jeweiligen Vor- und Nachteile müssen daher bei der Grundausslegung der Dimensionen von Rad und Reifen gegenübergestellt und abgewägt werden.

Bei der Auswertung von Streuintervallen innerhalb der einzelnen Kombinationen aus Rad- und Reifendimension liegen in Abhängigkeit vom jeweiligen FTC deutliche Unterschiede vor. Aufgrund dieser Tatsache und unter Berücksichtigung physikalischer Mechanismen bei der Kraftübertragung, wird innerhalb der betrachteten Datenbasis von größeren Unterschieden zwischen den eingesetzten Reifenkonstruktionen als zwischen den verwendeten Gummimischungen ausgegangen.

6 Vibroakustik

In diesem Abschnitt werden die Einflüsse der Rad- und Reifendimension sowie der Betriebsbedingungen auf die Körperschallanregung des Reifens auf rauer Fahrbahn (siehe Kapitel 2.4.3) quantifiziert und hinsichtlich der physikalischen Ursachen interpretiert. Die Messdaten aus (Hoffmann, 2018) dienen dabei als Grundlage zur statistischen Analyse und werden anhand der in Kapitel 3.2 erläuterten Methodik ausgewertet. Ergänzend dazu werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit zusätzliche Messungen an dem in Kapitel 2.4.2 vorgestellten Prüfstand durchgeführt und die vorhandene Datenbasis auf diese Weise erweitert.

6.1 Fahrbahnanregung in Querrichtung

Im Folgenden werden die Einflüsse der Dimensionen von Rad und Reifen sowie der Betriebsbedingungen auf den Ersatzwert $F_{y,E}$ zur Charakterisierung des vibroakustischen Reifenverhaltens (siehe Kapitel 2.4.3.1) untersucht.

6.1.1 Datenbasis

Insgesamt liegen 145 Messwerte zur Analyse der Kraftanregung auf rauer Fahrbahn vor, welche nach der in Kapitel 2.4.2 vorgestellten Prüfmethode ermittelt werden. In den Diagrammen von Abbildung 6.1 bis Abbildung 6.2 wird deutlich, dass die Datenbasis einen weiten Bereich unterschiedlicher Rad- und Reifendimensionen abdeckt. Ebenso wie im Falle der Eigenschaftsbereiche Energieeffizienz und Fahrdynamik werden ausschließlich Sommerreifen ohne Notlauf Eigenschaften betrachtet. Zur Reduzierung von Einflüssen durch technologische Veränderungen stammen die betrachteten Reifen darüber hinaus von Fahrzeugen mit einem Produktionsbeginn (SOP) ab dem Jahr 2013.

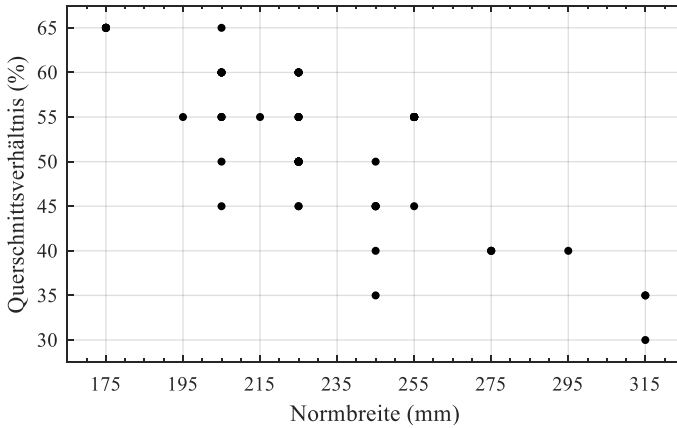


Abbildung 6.1: Reifenbreiten und Querschnittsverhältnisse der Datenbasis (Körperschall)

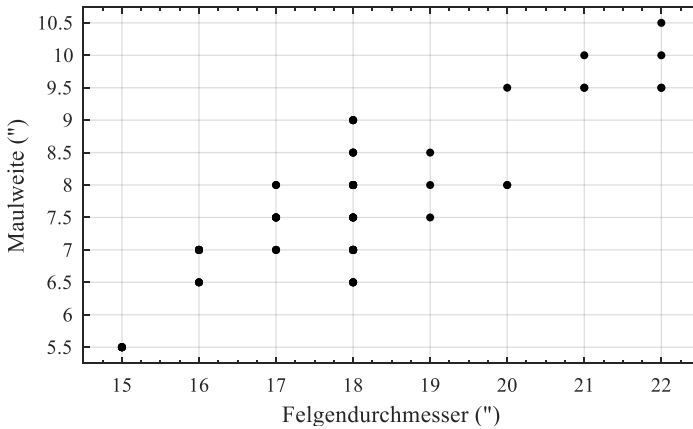


Abbildung 6.2: Felgendurchmesser und Maulweiten der Datenbasis (Körperschall)

Innerhalb der einzelnen Rad- und Reifendimensionen werden jeweils Messungen bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen durchgeführt. Die zugehörige Verteilung aus Radlasten und Reifenfülldrücken ist in Abbildung 6.3 visualisiert.

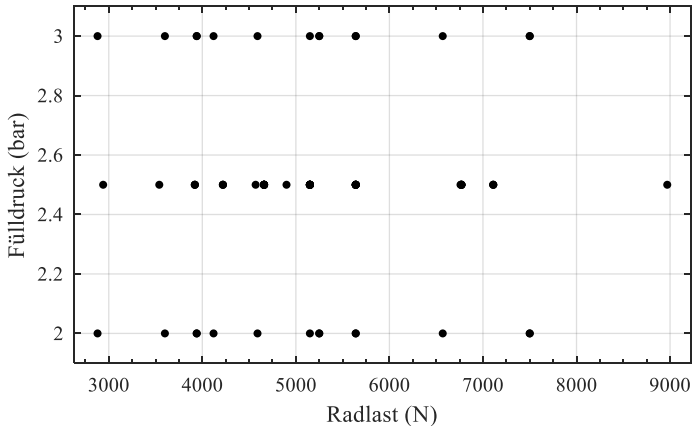


Abbildung 6.3: Radlasten und Fülldrücke der Datenbasis (Körperschall)

6.1.2 Regressionsanalyse

Basierend auf den physikalischen Erläuterungen in Kapitel 2.4.3.2 und Kapitel 2.4.3.3, wird der Regressionsansatz aus Formel (6.1) zur Quantifizierung der unterschiedlichen Einflüsse auf den vibroakustischen Ersatzwert $F_{y,E}$ verwendet. Dieser Ansatz entspricht der Vorgehensweise des Themengebiets Fahrdynamik, weshalb auf eine erneute Vertiefung der einzelnen Linearanteile verzichtet wird. Hierbei sei auf die detaillierten Erläuterungen in Kapitel 5.1.2 verwiesen.

$$F_{y,E} = a_0 + a_1 \cdot B_{R,Q} + a_2 \cdot D_R + a_3 \cdot D_F + a_4 \cdot \Delta B_{R,F} + a_5 \cdot F_z + a_6 \cdot p_i$$

(6.1)

Zur Vermeidung statistischer Gewichtung wird innerhalb der einzelnen Kombinationen aus Rad- und Reifendimension, Radlast und Fülldruck wiederum der Mittelwert aller Messwerte zur Regression verwendet (siehe Kapitel 3.2). In Abbildung 6.4 sind die anhand des Regressionsmodells berechneten Werte des vibroakustischen Ersatzwerts gegenüber den zugehörigen Messwerten aufgetragen. Die Gegenüberstellung zeigt eine im Verhältnis zum gesamten Variationsbereich des FTC geringe Streuung der Datenpunkte um die idealisierte Näherungsgerade. Trotz der grundsätzlich hohen Näherungsgüte ist das Bestimmtheitsmaß von 0,8 geringer als im Falle der Mehrzahl anderer FTC aus den Eigenschaftsbereichen Energieeffizienz oder Fahrdynamik (siehe Kapitel 4 und Kapitel 5). Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.4.3.2 und Kapitel 2.4.3.3 besteht ein starker Zusammenhang zwischen der Quersteifigkeit des Reifens und den Reifenkräften in Querrichtung beim Abrollen auf rauer Fahrbahn. Neben den Einflüssen durch die Dimensionen von Rad und Reifen sowie die Betriebsbedingungen wird die Quersteifigkeit auch durch die Gestalt des Reifenprofils, die Reifenkonstruktion sowie die Eigenschaften der verwendeten Gummimischung beeinflusst. (Heißing & Ersoy, 2013) Diese Eigenschaften werden durch das Regressionsmodell nicht berücksichtigt, weshalb der dimensionsspezifische Einsatz bestimmter Reifenkonstruktionen und Gummimischungen als mögliche Ursache für die Abweichungen zwischen den Datenpunkten und der Idealisierung gilt.

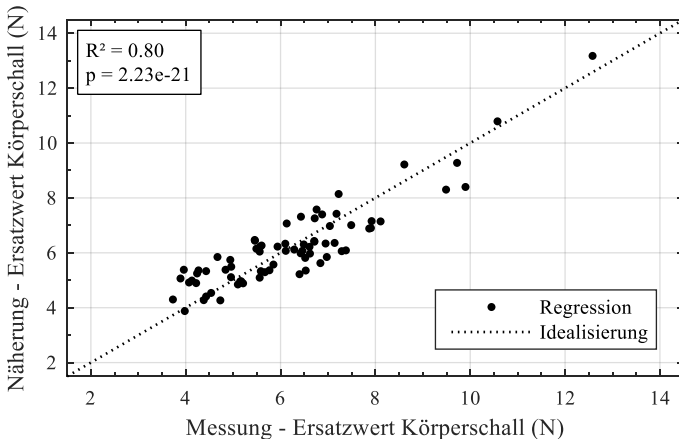


Abbildung 6.4: Mess- und Näherungswerte des Regressionsmodells (Körperschall)

Die absoluten und standardisierten Regressionsparameter sind in Tabelle 6.1 und Tabelle 6.2 zusammengefasst und beziehen sich jeweils auf die Eingangsgrößen in Metern, Newton bzw. bar.

Tabelle 6.1: Regressionsparameter (Körperschall)

FTC	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
$F_{y,E}$	-1,2 E1	-6,4 E1	3,0 E1	2,6 E1	-7,7 E1	4,9 E-4	1,1 E-5

Tabelle 6.2: Standardisierte Regressionsparameter (Körperschall)

FTC	$a_{s,0}$	$a_{s,1}$	$a_{s,2}$	$a_{s,3}$	$a_{s,4}$	$a_{s,5}$	$a_{s,6}$
$F_{y,E}$	-	-1,14	0,85	0,67	-0,53	0,37	0,20

Die multiple lineare Regression zeigt eine Abnahme des Krafteintrags in Querrichtung bei Erhöhung der Reifenbreite ($a_1, a_{s,1}$). Dieser Zusammenhang entspricht den physikalischen Erläuterungen in Kapitel 2.4.3.2 und ist auf die geringere Vertikalverformung breiter Reifen und die damit verbundene homogenere Belastung der Aufstandsfläche zurückzuführen. Dabei werden überproportional starke Krafteinträge in Bereichen mit lokal hoher Flächenpressung reduziert. Trotz der geringeren Quersteifigkeit des Reifens führt die Erhöhung des Reifenaußendurchmessers innerhalb des Regressionsmodells zu einer Zunahme der Körperschallschwingungen. Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.4.3.2 lässt sich dieser Zusammenhang anhand des verringerten Traganteils der Reifensflanken und die damit verbundene Vergrößerung der Reifenaufstandsfläche plausibilisieren, wodurch eine erhöhte Angriffsfläche zur Anregung von Reifenschwingungen durch die Fahrbahn vorliegt. Es ist denkbar, dass dieser Effekt durch veränderte Eigenfrequenzen des Reifens infolge der geringeren Quersteifigkeit verstärkt wird. Aufgrund der höheren Quersteifigkeit des Reifens bei niedriger Flankenhöhe führt eine Erhöhung des Raddurchmessers bei gleichbleibendem Außendurchmesser des Reifens ($a_3, a_{s,3}$) zu einem stärkeren Krafteintrag in Querrichtung. Auf Basis dieser Argumentation erscheint auch die Zunahme des lateralen Krafteintrags bei Erhöhung der Felgenmaulweite ($a_4, a_{s,4}$) plausibel. Die Regressionsparameter a_5 und $a_{s,5}$ deuten auf eine positive Korrelation zwischen der Radlast und dem Krafteintrag in Querrichtung hin. Dies entspricht ebenfalls den physikalischen Erwartungen nach Kapitel 2.4.3.2 und ist durch die größere Aufstandsfläche des Reifens zu begründen, wodurch Fahrbahnanregungen begünstigt werden. Entsprechend den Erwartungen aus Kapitel 2.4.3.2 wirkt sich die Erhöhung des Reifenfülldrucks ($a_6, a_{s,6}$) ebenfalls negativ auf den Schwingungskomfort auf rauer Fahrbahn aus. Trotz der geringeren Aufstandsfläche des Reifens, lässt sich dieser Zusammenhang durch die höhere Reifensteifigkeit in Querrichtung begründen (siehe Kapitel 2.4.3.2).

6.1.3 Näherung durch KNN

Basierend auf der in Kapitel 3.2 erläuterten Methodik wird auch der vibroakustische Ersatzwert $F_{y,E}$ durch ein vorwärtsgerichtetes KNN mit einem Neuron ge-

nähert. Ebenso wie bei den Eigenschaftsbereichen Energieeffizienz und Fahr-
 dynamik werden auch hierbei die Eingangsvariablen und Messdaten des Regressi-
 onsmodells zum Training des KNN verwendet. In Abbildung 6.5 sind die Be-
 stimmtheitsmaße der 1000 Anlerniterationen bezüglich der Test- und
 Validierungsdaten dargestellt. Für die entsprechenden Diagramme hinsichtlich
 der Trainingsdaten sowie der gesamten Datenbasis sei auf Anhang 38 und An-
 hang 39 verwiesen.

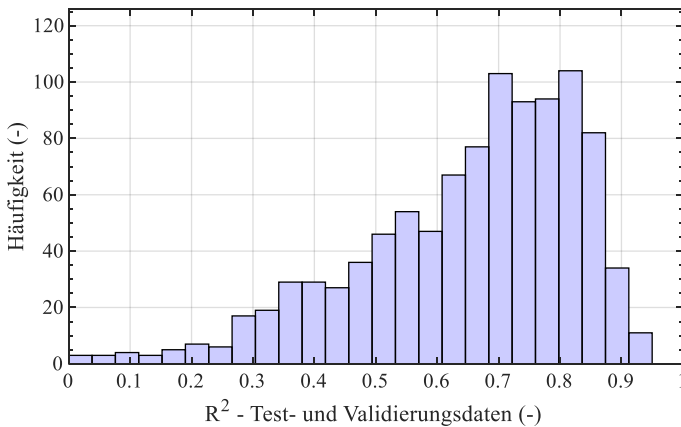


Abbildung 6.5: Bestimmtheitsmaße der Test- und Validierungsdaten (Körperschall)

Dem Histogramm ist zu entnehmen, dass die Streuung des Bestimmtheitsmaßes
 bezüglich der Test- und Validierungsdaten deutlich größer ist als im Falle der
 FTC anderer Eigenschaftsbereiche (siehe Kapitel 4 und Kapitel 5). In Kapitel
 6.1.2 wird auf die Abhängigkeit der Quersteifigkeit des Reifens vom Reifenpro-
 fil, der Reifenkonstruktion sowie den Eigenschaften der Gummimischung hin-
 gewiesen. Diese Eigenschaften werden aufgrund der gewählten Eingangsgrößen
 nicht durch das KNN berücksichtigt, weshalb es vereinzelt zu erhöhten Abwei-
 chungen zwischen Messung und Näherung kommen kann. Darüber hinaus ist die
 Datenbasis mit insgesamt 145 Messwerten gegenüber der Datenbasis anderer FTC
 vergleichsweise gering. Bei ungünstigen Kombinationen aus Trainings-, Test-

und Validierungsdaten führt dies zu starken Veränderungen des Bestimmtheitsmaßes. Dennoch wird in Abbildung 6.5 deutlich, dass die höchste Auftretenswahrscheinlichkeit bei Bestimmtheitsmaßen von etwa 0,8 liegt, was auf eine hohe Näherungsgüte hindeutet. Die Eigenschaften des im weiteren Verlauf dieser Arbeit verwendeten KNN sind in Tabelle 6.3 zusammengefasst.

Tabelle 6.3: Bestimmtheitsmaße des KNN (Körperschall)

FTC	R^2_{tr}	$R^2_{t,v}$	R^2
$F_{y,E}$	0,81	0,80	0,81

In Abbildung 6.6 sind die gemessenen vibroakustischen Ersatzwerte gegenüber den anhand des KNN berechneten Werten aufgetragen. Die Datenpunkte weisen dabei eine im Verhältnis zum gesamten Variationsbereich geringe Streuung auf und deuten damit auf eine hohe Näherungsgüte hin. Entsprechend den vorhergehenden Erläuterungen sind die vorhandenen Abweichungen auf den dimensionspezifischen Einsatz bestimmter Reifenkonstruktionen und Gummimischungen zurückzuführen.

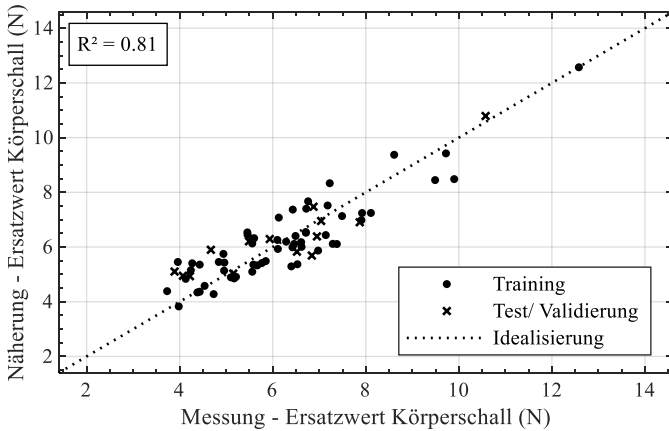


Abbildung 6.6: Mess- und Näherungswerte des KNN (Körperschall)

6.1.4 Analyse der Streubereiche

Abbildung 6.7 zeigt die Abweichungen der einzelnen Messwerte des vibroakustischen Ersatzwerts $F_{y,E}$ von den jeweiligen Kategoriemittelwerten (siehe Kapitel 3.2).

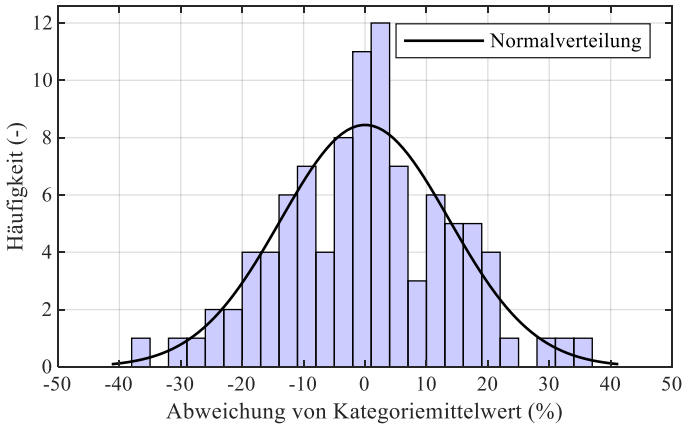


Abbildung 6.7: Streuungshistogramm des Ersatzwerts für Körperschall

Ebenso wie bei den FTC der Eigenschaftsbereiche Energieeffizienz und Fahrdynamik folgt der Verlauf des Histogramms auch im Falle des vibroakustischen Reifenverhaltens näherungsweise der Normalverteilung nach Gauß. Die zugehörigen Streuintervalle $[x_u, x_o]$ der Auftretenswahrscheinlichkeit $\Phi(x_u, x_o)$ nach $2 \cdot \sigma_\varphi$ sind in Tabelle 6.4 zusammengefasst.

Tabelle 6.4: Streuintervall des Ersatzwerts für Körperschall ($2 \cdot \sigma_\varphi$)

FTC	x_u	x_o	$\Phi(x_u, x_o)$
$F_{y,E}$	-27,50 %	27,50 %	95,45 %

Im Vergleich zu der Mehrzahl anderer FTC ist der Variationsbereich des vibroakustischen Ersatzwerts innerhalb einzelner Dimensionen von Rad und Reifen sehr groß. Basierend auf den Erläuterungen von Kapitel 6.1.2 ist dies durch den erheblichen Einfluss der Reifenkonstruktion und der Gummimischung zu begründen.

6.2 Fazit

Sowohl das lineare Regressionsmodell erster Ordnung wie auch das KNN erweisen sich als geeignet, um den vibroakustischen Ersatzwert $F_{y,E}$ anhand der Dimensionen von Rad und Reifen sowie der Betriebsbedingungen näherungsweise zu berechnen. Die Näherungsgüte ist mit Bestimmtheitsmaßen von etwa 0,8 jedoch etwas geringer als im Falle anderer FTC aus den Eigenschaftsbereichen Energieeffizienz und Fahrdynamik.

Die Interpretation der Regressionsparameter belegt weitestgehend die physikalischen Annahmen aus Kapitel 2.4.3.2 und Kapitel 2.4.3.3. Demnach wird der vibroakustische Ersatzwert hauptsächlich durch die Quersteifigkeit des Reifens sowie durch die Ausprägung der Latschfläche beeinflusst. Entsprechend wirken sich insbesondere kleine Raddurchmesser, große Überstände des Reifens gegenüber der Felge sowie niedrige Reifenfülldrücke vorteilhaft auf das vibroakustische Reifenverhalten aus. Breite Reifen führen aufgrund der homogenen Belastung der Latschfläche ebenfalls zu einer Verringerung der Kraftanregung beim Abrollen auf rauer Fahrbahn. Große Außendurchmesser des Reifens führen wegen des geringeren Traganteils der Reifenflanken hingegen zu einer Vergrößerung der Reifenaufstandsfläche und damit zu einer Begünstigung fahrbahninduzierter Körperschallschwingungen, welche möglicherweise durch veränderte Eigenfrequenzen des Reifens verstärkt werden.

Die Variation des vibroakustischen Ersatzwerts innerhalb der einzelnen Kombinationen von Rad und Reifen folgt näherungsweise der Normalverteilung nach Gauß. Das hieraus ermittelte Streuintervall ist gegenüber den Streuintervallen anderer FTC dieser Arbeit vergleichsweise groß. Es ist davon auszugehen, dass diese Tatsache auf den erheblichen Einfluss der Profilgeometrie, der Reifenkonstruktion sowie der Gummimischung auf das vibroakustische Reifenverhalten zurückzuführen ist.

7 Zusammenhänge zwischen „Functional Tyre Characteristics“

Im Folgenden werden die Zusammenhänge analysiert, welche innerhalb einzelner Dimensionskombinationen von Rad und Reifen zwischen den FTC der Eigenschaftsbereiche Energieeffizienz (siehe Kapitel 2.2), Fahrdynamik (siehe Kapitel 2.3) und Vibroakustik (siehe Kapitel 2.3) vorliegen. Hierbei wird zunächst eine allgemeine Vorgehensweise zur objektiven Erfassung der vorliegenden Effekte anhand statistischer Kennzahlen erläutert. Die jeweiligen Ergebnisse werden daraufhin im Hinblick auf ihre physikalischen Ursachen interpretiert und plausibilisiert. Mögliche Zielkonflikte zwischen den FTC (siehe Kapitel 2.5) unterschiedlicher Eigenschaftsbereiche können auf diese Weise identifiziert werden. Als Datenbasis dienen die bereits innerhalb der Kapitel 4 bis Kapitel 6 herangezogenen Messdaten.

7.1 Objektive Erfassung

Die Vorgehensweise zur objektiven Erfassung der Zusammenhänge zwischen FTC basiert auf den modellhaften Erläuterungen in Kapitel 3.2. Demnach werden die FTC eines Reifens einerseits durch die Dimensionen von Rad und Reifen sowie andererseits durch die Betriebsbedingungen in Form von Radlast und Fülldruck beeinflusst. Zur Quantifizierung dieser Einflüsse wird für jede einzelne Kombination aus Reifendimension, Raddimension und Betriebsbedingung zunächst der Mittelwert \overline{FTC} aller verfügbaren Messwerte FTC_i berechnet. Innerhalb der einzelnen Kategorien werden die FTC darüber hinaus durch die Gummimischung sowie durch die konstruktiven Eigenschaften des Reifens beeinflusst. Diese Einflüsse lassen sich anhand der prozentualen Abweichung ΔFTC_i eines Messwerts FTC_i vom zugehörigen Kategoriemittelwert \overline{FTC} quantifizieren. Zur Analyse der Effekte zwischen FTC innerhalb einzelner Kombinationen aus Reifendimension, Raddimension und Betriebspunkt werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit daher die prozentualen Abweichungen ΔFTC_i aller

FTC gegenübergestellt und auf mögliche Korrelationen untersucht. Dabei wird angenommen, dass die prozentualen Veränderungen eines FTC infolge unterschiedlicher Gummimischungen oder Reifenkonstruktionen innerhalb aller Reifendimensionen vergleichbar sind.

7.1.1 Datenbasis

Wie bereits in Kapitel 7.1 erläutert, werden zur Analyse der Zusammenhänge zwischen FTC die gleichen Messdaten verwendet, welche bereits in Kapitel 4 bis Kapitel 6 zur Quantifizierung der jeweiligen Wirkketten herangezogen werden. Die Auswahl beinhaltet daher wiederum ausschließlich Sommerreifen ohne Notlaufeigenschaften von Fahrzeugen mit einem Produktionsbeginn (SOP) ab 2013.

Im Falle der Rad- und Reifendimension sowie der Radlast und des Fülldrucks genügt jeweils eine separate Datenbasis jedes einzelnen FTC zur Analyse der vorliegenden Wirkzusammenhänge (siehe Kapitel 4 bis Kapitel 6). Die Auswertung von Zusammenhängen zwischen den unterschiedlichen FTC innerhalb einzelner Dimensionskombinationen von Rad und Reifen erfordert hingegen eine eigenschaftsübergreifende Datenbasis, welche jedem Reifen jeweils mehrere FTC aus verschiedenen Eigenschaftsbereichen zuordnet. Die Vermessung eines Reifens an allen verfügbaren Reifenprüfständen ist mit hohem zeitlichen wie auch finanziellen Aufwand verbunden und wird innerhalb der Serienentwicklung daher nur in Einzelfällen durchgeführt. Aus diesem Grund ist die Schnittmenge aller im Rahmen dieser Arbeit verfügbaren Messdaten deutlich geringer als die in den jeweiligen Einzelgebieten vorhandenen Datenbasen. Für eine mehrdimensionale statistische Auswertung der Zusammenhänge zwischen FTC reicht die Überschneidung der verschiedenen Datenbanken daher nicht aus. Zur Lösung dieser Problematik wird im Folgenden jeweils die größte Schnittmenge zweier unterschiedlicher FTC gebildet und diese zur statistischen Analyse herangezogen. Die Multidimensionalität der Wechselwirkungen kann auf diese Weise zwar nicht erfasst werden; dennoch können vorhandene Effekte identifiziert und deren mittlere Ausprägung quantifiziert werden.

Unabhängig davon ist zu beachten, dass nur Kategorien (festgelegt durch Reifendimension, Raddimension, Radlast und Fülldruck, siehe Kapitel 7.1) mit mindestens zwei unterschiedlichen Reifen hinsichtlich möglicher Effekte untersucht werden können. Die Abweichung ΔFTC_i eines Messwerts FTC_i vom zugehörigen Kategoriemittelwert \overline{FTC} würde andernfalls den Wert null aufweisen. Die zur Analyse der Zusammenhänge zwischen den einzelnen FTC verbleibenden Schnittmengen an Messdaten sind in der Matrix aus Tabelle 7.1 zusammengefasst.

Tabelle 7.1: Schnittmenge der Messdaten zur Analyse von Effekten zwischen FTC

	Vertikalsteifigkeit (N/mm)	Schräglaufsteifigkeit (N/°)	Reibwert quer (-)	Einlauflänge (m)	Aligning Stiffness (Nm/°)	Sturzsteifigkeit (N/°)	Reibwert längs (N/N)	Bohrmoment (Nm/kN)	Rollwiderstand (N/kN)	Ersatzwert Körperschall (N)
Vertikalsteifigkeit (N/mm)		137	76	137	137	137	13	76	47	19
Schräglaufsteifigkeit (N/°)	137		215	410	410	406	36	227	47	19
Reibwert quer (-)	76	215		216	216	214	27	216	47	19
Einlauflänge (m)	137	410	216		411	407	37	228	47	19
Aligning Stiffness (Nm/°)	137	410	216	411		407	37	228	47	19
Sturzsteifigkeit (N/°)	137	406	214	407	407		37	226	47	19
Reibwert längs (N/N)	13	36	27	37	37	37		40	7	3
Bohrmoment (Nm/kN)	76	227	216	228	228	226	40		48	20
Rollwiderstand (N/kN)	47	47	47	47	47	47	7	48		22
Ersatzwert Körperschall (N)	19	19	19	19	19	19	3	20	22	

7.1.2 Regressionsanalyse

Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 7.1.1 werden die innerhalb einzelner Dimensionskombinationen von Rad und Reifen vorliegenden Effekte zwischen FTC jeweils paarweise anhand der größten Schnittmenge zweier FTC ausgewertet. Dabei wird für alle Reifen innerhalb der Dimensionskombination die prozentuale Abweichung ΔFTC_i eines FTC von seinem zugehörigen Kategoriemittelwert jeweils durch die prozentuale Abweichung ΔFTC_j eines anderen FTC nach dem Regressionsansatz aus Formel (7.1) genähert.

$$\Delta FTC_i = a_0(i, j) + a_1(i, j) \cdot \Delta FTC_j \tag{7.1}$$

Die auf diese Weise ermittelte Ausgleichsgerade ermöglicht im ersten Schritt die grafische Bewertung der Stärke und Richtung möglicher Zusammenhänge zwischen verschiedenen FTC. In Abbildung 7.1 wird dies am Beispiel zweier FTC mit starker positiver Korrelation, der Schräglaufsteifigkeit und der Aligning Stiffness, deutlich. Entsprechend deutet Abbildung 7.2 am Beispiel der Einlauf-länge und der Sturzsteifigkeit auf einen geringen physikalischen Zusammenhang hin. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird auf die grafische Analyse der Zusammenhänge zwischen allen weiteren FTC verzichtet und auf die Abbildungen von Anhang 40 bis Anhang 82 verwiesen.

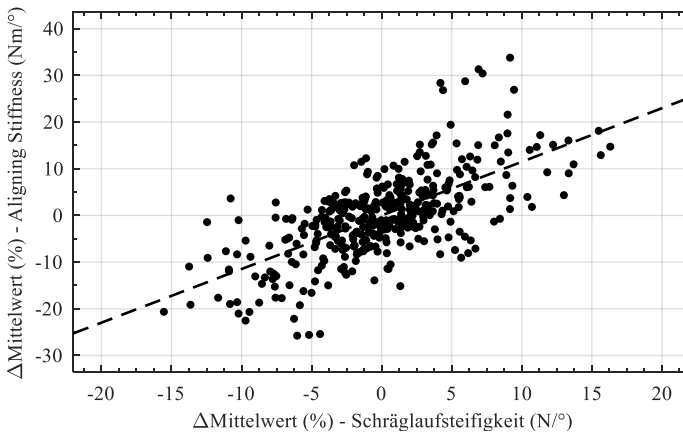


Abbildung 7.1: Beispiel zweier FTC mit starkem Zusammenhang

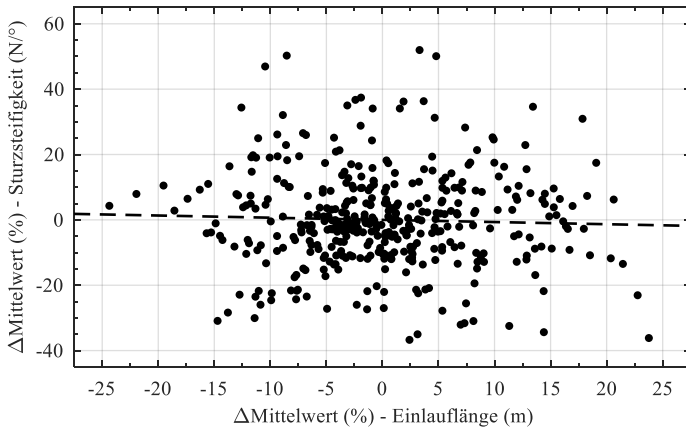


Abbildung 7.2: Beispiel zweier FTC mit geringem Zusammenhang

Neben der grafischen Analyse lassen sich mögliche Korrelationen darüber hinaus anhand der statistischen Kennzahlen des Regressionsmodells identifizieren. Hierfür sind in Tabelle 7.2 und Tabelle 7.3 zum einen die Regressionsparameter $a_0(i, j)$ und $a_1(i, j)$ der verschiedenen Näherungsmodelle aufgelistet. Dabei entsprechen die Zeilennamen jeweils der Zielgröße des Regressionsmodells aus Formel (7.1), während die Spaltenbezeichnungen die verschiedenen Einflussgrößen zuordnen. Tabelle 7.4 beinhaltet darüber hinaus die p-Werte zur Bewertung der statistischen Signifikanz (siehe Kapitel 2.6.4) der einzelnen Näherungen.

Tabelle 7.2: Regressionsparameter $a_0(i, j)$ (Zusammenhänge zwischen FTC)

		Einflussgrößen										
		Vertikalsteifigkeit (N/mm)	Schräglaufsteifigkeit (N/°)	Reibwert quer (-)	Einlauflänge (m)	Aligning Stiffness (Nm/°)	Sturzsteifigkeit (Nm/°)	Reibwert längs (N/N)	Bohrmoment (Nm/kN)	Rollwiderstand (N/kN)	Ersatzwert Körperschall (N)	
Zielgrößen	Vertikalsteifigkeit (N/mm)		0,00	-0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,54	-0,08	-0,01	-0,16
	Schräglaufsteifigkeit (N/°)	0,00		0,02	0,00	0,00	0,01	0,91	0,06	0,00	0,36	
	Reibwert quer (-)	0,00	0,01		0,00	0,00	-0,03	-0,22	0,00	0,00	0,15	
	Einlauflänge (m)	0,00	-0,02	0,00		0,00	-0,03	-2,11	0,00	0,05	0,53	
	Aligning Stiffness (Nm/°)	0,00	0,01	0,02	0,00		-0,06	-0,10	0,05	0,05	-0,36	
	Sturzsteifigkeit (N/°)	0,00	-0,02	0,08	0,00	0,03		3,41	0,20	-0,01	-1,93	
	Reibwert längs (N/N)	0,21	0,39	0,28	-0,36	-0,11	-0,51		0,34	-0,07	0,42	
	Bohrmoment (Nm/kN)	-0,05	0,00	-0,03	-0,02	-0,02	0,01	-0,59		-0,01	0,46	
	Rollwiderstand (N/kN)	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	2,15	0,07		0,21	
	Ersatzwert Körperschall (N)	1,57	1,34	1,63	1,60	1,54	1,70	7,62	0,57	0,00		

In Tabelle 7.2 wird deutlich, dass die Konstantanteile $a_0(i, j)$ der einzelnen Regressionsmodelle in den meisten Fällen Werte nahe Null aufweisen, weshalb die zugehörigen Ausgleichgeraden die y-Achse jeweils nahe des Koordinatenursprungs schneiden. Aus physikalischer Sicht deutet dies auf eine gute Kombinierbarkeit der verschiedenen FTC im Bereich um die jeweiligen Kategoriemittelwerte hin. Dieser Zusammenhang wird auch durch die Histogramme der Kapitel 4 bis Kapitel 6 belegt, wobei die Bereiche mit geringen Abweichungen von den einzelnen Kategoriemittelwerten bei allen FTC jeweils die höchsten Auftretenswahrscheinlichkeiten aufweisen.

Tabelle 7.3: Regressionsparameter $a_1(i, j)$ (Zusammenhänge zwischen FTC)

		Einflussgrößen									
		Vertikalsteifigkeit (N/mm)	Schräglaufsteifigkeit (N/°)	Reibwert quer (-)	Einlauflänge (m)	Aligning Stiffness (Nm/°)	Sturzsteifigkeit (N/°)	Reibwert längs (N/N)	Bohrmoment (Nm/kN)	Rollwiderstand (N/kN)	Ersatzwert Körperschall (N)
Zielgrößen	Vertikalsteifigkeit (N/mm)		0,08	-0,03	-0,36	-0,02	0,01	0,30	-0,13	0,07	0,03
	Schräglaufsteifigkeit (N/°)	0,08		0,05	0,07	0,38	0,11	-1,32	0,00	0,01	0,11
	Reibwert quer (-)	-0,01	0,01		-0,01	-0,04	0,02	0,53	0,17	0,03	-0,03
	Einlauflänge (m)	-0,92	0,18	-0,10		0,23	-0,02	-1,44	-0,11	-0,38	-0,31
	Aligning Stiffness (Nm/°)	-0,05	1,15	-0,33	0,27		0,19	-1,34	-0,18	-0,41	0,27
	Sturzsteifigkeit (N/°)	0,10	0,86	0,41	-0,07	0,51		0,49	-0,10	0,08	0,09
	Reibwert längs (N/N)	0,22	-0,46	1,45	-0,12	-0,34	0,11		0,46	0,03	-0,05
	Bohrmoment (Nm/kN)	-0,16	0,00	0,91	-0,07	-0,11	-0,02	1,45		0,15	-0,07
	Rollwiderstand (N/kN)	0,21	0,04	0,38	-0,50	-0,48	0,04	0,20	0,41		-0,01
	Ersatzwert Körperschall (N)	0,09	0,41	-0,71	-0,84	0,29	0,08	-0,93	-0,20	-0,02	

Tabelle 7.4: p-Werte der Regressionsmodelle (Zusammenhänge zwischen FTC)

		Einflussgrößen									
		Vertikalsteifigkeit (N/mm)	Schräglaufsteifigkeit (N/°)	Reibwert quer (-)	Einlauflänge (m)	Aligning Stiffness (Nm/°)	Sturzsteifigkeit (N/°)	Reibwert längs (N/N)	Bohrmoment (Nm/kN)	Rollwiderstand (N/kN)	Ersatzwert Körperschall (N)
Zielgrößen	Vertikalsteifigkeit (N/mm)		0,34	0,89	0,00	0,72	0,68	0,40	0,20	0,41	0,83
	Schräglaufsteifigkeit (N/°)	0,34		0,70	0,02	0,00	0,00	0,00	0,99	0,88	0,38
	Reibwert quer (-)	0,89	0,70		0,59	0,09	0,25	0,00	0,00	0,46	0,57
	Einlauflänge (m)	0,00	0,02	0,59		0,00	0,46	0,01	0,17	0,00	0,02
	Aligning Stiffness (Nm/°)	0,72	0,00	0,09	0,00		0,00	0,00	0,03	0,00	0,25
	Sturzsteifigkeit (N/°)	0,68	0,00	0,25	0,46	0,00		0,17	0,49	0,72	0,73
	Reibwert längs (N/N)	0,40	0,00	0,00	0,01	0,00	0,17		0,00	0,87	0,85
	Bohrmoment (Nm/kN)	0,20	0,99	0,00	0,17	0,00	0,49	0,00		0,09	0,63
	Rollwiderstand (N/kN)	0,41	0,88	0,46	0,00	0,00	0,72	0,87	0,09		0,96
	Ersatzwert Körperschall (N)	0,83	0,38	0,57	0,02	0,25	0,73	0,85	0,63	0,96	

Die in Tabelle 7.3 aufgelisteten Steigungsparameter $a_1(i, j)$ der Regressionsmodelle ermöglichen in Kombination mit den zugehörigen p-Werten aus Tabelle

7.4 die Identifikation starker Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichen FTC.

Anhand der p-Werte kann zunächst eingeordnet werden, inwiefern die Varianz eines FTC tatsächlich durch die ermittelte Regressionsgerade erfasst wird bzw. inwiefern der Verlauf der Regressionsgerade dem Ergebnis einer zufälligen Stichprobe gleicht. Basierend auf den Erläuterungen in Kapitel 2.6.4 wird dabei ein Signifikanzniveau von fünf Prozent als Obergrenze zur Annahme signifikanter Zusammenhänge verwendet.

Das Vorliegen eines signifikanten Näherungsmodells allein lässt jedoch noch keine Rückschlüsse auf die Stärke und Richtung einer möglichen Korrelation zu. Als weiteres Kriterium für eine Korrelation zweier FTC werden in diesen Fällen daher zusätzlich die Steigungsparameter $a_1(i, j)$ ausgewertet. Zur besseren Vergleichbarkeit der vorliegenden Einflüsse werden die Steigungsparameter dabei jeweils auf die in Kapitel 4 bis Kapitel 6 ermittelten Streuintervalle $[x_u, x_o]$ entsprechend $2 \cdot \sigma_\varphi$ bezogen. Für die normierten Steigungsparameter $a_{n,1}(i, j)$ gilt der Zusammenhang aus Formel (7.2). Die Parameter $x_{o,i}$, $x_{u,i}$, $x_{o,j}$ und $x_{u,j}$ entsprechen dabei den Intervallgrenzen der Streubereiche des jeweiligen FTC-Paares (siehe Kapitel 4, Kapitel 5, Kapitel 6).

$$a_{n,1}(i, j) = \frac{(x_{o,j} - x_{u,j})}{(x_{o,i} - x_{u,i})} \cdot a_1(i, j) \quad (7.2)$$

Die normierten Steigungsparameter $a_{n,1}(i, j)$ aller signifikanten Regressionsmodelle sind in Tabelle 7.5 zusammengefasst und werden im Folgenden unter Berücksichtigung der physikalischen Grundlagen plausibilisiert und interpretiert.

Tabelle 7.5: Normierte Regressionsparameter $a_{n,1}(i, j)$ signifikanter Näherungen

		Einflussgrößen										
		Vertikalsteifigkeit (N/mm)	Schräglaufsteifigkeit (N/°)	Reibwert quer (-)	Einlauflänge (m)	Aligning Stiffness (Nm/°)	Sturzsteifigkeit (N/°)	Reibwert längs (N/N)	Bohrmoment (Nm/kN)	Rollwiderstand (N/kN)	Ersatzwert Körperschall (N)	
Zielgrößen	Vertikalsteifigkeit (N/mm)						-0,56					
	Schräglaufsteifigkeit (N/°)					0,12	0,67	0,30	-3,73			
	Reibwert quer (-)								2,74	0,41		
	Einlauflänge (m)	-0,61	0,12				0,25		-2,58		-0,50	-0,53
	Aligning Stiffness (Nm/°)		0,66		0,24			0,31	-2,18	-0,13	-0,49	
	Sturzsteifigkeit (N/°)		0,30				0,31					
	Reibwert längs (N/N)		-0,16	0,28	-0,06	-0,21				0,22		
	Bohrmoment (Nm/kN)				0,37		-0,15		3,08			
	Rollwiderstand (N/kN)					-0,38	-0,41					
	Ersatzwert Körperschall (N)					-0,50						

Aus Tabelle 7.5 geht hervor, dass beim Vergleich verschiedener Reifen derselben Rad- und Reifendimensionen jeweils eine starke negative Korrelation zwischen der Vertikalsteifigkeit und der Einlauflänge vorliegt. Entsprechend den Erläuterungen aus 2.3.4.1 lässt sich dieser Zusammenhang durch den schnelleren Aufbau von Seitenkräften bei steifen Reifenkonstruktionen zurückführen.

Darüber hinaus deutet die statistische Analyse auf eine stark ausgeprägte, positive Korrelation zwischen der Schräglaufsteifigkeit und der Aligning Stiffness hin. Unter Berücksichtigung der Definition des Rückstellmoments als Produkt aus Seitenkraft und pneumatischem Reifennachlauf (siehe Kapitel 2.3.6.1) entspricht auch dieser Zusammenhang den physikalischen Erwartungen.

Die vorhandene Korrelation zwischen der Schräglaufsteifigkeit und der Einlauflänge weist ebenfalls ein positives Vorzeichen auf und entspricht damit der mathematischen Abschätzung nach Formel (2.26). Physikalisch lässt sich die Zunahme der Einlauflänge bei hohen Schräglaufsteifigkeiten durch die stärkeren erforderlichen Reifenverformungen begründen, welche zum Erreichen der höheren Seitenkräfte erforderlich sind (vergleiche Kapitel 2.3.4.3). Wegen der unmittelbaren Abhängigkeit von der Schräglaufsteifigkeit, weist auch die Aligning Stiffness eine positive Korrelation zur Einlauflänge auf.

Des Weiteren deutet die statistische Analyse auf eine positive Korrelation zwischen der Schräglaufsteifigkeit und der Sturzsteifigkeit hin. Nach den Erkenntnissen aus Kapitel 2.3.4.2 und Kapitel 2.3.7.2 lässt sich dieser Zusammenhang durch die unmittelbare Abhängigkeit beider FTC von der Quersteifigkeit des Reifens erklären. Darüber hinaus weist auch die Aligning Stiffness eine positive Korrelation zur Sturzsteifigkeit auf, was wiederum durch den physikalischen Zusammenhang zwischen Schräglaufsteifigkeit und Aligning Stiffness zu begründen ist.

Auffallend ist die negative Korrelation zwischen der Schräglaufsteifigkeit und dem maximalen Reibwert in Längsrichtung. Nach den Erläuterungen in Kapitel 2.3.4.2 und 2.3.5.2 werden beide Größen sowohl durch eine große Aufstandsfläche wie auch durch steife Reifenkonstruktionen begünstigt. Zur Sicherstellung eines guten Nässeverhaltens ist davon auszugehen, dass der Profilnegativanteil bei konstruktiven Anpassungen der Reifensteifigkeit in Längs- oder Querrichtung nur geringfügig verändert werden darf. Entsprechend würde die Erhöhung der Schräglaufsteifigkeit durch Verwendung breiter und quersteifer Profilelemente zwangsläufig zu stärkeren Verformungen des Reifens in Längsrichtung führen. Den Erläuterungen in Kapitel 2.3.5.2 zufolge wäre dies wiederum mit einer inhomogeneren Beanspruchung der Latschfläche und einer Abnahme des maximalen Reibwerts in Längsrichtung verbunden. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass der maximale Reibwert in Längsrichtung durch die Verwendung weicher Gummimischungen verbessert werden kann, wodurch die Quersteifigkeit des Reifens jedoch gleichzeitig abnehmen würde. Dieser Zusammenhang wäre eine weitere mögliche Ursache für die negative Korrelation zwischen der Schräglaufsteifigkeit und dem maximalen Reibwert in Längsrichtung innerhalb der statistischen Analyse. Aufgrund des physikalischen Zusammenhangs mit der Schräglaufsteifigkeit liegt auch zwischen der Aligning Stiffness und dem maximalen Reibwert in Längsrichtung eine negative Korrelation vor. Ebenso weisen die zwischen der Einlauflänge und dem maximalen Reibwert in Längsrichtung vorliegenden Regressionsparameter ein negatives Vorzeichen auf, was Formel (2.26) zufolge auf die geringere Einlauflänge bei niedrigen Schräglaufsteifigkeiten zurückzuführen ist.

Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.3.4.2, Kapitel 2.3.5.2 und Kapitel 2.5 werden sowohl die maximal übertragbaren Längskräfte wie auch die maximalen Seitenkräfte maßgeblich durch die Gummimischung sowie durch die Homogenität der Bodendruckverteilung beeinflusst. Die vergleichbaren Wirkketten führen auch innerhalb der statistischen Analyse zu einer positiven Korrelation zwischen den maximalen Reibwerten in Längs- und Querrichtung.

Nach den Erläuterungen in Kapitel 2.3.4.2 und Kapitel 2.3.5.2 führen große und homogen belastete Aufstandsflächen grundsätzlich zu hohen maximalen Reibwerten in Längs- und Querrichtung. Gleichzeitig kommt es dabei zu einer Erhöhung des radlastnormierten Bohrmoments bei der Rotation des Reifens um seine Hochachse im Stand (siehe Kapitel 2.3.6.2 und Kapitel 2.3.6.3). Die Größe der Aufstandsfläche sowie der Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn sind innerhalb der Konstruktionsphase eines Reifens daher die wichtigsten Stellgrößen zur Beeinflussung des Bohrmoments. Folglich deutet auch die statistische Analyse der Zusammenhänge zwischen FTC auf eine positive Korrelation der maximalen Reibwerte in Längs- und Querrichtung mit dem auf die Radlast normierten Bohrmoment hin.

Den Regressionparametern zufolge liegt ein negativ korrelierter Zusammenhang zwischen der Aligning Stiffness und dem radlastbezogenen Bohrmoment vor. Basierend auf den Erläuterungen der Kapitel 2.3.4.2 und Kapitel 2.3.6.3 erscheint dieser Zusammenhang zunächst nicht plausibel. Sowohl eine große Aufstandsfläche wie auch hohe Steifigkeiten des Reifens sollten demnach in beiden Fällen zu einer Erhöhung der Aligning Stiffness bzw. des radlastbezogenen Bohrmoments führen. Im Falle des Bohrmoments überwiegt jedoch die Wirkung der veränderten Latschfläche, was aus der tendenziellen Abnahme des radlastbezogenen Bohrmoments mit steigender Vertikalsteifigkeit (siehe Anhang 46) hervorgeht. Im Falle der Aligning Stiffness scheinen sich die beiden Effekte hingegen teilweise zu kompensieren, was an der nicht signifikanten Veränderung der Aligning Stiffness mit zunehmender Vertikalsteifigkeit (siehe Anhang 43) erkennbar ist. Die beschriebenen Effekte führen in Summe zu einer gegenläufigen Korrelation zwischen der Aligning Stiffness und dem radlastbezogenen Bohrmoment. Eine weitere Ursache für die negative Korrelation zwischen der Aligning Stiffness und dem radlastbezogenen Bohrmoment basiert möglicherweise auf Einflüssen der

Gummimischung auf diese beiden FTC. So ist die Verwendung weicher Gummimischungen einerseits mit hohen Reibwerten bzw. Bohrmomenten verbunden. Gleichzeitig führen weiche Gummimischungen jedoch auch zu einer Abnahme der Quersteifigkeit des Reifens und damit, nach Formel (2.30), wiederum zu einer Verringerung der Aligning Stiffness.

Den Erläuterungen in Kapitel 2.5 zufolge wirken sich hohe Steifigkeiten des Reifens vorteilhaft auf einen niedrigen Rollwiderstand aus. Als Grund hierfür wird die niedrigere Walkarbeit bei geringen Verformungen des Reifens genannt. Dieser Zusammenhang erscheint insbesondere bei Anpassungen des Fülldrucks oder bei unterschiedlichen Reifenkonstruktionen mit vergleichbarem Materialeinsatz plausibel. Im Falle der vorliegenden Arbeit deutet die statistische Auswertung der Messdaten hingegen auf eine tendenzielle Zunahme des Rollwiderstandsbeiwerts mit steigender Vertikalsteifigkeit hin (siehe Anhang 47). Es ist davon auszugehen, dass die höhere Vertikalsteifigkeit der betrachteten Reifen durch einen verstärkten Materialeinsatz realisiert wurde, was unter Berücksichtigung der physikalischen Grundlagen nach Kapitel 2.2.1 in der Regel zu höheren Dämpfungskräften und stärkeren Walkverlusten führt. Damit erscheint auch die signifikante negative Korrelation zwischen Rollwiderstand und Einlauflänge sowie zwischen Rollwiderstand und Aligning Stiffness plausibel. Hohe Steifigkeiten des Reifens führen einerseits zu einem schnelleren zeitlichen Kraftaufbau des Reifens sowie zu einer Verringerung des pneumatischen Reifennachlaufs. Gleichzeitig steigen jedoch die Dämpfungskräfte beim Abrollen und damit der Rollwiderstandsbeiwert an.

Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.3.4.2 führt eine hohe Quersteifigkeit des Reifens einerseits zu einem geringen zeitlichen Verzug beim Aufbau von Seitenkräften. Gleichzeitig ist dies jedoch mit einer Verschlechterung des Komfortverhaltens auf rauer Fahrbahn verbunden (siehe Kapitel 2.4.3.2). Die negative Korrelation zwischen dem vibroakustischen Ersatzwert und der Einlauflänge des Reifens entspricht damit den physikalischen Erwartungen.

Der in Kapitel 2.5 erläuterte Zielkonflikt zwischen dem Rollwiderstand und dem Haftungsverhalten des Reifens wird durch die Messdaten der vorliegenden Arbeit nicht bestätigt. Eine mögliche Erklärung liegt in der Tatsache, dass die größere Hysteresereibung stark dämpfender Gummimischungen insbesondere bei

Nässe positiven Einfluss auf das maximale Kraftübertragungsverhalten hat. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit betrachteten Reibwerte werden hingegen auf trockenem Untergrund am Flachbahnprüfstand ermittelt. Darüber hinaus wird bereits in vorhergehenden Kapiteln vermutet, dass die unterschiedlichen Eigenschaften der vorliegenden Datenbasis stärker auf konstruktiven Maßnahmen als auf Unterschieden der Gummimischungen beruhen. Es erscheint daher plausibel, dass auch das Kraftübertragungsverhalten des Reifens auf trockener Fahrbahn ohne signifikante Verschlechterung des Rollwiderstandsbeiwerts optimiert werden kann.

7.2 Fazit

In den vorhergehenden Kapiteln werden zunächst die durch unterschiedliche Reifenkonstruktionen oder Gummimischungen hervorgerufenen Veränderungen eines FTC objektiv erfasst. Hierfür werden innerhalb jeder Kombination aus Rad- und Reifendimension zunächst die relativen Abweichungen jedes FTC vom zugehörigen Mittelwert aller innerhalb dieser Dimensionskombination vorliegenden Messwerte berechnet. Die zwischen den verschiedenen FTC vorliegenden Zusammenhänge werden daraufhin anhand einer Regressionsanalyse jeweils paarweise ausgewertet.

Die Ergebnisse der statistischen Analyse entsprechen dabei größtenteils den physikalischen Erwartungen, wobei die vorhandenen Korrelationen in den meisten Fällen auf unterschiedliche Reifensteifigkeiten sowie auf Veränderungen der Reifenaufstandsfläche zurückzuführen sind. Hohe Steifigkeiten des Reifens haben demnach positiven Einfluss auf einen geringen zeitlichen Verzug beim Aufbau von Reifenkräften, während die Spurrillenempfindlichkeit sowie das Geräuschverhalten auf rauer Fahrbahn nachteilig beeinflusst werden. Die negative Korrelation zwischen der Schräglaufsteifigkeit und dem maximalen Reibwert in Längsrichtung deutet des Weiteren darauf hin, dass eine unabhängige Optimierung des Kraftübertragungsverhaltens in Längs- und Querrichtung nicht möglich ist. Darüber hinaus wird deutlich, dass hohe Reibwerte des Reifens grundsätzlich

zu einer Erhöhung der Widerstandskräfte beim Lenken im Stand führen. Bei Erhöhung der Reifensteifigkeit durch verstärkten Materialeinsatz ist von einer Zunahme der Walkverluste und des Rollwiderstandsbeiwerts auszugehen.

Der auf Basis der Erkenntnisse vorhergehender Untersuchungen zu erwartende Zielkonflikt zwischen dem Haftungspotential und dem Rollwiderstandsbeiwert wird durch die Datenbasis der vorliegenden Arbeit nicht bestätigt. Der geringere Hystereseanteil bei Reibwertmessungen auf trockenem Untergrund wird als mögliche Ursache für diesen Widerspruch angenommen. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass ein geringer Rollwiderstand erhalten bleiben kann, sofern Optimierungen des Reibwerts auf trockener Fahrbahn durch Anpassungen der Reifenkonstruktion bei unveränderter Gummimdämpfung erfolgen.

8 Lösungsräume

In den vorhergehenden Kapiteln werden die Auswirkungen der Dimensionen von Rad und Reifen sowie der Betriebsbedingungen auf verschiedene FTC der Eigenschaftsbereiche Energieeffizienz, Fahrdynamik und Vibroakustik statistisch analysiert. Neben der physikalischen Interpretation der Einflussparameter werden hierbei Näherungsmodelle entwickelt, mit welchen realisierbare FTC-Bereiche auf Basis der Messdaten vergangener Reifenentwicklungen prognostiziert werden können. Unter Verwendung dieser Näherungsmodelle wird im folgenden Abschnitt eine Methode vorgestellt, welche die Ermittlung optimaler Dimensionsbereiche von Rad und Reifen für spezifische Anwendungsfälle und damit eine umgekehrte Betrachtung der Wirkketten ermöglicht.

8.1 Anwendungsfall

Die Vorgehensweise zur Ermittlung optimaler Dimensionsbereiche von Rad und Reifen wird in den folgenden Kapiteln am Beispiel eines durchschnittlichen Fahrzeugs der Mittelklasse veranschaulicht. Hierfür werden zunächst die zugehörigen Randbedingungen definiert. Anschließend werden beispielhafte Anforderungen an die FTC verschiedener Eigenschaftsbereiche festgelegt sowie die daraus resultierenden Lösungsräume aufgezeigt und interpretiert.

Die schrittweise Eingrenzung des Lösungsraums ist in den Abbildungen von Anhang 83 bis Anhang 108 ganzheitlich dargestellt. Bereits als unzulässig identifizierte Bereiche des Lösungsraums werden in allen darauffolgenden Abbildungen dabei jeweils in grauer Farbe gekennzeichnet.

8.1.1 Randbedingungen

Im Gegensatz zu den Dimensionen von Rad und Reifen sind die Betriebsbedingungen in Form von Radlast und Fülldruck üblicherweise keine Größen, welche

im Rahmen der Grundausslegung als Optimierungsparameter zur Verfügung stehen. Vielmehr wird die Radlast unmittelbar durch die jeweiligen Fahrzeugeigenschaften vorgegeben und der Fülldruck entsprechend den Mindestanforderungen nach (The European Tyre and Rim Technical Organisation, 2018) berechnet. Zur Einhaltung der zulässigen Toleranzen des Tachometers sollten die verschiedenen Rad- und Reifendimensionen eines Portfolios dabei grundsätzlich vergleichbare Außendurchmesser aufweisen. Des Weiteren ist der Reifendurchmesser für das äußere Erscheinungsbild eines Fahrzeugs von großer Bedeutung und wird daher in der Regel zu Beginn der Konzeptphase festgelegt. Hierbei wird darauf geachtet, dass die später berechneten Mindestfülldrücke des gesamten Portfolios im mittleren Bereich liegen. Auf diese Weise sollen effizienz-, fahrdynamik- und komfortrelevante Nachteile bei besonders hohen oder besonders niedrigen Fülldrücken vermieden werden.

Aufgrund der erläuterten Zusammenhänge werden die Radlast, der Fülldruck sowie der Außendurchmesser des Reifens auch im beispielhaften Anwendungsfall der vorliegenden Arbeit als Randbedingungen festgelegt. Die einzelnen Parameter sind in Tabelle 8.1 zusammengefasst und repräsentieren realistische Werte eines durchschnittlichen Mittelklassefahrzeugs.

Tabelle 8.1: Randbedingungen des beispielhaften Anwendungsfalls

Parameter	Wert
Radlast	$F_z = 5300 \text{ N}$
Fülldruck	$p_i = 2,5 \text{ bar}$
Reifenaußendurchmesser	$D_R = 660 \text{ mm}$

8.1.2 Optimale Dimensionen von Rad und Reifen

Ausgehend von den zuvor festgelegten Randbedingungen verbleiben die Reifenbreite, der Felgendurchmesser sowie die Felgenmaulweite im vorliegenden Anwendungsfall als mögliche Optimierungsparameter. Zur Ermittlung optimaler Dimensionsbereiche werden die Näherungsmodelle der Wirkketten bezüglich Energieeffizienz (siehe Kapitel 4), Fahrdynamik (siehe Kapitel 5) und Vibroakustik (siehe Kapitel 6) in eine bereits vorhandene Software zur Visualisierung von Lösungsräumen (siehe Kapitel 2.6.6 und Kapitel 3.2) eingebunden. Hierbei wird zunächst eine hohe Anzahl an Kombinationen unterschiedlicher Reifenbreiten, Felgendurchmesser und Felgenmaulweiten anhand eines Monte Carlo Samplings generiert. Die einzelnen Datenpunkte werden daraufhin in mehreren zweidimensionalen Diagrammen mit jeweils 12.000 Datenpunkten dargestellt. Anhand der bekannten Wirkketten werden zu jedem der Samplingpunkte alle für die unterschiedlichen Eigenschaftsbereiche relevanten Funktionsgrößen berechnet und in Abhängigkeit von der jeweiligen Zielerreichung farblich gekennzeichnet. Die für den vorliegenden Anwendungsfall geeigneten Dimensionsbereiche von Rad und Reifen werden auf diese Weise anhand der farblichen Grenzlinien sichtbar.

Die in Kapitel 4 bis Kapitel 6 entwickelten Näherungsmodelle beziehen sich jeweils auf den mittleren FTC-Wert innerhalb einer bestimmten Dimensionskombination von Rad und Reifen. Die infolge unterschiedlicher Reifenkonstruktionen und Gummimischungen auftretenden Streuungen werden darüber hinaus anhand von Histogrammen quantifiziert. Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 7.1.2 liegt die höchste Auftretenswahrscheinlichkeit bei allen FTC dabei in Bereichen nah des Mittelwerts aller Messwerte der entsprechenden Dimensionskombinationen. Es wird daher von einer guten Kombinierbarkeit aller FTC im Bereich um diese Kategoriemittelwerte ausgegangen. Basierend auf dieser Annahme beziehen sich auch die im Rahmen dieser Arbeit zur Visualisierung von Lösungsräumen herangezogenen Näherungsmodelle ausschließlich auf die jeweiligen Kategoriemittelwerte. Trotz weiterer Einflussmöglichkeiten durch Anpassungen der Reifenkonstruktion oder der Gummimischung, bilden die auf diese Weise ermittelten Dimensionskombinationen die Grundlage für eine eigenschaftsübergreifende Zielerfüllung.

Es ist zu beachten, dass die Ermittlung von Lösungsräumen grundsätzlich iterativ und anhand von mehreren, jeweils zweidimensionalen Darstellungen parallel erfolgt. Dabei werden die Werte der einzelnen Optimierungsparameter jeweils in Richtung jener Wertebereiche variiert, welche der farblichen Kennzeichnung zufolge eine hohe Zielerfüllung versprechen. Anschließend wird jeweils ein neues Punktesampling erzeugt, um die Zielerfüllung erneut zu validieren. Dieser Prozess wird so lange durchgeführt, bis ein möglichst großer Lösungsraum identifiziert wird. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist die Darstellung mehrerer Iterationen im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Die Abbildungen der Kapitel 8.1.2.1 bis Kapitel 8.1.2.5 beziehen sich daher bereits auf eine mögliche Lösung der Reifenbreite 225 mm, dem Felgendurchmesser 18 Zoll sowie der Felgenmaulweite 7,5 Zoll. Ist eine der Größen nicht als Achsenbeschriftung zu einem dargestellten Lösungsraum enthalten, wird diese innerhalb des zugrundeliegenden Monte Carlo Samplings demnach nicht variiert.

8.1.2.1 Tragfähigkeit

Zur Gewährleistung einer ausreichenden Tragfähigkeit in allen Beladungszuständen wird für die Tragfähigkeitskennzahl (siehe Kapitel 2.1.3.1) im betrachteten Anwendungsfall der Zielbereich entsprechend Tabelle 8.2 gefordert.

Tabelle 8.2: Anforderungen Tragfähigkeit

FTC	Zielbereich
Tragfähigkeitskennzahl	$93 \leq I_{R,LI} \leq 99$

Der bei dem vorgegebenen Reifenaußendurchmesser von 660 mm verbleibende Lösungsraum hinsichtlich Reifenbreite und Felgendurchmesser wird in Abbildung 8.1 in grüner Farbe sichtbar. Der entsprechende Lösungsraum im Bezug auf Felgendurchmesser und Felgenmaulweite ist in Abbildung 8.2 dargestellt.

Die Tragfähigkeitskennzahlen $I_{R,LI}$ der einzelnen Samplingpunkte werden durch Interpolation innerhalb der Tabellen aus (The European Tyre and Rim Technical

Organisation, 2018) bestimmt und beziehen sich jeweils auf die Verwendung von Extra Load-Reifen (siehe Kapitel 2.1.3.1). Im Falle von Reifendimensionen, welche nicht in den Tabellen aus (The European Tyre and Rim Technical Organisation, 2018) enthalten sind, wird eine Tragfähigkeitszahl von $I_{R,LI} = -\infty$ angenommen, um diese aus der Menge möglicher Lösungen zu eliminieren.

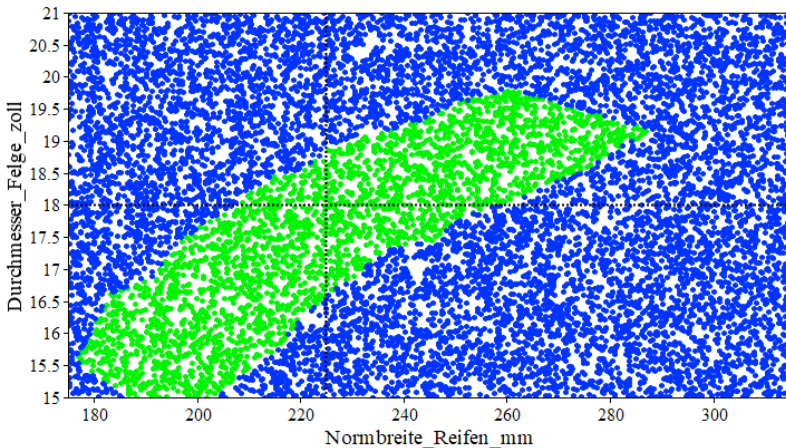


Abbildung 8.1: Lösungsraum Tragfähigkeit ($B_F = 7,5''$)

In Abbildung 8.1 wird deutlich, dass zur Einhaltung der Tragfähigkeitsanforderung entweder schmale Reifen mit kleinen Felgendurchmessern oder breite Reifen mit großen Felgendurchmessern kombiniert werden können. Sowohl die Verringerung der Reifenbreite bei konstantem Felgendurchmesser wie auch die Erhöhung des Felgendurchmessers bei unveränderter Reifenbreite werden durch die untere Grenze der Tragfähigkeitsanforderung begrenzt. Entsprechend werden die Erhöhung der Reifenbreite bei gleichbleibendem Felgendurchmesser sowie die Verringerung des Felgendurchmessers bei konstanter Reifenbreite durch die obere Grenze der Tragfähigkeitsanforderung eingeschränkt. Reifendimensionen im Bereich der oberen und unteren Achsenlimitierungen von Abbildung 8.1 sind in den Tabellen aus (The European Tyre and Rim Technical Organisation, 2018)

nicht enthalten und stehen damit ebenfalls nicht als mögliche Lösung zur Verfügung.

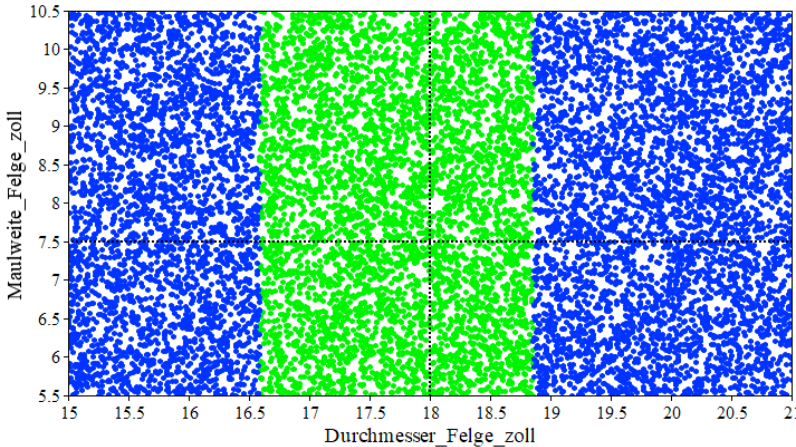


Abbildung 8.2: Lösungsraum Tragfähigkeit ($B_{R,N} = 225 \text{ mm}$)

Nach den Erläuterungen in Kapitel 2.1.3.1 hat die Felgenmaulweite keinen Einfluss auf die Tragfähigkeit des Reifens. Der in Abbildung 8.2 erkennbare Bereich möglicher Felgendurchmesser ist daher unabhängig von der Felgenmaulweite.

8.1.2.2 Energieeffizienz

Zur Eingrenzung der Lösungsräume hinsichtlich effizienzrelevanter Eigenschaften werden im Folgenden der Rollwiderstandsbeiwert auf horizontaler Fahrbahn sowie die aerodynamischen und trägheitsspezifischen Eigenschaften von Rad und Reifen betrachtet. Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.2.2.1 ergibt sich der Luftwiderstand grundsätzlich aus der Umströmung des gesamten Fahrzeugs, wodurch eine Aufteilung des Gesamtwiderstands in die Beiträge einzelner Komponenten nicht möglich ist. Sowohl die Ersatzmasse wie auch der Luftwiderstandsbeiwert werden im vorliegenden Beispiel daher als Abweichung gegenüber einer besonders effizienten Dimensionskombination (205 / 55 R 16 6,5 J)

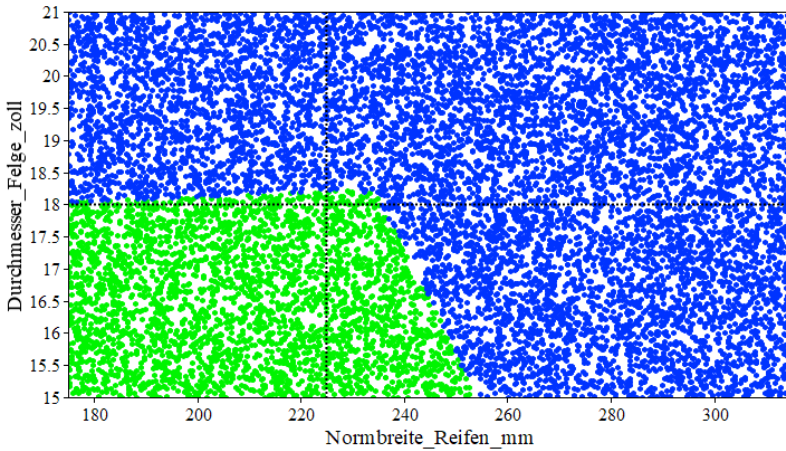
angegeben. Die Angabe bezieht sich dabei jeweils auf die Verwendung der jeweiligen Dimension an allen vier Kompletträdern des Gesamtfahrzeugs. In Tabelle 8.3 sind die für den beispielhaften Anwendungsfall geforderten Zielbereiche zusammengefasst.

Tabelle 8.3: Anforderungen Energieeffizienz

FTC	Zielbereich
Rollwiderstand Ebene	$c_{R,E} \leq 8 \text{ N/kN}$
Delta Luftwiderstandsbeiwert	$\Delta c_w^* \leq 0,02$
Delta Ersatzmasse	$\Delta m_E \leq 25 \text{ kg}$

In Abbildung 8.3 und Abbildung 8.4 sind die unter Berücksichtigung aller effizienzrelevanten Vorgaben verbleibenden Lösungsräume hinsichtlich Rad- und Reifendimensionen dargestellt. Für die durch die einzelnen Anforderungen hervorgerufenen Einschränkungen sei auf die Abbildungen von Anhang 85 bis Anhang 90 verwiesen.

Zur Näherung des Rollwiderstandsbeiwerts der einzelnen Samplingpunkte wird das in 4.1.3 erzeugte KNN verwendet. Die aerodynamischen und trägheitsrelevanten Eigenschaften werden jeweils anhand der in 2.2.2.2 und 2.2.3.2 erläuterten Zusammenhänge berechnet.

Abbildung 8.3: Lösungsraum Energieeffizienz ($B_F = 7,5''$)

In Abbildung 8.3 wird deutlich, dass die effizienzbezogenen Anforderungen bei der Verwendung breiter Reifen sowie bei großen Felgendurchmessern nicht eingehalten werden können. Auf eine detaillierte Interpretation der physikalischen Ursachen wird an dieser Stelle verzichtet und auf die ausführlichen Erläuterungen in Kapitel 4.1.2, Kapitel 2.2.2.2 und Kapitel 2.2.3.2 verwiesen.

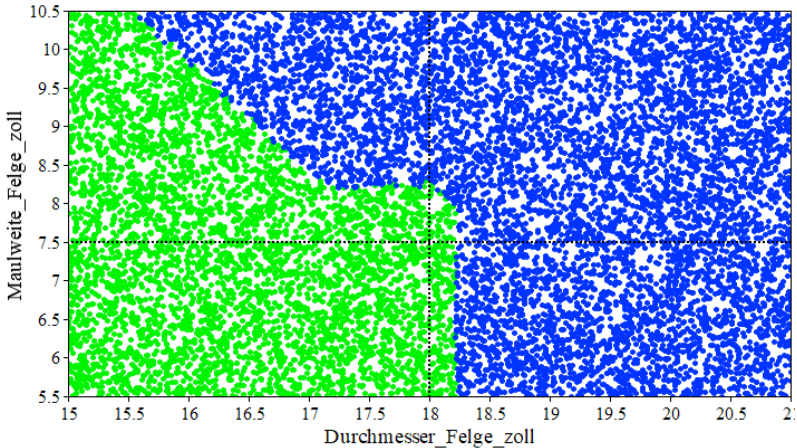


Abbildung 8.4: Lösungsraum Energieeffizienz ($B_{R,N} = 225 \text{ mm}$)

Der negative Einfluss hoher Felgendurchmesser auf die Energieeffizienz des Gesamtfahrzeugs wird auch durch Abbildung 8.4 bestätigt. Darüber hinaus wird deutlich, dass der verfügbare Lösungsraum in Richtung hoher Maulweiten reduziert wird. Zum Verständnis der physikalischen Ursachen sei auch hierbei auf die Erläuterungen in Kapitel 4.1.2, Kapitel 2.2.2.2 und Kapitel 2.2.3.2 hingewiesen.

8.1.2.3 Fahrdynamik

Für die FTC des Eigenschaftsbereichs Fahrdynamik werden im vorliegenden Beispiel die in Tabelle 8.4 dargestellten Anforderungen festgelegt. Diese charakterisieren neben der Vertikal-, Quer- und Längsdynamik auch die Lenkungs-kräfte sowie das Spurrillenverhalten des Gesamtfahrzeugs (siehe Kapitel 2.3).

Tabelle 8.4: Anforderungen Fahrdynamik

FTC	Zielbereich
Vertikalsteifigkeit	$250 \text{ N/mm} \leq c_{R,z} \leq 290 \text{ N/mm}$
Schräglaufsteifigkeit	$c_{\alpha} \geq 1700 \text{ N/}^{\circ}$
Reibwert quer	$\mu_{y,max} \geq 1,1$
Einlauflänge	$\sigma_l \leq 0,7 \text{ m}$
Reibwert längs	$\mu_{x,max} \geq 1,25$
Aligning Stiffness	$70 \text{ Nm/}^{\circ} \leq A_{\alpha} \leq 90 \text{ Nm/}^{\circ}$
Bohrmoment	$M_{B,n} \leq 75 \text{ Nm/kN}$
Sturzsteifigkeit	$c_{\gamma} \leq 110 \text{ N/}^{\circ}$

Zur Näherung der fahrdynamisch relevanten FTC werden die KNN aus Kapitel 5.1.3, Kapitel 5.2.3, Kapitel 5.3.3, Kapitel 5.4.3 und Kapitel 5.5.3 verwendet. Die unter Vorgabe aller in Tabelle 8.4 aufgeführten Zielbereiche verbleibenden Lösungsräume sind in Abbildung 8.5 und Abbildung 8.6 visualisiert. Die entsprechenden Einschränkungen der einzelnen FTC gehen aus Anhang 91 bis Anhang 106 hervor.

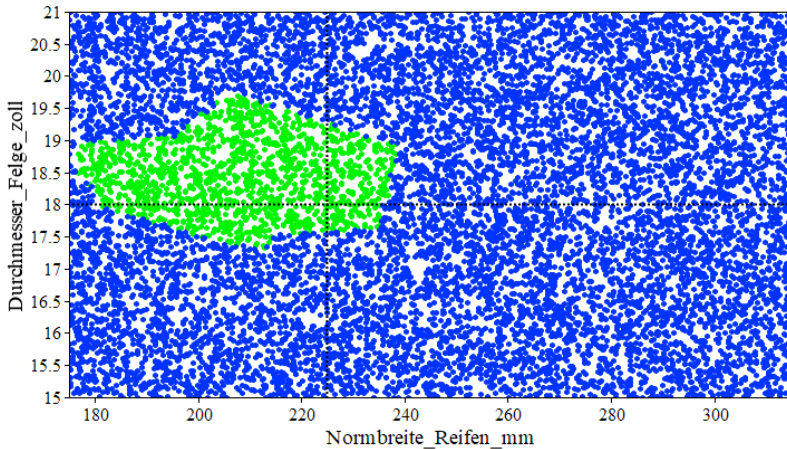
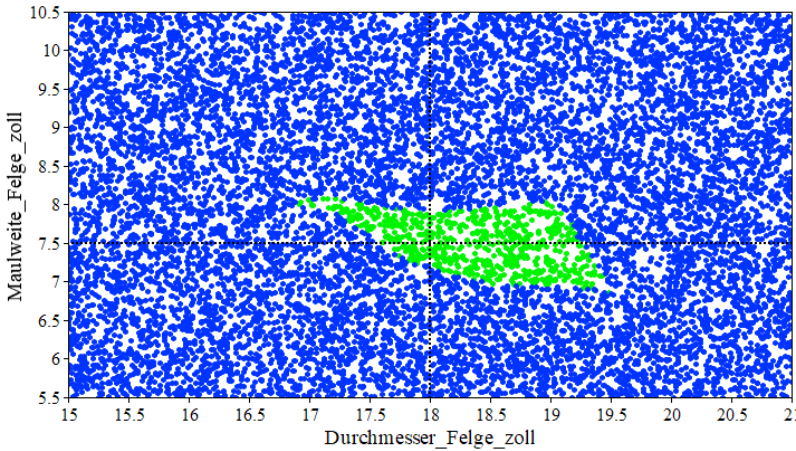


Abbildung 8.5: Lösungsraum Fahrodynamik ($B_F = 7,5''$)

Abbildung 8.5 zeigt, dass es keine allgemein gültige Maßnahme zur Vergrößerung des Lösungsraums bezüglich aller fahrdynamisch relevanten Anforderungen gibt. Vielmehr wird der vorhandene Lösungsraum von allen Seiten durch die geforderten Zielbereichsgrenzen eingeschränkt. Zur Interpretation der physikalischen Ursachen sei auf die umfassenden Erläuterungen in Kapitel 5.1.2, Kapitel 5.2.2, Kapitel 5.3.2, Kapitel 5.4.2 und Kapitel 5.5.2 verwiesen.

Abbildung 8.6: Lösungsraum Fahrdynamik ($B_{R,N} = 225 \text{ mm}$)

Ebenso wie im Falle der Reifenbreite und des Felgendurchmessers gibt es auch im Bezug auf die Felgenmaulweite keine allgemeine Empfehlung zur gleichzeitigen Optimierung aller fahrdynamisch relevanten FTC. Dies geht aus den Grenzlinien des in Abbildung 8.6 dargestellten Lösungsraums hervor. Grundsätzlich ist jedoch festzuhalten, dass der Lösungsraum möglicher Felgenmaulweiten in Richtung großer Felgendurchmesser geringfügig zunimmt. Zur physikalischen Interpretation werden wiederum die Erläuterungen in Kapitel 5.1.2, Kapitel 5.2.2, Kapitel 5.3.2, Kapitel 5.4.2 und Kapitel 5.5.2 empfohlen.

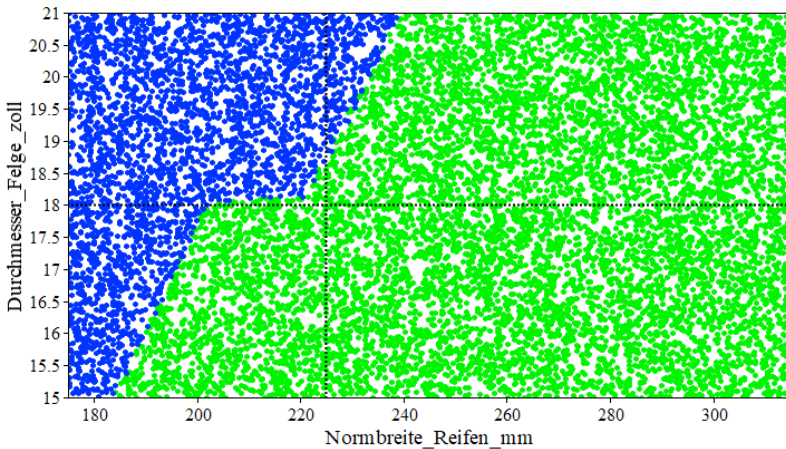
8.1.2.4 Vibroakustik

Um das Innenraumgeräusch auf rauer Fahrbahn gering zu halten, wird im vorliegenden Anwendungsfall die in Tabelle 8.5 definierte Begrenzung des vibroakustischen Ersatzwerts (siehe 2.4.3.1) gefordert.

Tabelle 8.5: Anforderungen Vibroakustik

FTC	Zielbereich
Ersatzwert Körperschall	$F_{y,E} \leq 8 N$

Die unter dieser Vorgabe verbleibenden Lösungsräume sind in Abbildung 8.7 und Abbildung 8.8 dargestellt. Zur Berechnung des vibroakustischen Ersatzwerts der einzelnen Samplingpunkte wird jeweils das KNN aus Kapitel 6.1.3 herangezogen.

Abbildung 8.7: Lösungsraum Vibroakustik ($B_F = 7,5''$)

In Abbildung 8.7 ist ersichtlich, dass sowohl die Erhöhung des Felgendurchmessers bei konstanter Reifenbreite wie auch die Verringerung der Reifenbreite bei gleichbleibendem Felgendurchmesser durch die Anforderung an das vibroakustische Reifenverhalten begrenzt werden. Dieser Zusammenhang lässt sich auf die

höhere Quersteifigkeit des Reifens bei niedrigen Flankenhöhen und bei trapezförmigen Reifenkonturen begründen. Für weiterführende Erläuterungen sei hierbei auf die Erklärungen in Kapitel 6.1.2 verwiesen.

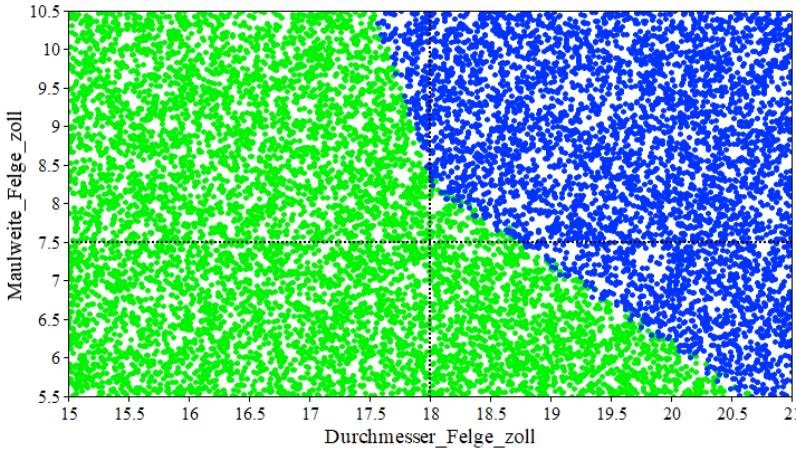
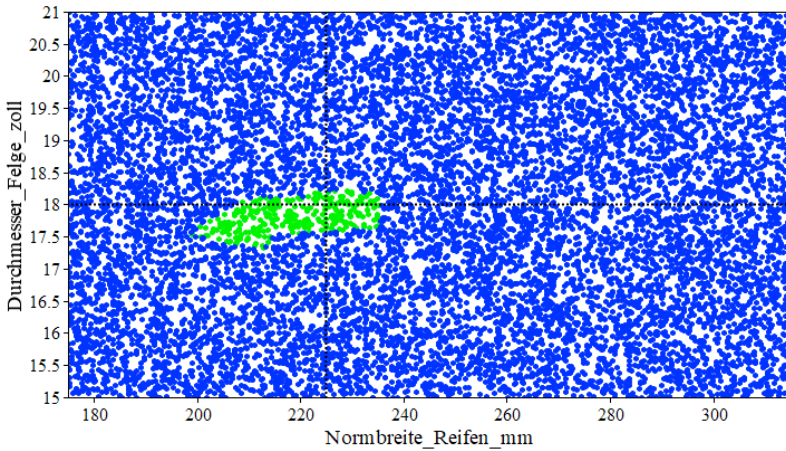
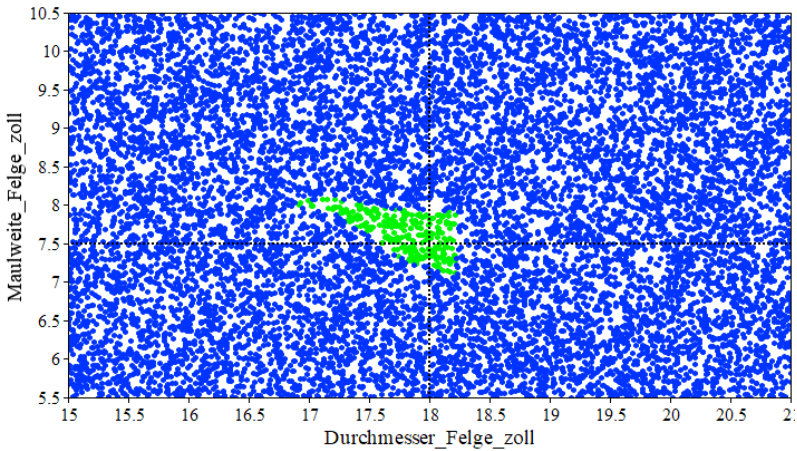


Abbildung 8.8: Lösungsraum Vibroakustik ($B_{R,N} = 225 \text{ mm}$)

Abbildung 8.8 zeigt den verfügbaren Lösungsraum hinsichtlich Felgendurchmesser und Felgenmaulweite. Es wird deutlich, dass die Menge möglicher Felgenmaulweiten bei kleinen Felgendurchmessern zunimmt. Ebenso führt die Verringerung der Felgenmaulweite zu einer Vergrößerung des Lösungsraums in Richtung großer Felgendurchmesser. Beide Zusammenhänge sind auf die jeweils geringeren Quersteifigkeiten des Reifens zurückzuführen. Die dabei vorliegenden Zusammenhänge werden in Kapitel 6.1.2 ausführlich diskutiert.

8.1.2.5 Kombiniertes Lösungsraum

Abbildung 8.9 und Abbildung 8.10 zeigen die unter Berücksichtigung der Anforderungen aller Eigenschaftsbereiche verbleibenden Lösungsräume.

Abbildung 8.9: Lösungsraum kombiniert ($B_F = 7,5''$)Abbildung 8.10: Lösungsraum kombiniert ($B_{R,N} = 225 \text{ mm}$)

Beide Abbildungen verdeutlichen, dass weder im Falle der Reifendimension noch bezüglich der Raddimension einheitliche Maßnahmen zur gleichzeitigen

Verbesserung aller Anforderungen vorliegen. In beiden Fällen wird der verfügbare Lösungsraum von allen Seiten begrenzt.

8.2 Fazit

Anhand des gezeigten Anwendungsfalls kann die in Kapitel 2.6.6 vorgestellte Methodik zur Ermittlung von Lösungsräumen am Beispiel eines durchschnittlichen Mittelklassefahrzeugs anschaulich dargestellt werden. Die in Kapitel 4 bis Kapitel 6 quantifizierten Wirkketten werden hierfür in eine vorhandene Software eingebunden und die möglichen Dimensionen von Rad und Reifen stückweise eingegrenzt. Dabei sind die in den vorherigen Kapiteln erläuterten physikalischen Zusammenhänge auch innerhalb der gezeigten Abbildungen an den Grenzlinien des jeweiligen Lösungsraums erkennbar. Grundsätzlich ist zu beachten, dass es bei der Berechnung von FTC-Werten in Dimensionsbereichen außerhalb der zugrundeliegenden Datenbasis zu Extrapolationsfehlern kommen kann. Nach den Erläuterungen in Kapitel 3.2 sollen diese Abweichungen durch die Verwendung von KNN mit nur einem Neuron möglichst gering gehalten werden.

Die Analyse der Lösungsräume zeigt, dass keine einheitlichen Maßnahmen zur gleichzeitigen Optimierung der Eigenschaften aller Themengebiete vorliegen. Vielmehr werden die jeweiligen Bereiche möglicher Rad- und Reifendimensionen von allen Seiten begrenzt. Es ist davon auszugehen, dass nicht bei jedem Anwendungsfall Lösungsräume identifiziert werden können. In solchen Fällen bietet die gezeigte Methode dennoch große Vorteile, indem die geforderten Zielbereiche anhand der vorliegenden Näherungsmodelle diskutiert werden können.

Die Näherungswerte der einzelnen Samplingpunkte beziehen sich im vorliegenden Anwendungsfall jeweils auf den mittleren FTC-Wert, welcher innerhalb der jeweiligen Dimensionskombination von Rad und Reifen zu erwarten ist. Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 8.1.2 können auf diese Weise Dimensionsbereiche ermittelt werden, welche eine gute Kombinierbarkeit der Anforderungen aller Eigenschaftsbereiche gewährleisten. Darüber wäre im Rahmen weiterführender Arbeiten denkbar, auch die Veränderungen durch unterschiedli-

che Reifenkonstruktionen und Gummimischungen zu berücksichtigen. Die statistische Analyse in Kapitel 7 könnte dabei als Grundlage zur Quantifizierung der Zusammenhänge dienen.

9 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine Methode zur Ermittlung optimaler Dimensionen von Rad und Reifen in der frühen Entwicklungsphase von Personenkraftwagen vorgestellt. Als Grundlage dienen dabei die sogenannten „Functional Tyre Characteristics“ (FTC), welche das Reifenverhalten unterschiedlicher Eigenschaftsbereiche durch objektive, an Prüfständen messbare Größen beschreiben.

Basierend auf den Erkenntnissen vorhergehender Arbeiten werden in Kapitel 2 zunächst die innerhalb der Eigenschaftsbereiche Energieeffizienz, Fahrdynamik und Vibroakustik relevanten FTC vorgestellt. Darüber hinaus werden die bekannten Einflüsse der Rad- und Reifendimension sowie der Betriebsbedingungen in Form von Radlast und Fülldruck auf die einzelnen FTC erläutert. Diese Zusammenhänge werden später in Kapitel 4, Kapitel 5 und Kapitel 6 quantifiziert, indem die Messdaten vorausgegangener Produktentwicklungen anhand von Regressionsmodellen ausgewertet werden. Die dimensionsspezifischen Eigenschaften von Rad und Reifen sowie die Radlast und der Fülldruck gehen dabei als lineare Einflussparameter erster Ordnung in das Regressionsmodell ein. Sowohl Richtung wie auch Stärke der einzelnen Einflüsse können daraufhin anhand der Regressionsparameter erfasst und hinsichtlich ihrer physikalischen Ursachen interpretiert werden. Die Ergebnisse der Regressionsmodelle entsprechen dabei weitestgehend den physikalischen Erwartungen und bestätigen damit die grundsätzliche Eignung der Regressionsmodelle zur Näherung der unterschiedlichen Reifeneigenschaften.

Mögliche nichtlineare Einflüsse können durch den linearen Ansatz erster Ordnung dennoch nicht erfasst werden, weshalb die FTC aller Eigenschaftsbereiche zusätzlich durch Künstliche Neuronale Netze (KNN) mit jeweils einem Neuron genähert werden. In den meisten Fällen unterscheidet sich die Näherungsgüte des KNN nur unwesentlich von der des Regressionsmodells, was auf eine hohe Linearität der vorliegenden Zusammenhänge hindeutet. In

Einzelfällen, wie beispielsweise der Aliging Stiffness, bietet die Verwendung des KNN jedoch deutliche Vorteile gegenüber dem linearen Regressionsansatz erster Ordnung.

Neben den Einflüssen der Rad- und Reifendimension sowie der Betriebsbedingungen werden die funktionalen Eigenschaften eines Reifens auch maßgeblich durch die Reifenkonstruktion und die verwendete Gummimischung beeinflusst. Die hierdurch hervorgerufenen Streuungen werden ebenfalls in Kapitel 4, Kapitel 5 und Kapitel 6 anhand von Histogrammen analysiert. Dabei wird deutlich, dass die innerhalb einer bestimmten Dimensionskombination von Rad und Reifen gemessenen FTC-Werte in den meisten Fällen entsprechend der Normalverteilung nach Gauß um den Mittelwert aller Messwerte dieser Dimensionkombination variieren. Die Auftretenswahrscheinlichkeit beliebiger Abweichungen kann daher mathemisch beschrieben und die zugehörigen Streuungsintervalle auf diese Weise berechnet werden. Hierbei fällt auf, dass sich die Streubreiten der unterschiedlichen FTC teilweise deutlich unterscheiden. Die physikalische Interpretation dieser Beobachtung deutet darauf hin, dass innerhalb der betrachteten Datenbasis größere Unterschiede zwischen den Konstruktionen der verschiedenen Reifen als zwischen den jeweiligen Gummimischungen vorliegen. Diese Vermutung wird auch mehrfach an anderen Stellen der Arbeit bestätigt.

Um die Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen FTC innerhalb einer bestimmten Kombination aus Rad- und Reifendimension objektiv zu erfassen, werden die zuvor genannten Mittelwertabweichungen in Kapitel 8 zusätzlich anhand einer einfachen linearen Regression analysiert. Der geringe Konstantanteil des Regressionsmodells belegt dabei einerseits eine gute Kombinierbarkeit aller FTC im Bereich um den jeweiligen Mittelwert aller Messwerte einer bestimmten Dimensionskombination von Rad und Reifen. Anhand des Steigungsanteils sowie des p-Werts können darüber hinaus sowohl die Richtung, die Stärke wie auch die Signifikanz der einzelnen Zusammenhänge quantifiziert werden. Die auf diese Weise identifizierten Abhängigkeiten entsprechen in den meisten Fällen den Erkenntnissen vorhergehender Arbeiten. In einzelnen Fällen werden hingegen Widersprüche gegenüber den Erwartungen festgestellt, welche sich jedoch als physikalisch begründbar herausstellen.

Abschließend werden die quantifizierten Wirkketten aller Eigenschaftsbereiche im Rahmen von Kapitel 8 in eine bereits vorhandene Software zur Visualisierung von Lösungsräumen eingebunden. Mit Hilfe dieser Software können die für einen bestimmten Anwendungsfall möglichen Dimensionen von Rad und Reifen farblich gekennzeichnet und stückweise eingegrenzt werden. Zum besseren Verständnis wird diese Methodik am Beispiel der Randbedingungen und Anforderungen eines durchschnittlichen Mittelklassefahrzeugs veranschaulicht. Die innerhalb der verschiedenen Eigenschaftsbereiche vorliegenden Wirkzusammenhänge werden dabei an den Grenzlinien der einzelnen Lösungsräume sichtbar. Es wird deutlich, dass keine einheitlichen Maßnahmen zur gleichzeitigen Optimierung der FTC aller Eigenschaftsbereiche existieren, sondern die verfügbaren Lösungsräume hinsichtlich Rad- und Reifendimension von allen Seiten eingeschränkt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die innerhalb der Grundausslegung von Rad und Reifen relevanten Wirkketten erstmals ganzheitlich und themenübergreifend analysiert und quantifiziert. Anhand der entstandenen Näherungsmodelle können konzeptrelevante Entscheidungen der frühen Entwicklungsphase auf Basis objektiver Kriterien eingeordnet und mögliche Zielverfehlungen frühzeitig identifiziert werden. Die Arbeit leistet damit einen wichtigen Beitrag zur langfristigen Erreichung der Gesamtfahrzeugziele hinsichtlich Energieeffizienz, Fahrdynamik und Komfort.

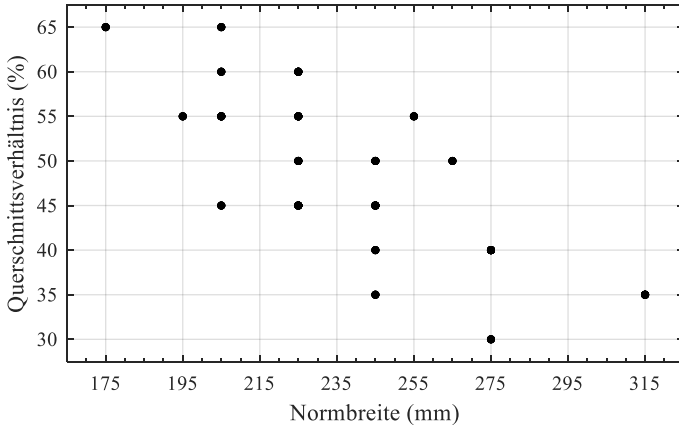
10 Ausblick

Mit Hilfe der Näherungsmodelle dieser Arbeit können realisierbare Wertebereiche der FTC unterschiedlicher Eigenschaftsbereiche anhand der Dimensionen von Rad und Reifen, der Radlast sowie des Fülldrucks prognostiziert werden. Die zugrundeliegenden Daten basieren dabei auf den Messungen von Sommerreifen ohne Notlaufeigenschaften, welche bei Fahrzeugen mit einem Produktionsbeginn (SOP) ab 2013 zum Einsatz kommen. Es ist davon auszugehen, dass die technologischen Fortschritte im Laufe der Jahre zu Veränderungen der funktionalen Reifeneigenschaften führen werden, was negative Auswirkungen auf die Genauigkeit der vorliegenden Näherungsmodelle haben kann. Die Datenbasen aller Eigenschaftsbereiche sollten daher weiterhin gepflegt werden und zukünftige Messdaten regelmäßig in die bestehenden Näherungsmodelle einfließen. Darüber hinaus wäre denkbar, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik auch auf weitere FTC anderer Eigenschaftsbereiche, auf Winterreifen oder auf Reifen mit Notlaufeigenschaften zu übertragen.

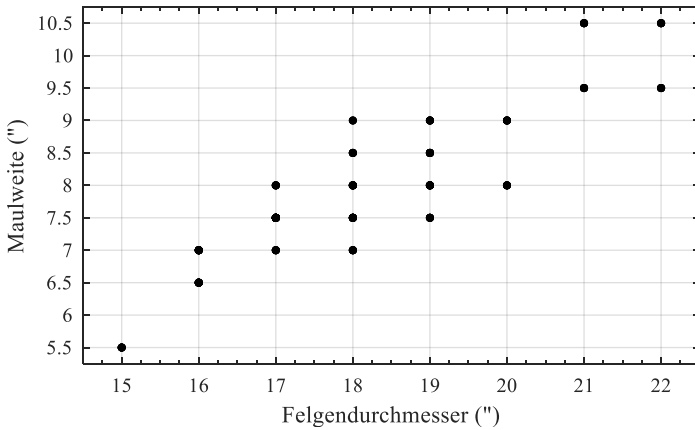
Unabhängig von der Bauart des Reifens liegen innerhalb der Datenbanken realer Prüfstandsmessungen grundsätzlich Abhängigkeiten zwischen den unterschiedlichen Einflussparametern vor. Beispiele hierfür sind die tendenzielle Zunahme der Felgenmaulweite mit der Reifenbreite oder die Verwendung größerer Felgendurchmesser bei großen Außendurchmessern des Reifens. Diese Korrelationen führen dazu, dass die Auswirkungen der einzelnen physikalischen Effekte niemals vollständig trennbar sind. Insbesondere in Dimensionsbereichen außerhalb der zugrundeliegenden Datenbasis kann dies zu Extrapolationsfehlern der Näherungsmodelle führen. Moderne Entwicklungsmethoden bieten heutzutage diverse Möglichkeiten zur virtuellen Modellierung von Reifen, wobei das funktionale Reifenverhalten mit teilweise sehr hoher Genauigkeit simuliert werden kann. Im Gegensatz zur Messung existierender Kombinationen von Rad und Reifen können die unterschiedlichen Einflussparameter hierbei unabhängig variiert werden. Durch Einbindung einer hohen Anzahl unabhängiger Simulationsdaten in die bestehenden Näherungsmodelle ist von einer höheren

Genauigkeit in Bereichen außerhalb heutiger Dimensionskombinationen auszugehen. Auch die momentan vergleichsweise geringe Datenbasis zur Analyse von Zusammenhängen zwischen FTC könnte auf diese Weise vergrößert werden. Dies würde zum Einen das physikalische Verständnis über die Wirkzusammenhänge verschiedener FTC innerhalb bestimmter Dimensionskombinationen von Rad und Reifen verbessern. Darüber hinaus könnten zukünftig auch die multidimensionalen Wirkketten der Zielkonflikte in die vorhandene Software zur Visualisierung von Lösungsräumen integriert werden.

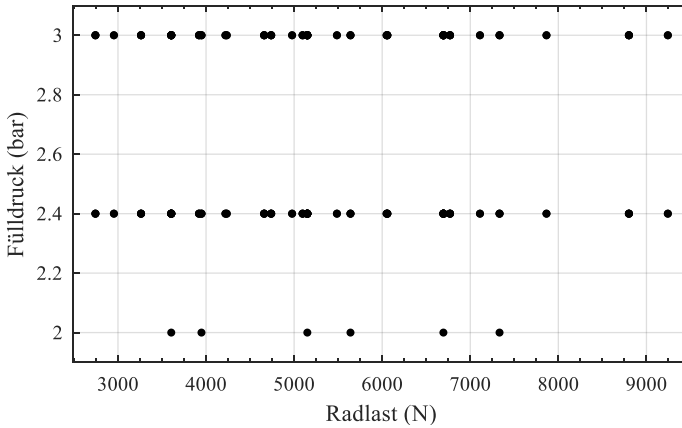
Anhang



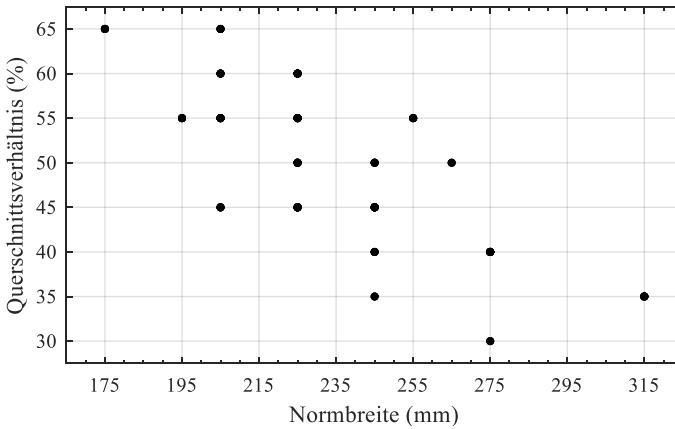
Anhang 1: Reifenbreiten und Querschnittsverhältnisse der Datenbasis (Schräglauftiefe)



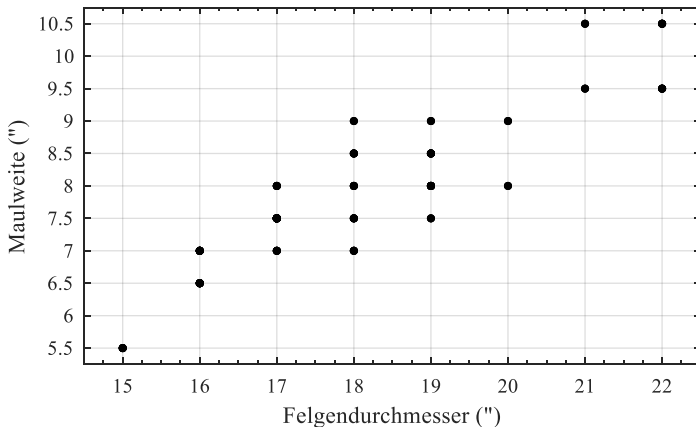
Anhang 2: Felgendurchmesser und Maulweiten der Datenbasis (Schräglauftiefe)



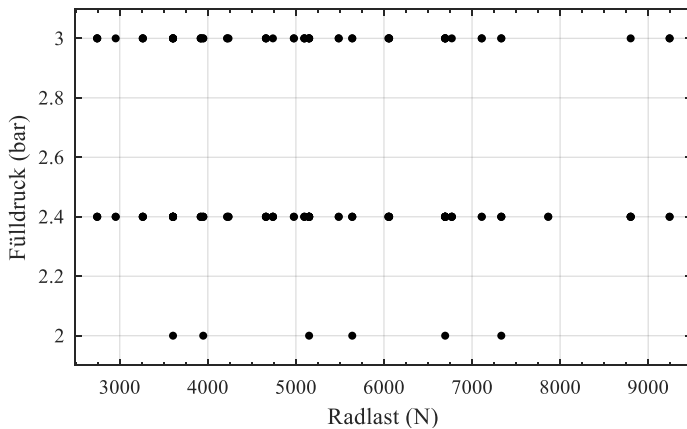
Anhang 3: Radlasten und Fülldrücke der Datenbasis (Schräglaufsteifigkeit)



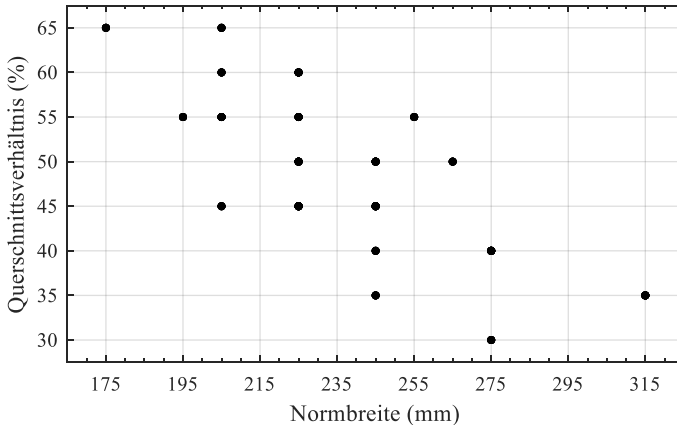
Anhang 4: Reifenbreiten und Querschnittsverhältnisse der Datenbasis (Reibwert quer)



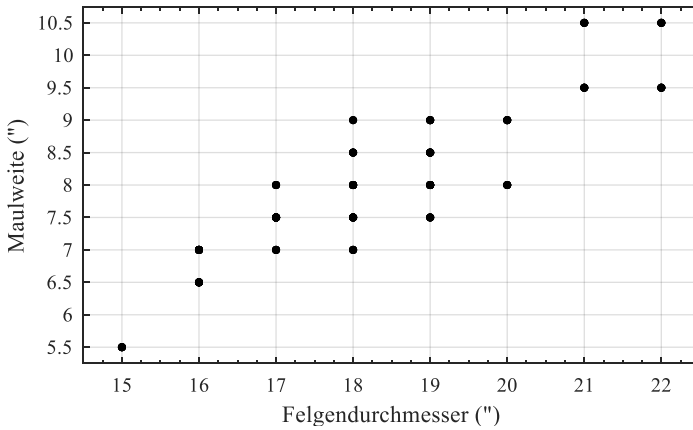
Anhang 5: Felgendurchmesser und Maulweiten der Datenbasis (Reibwert quer)



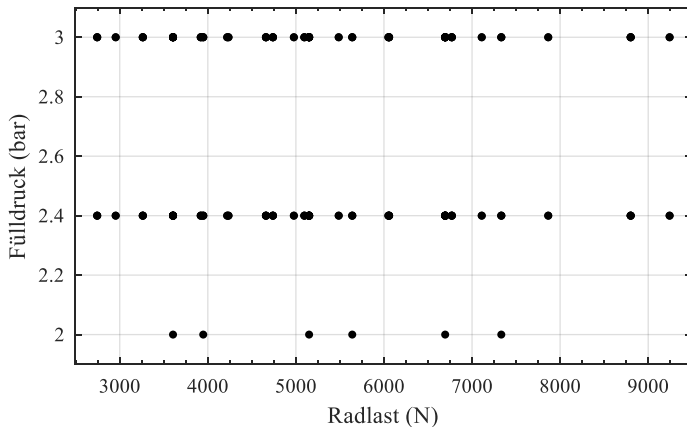
Anhang 6: Radlasten und Fülldrücke der Datenbasis (Reibwert quer)



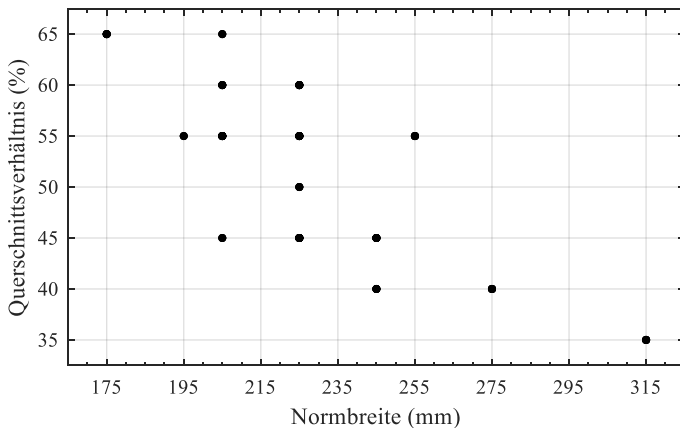
Anhang 7: Reifenbreiten und Querschnittsverhältnisse der Datenbasis (Einlauflänge)



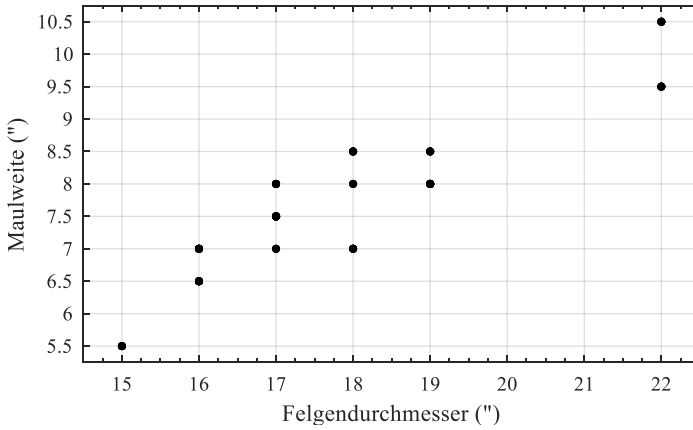
Anhang 8: Felgendurchmesser und Maulweiten der Datenbasis (Einlauflänge)



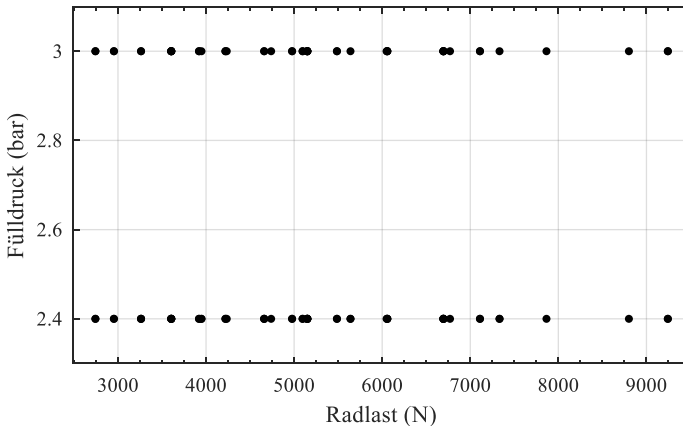
Anhang 9: Radlasten und Fülldrücke der Datenbasis (Einlaufänge)



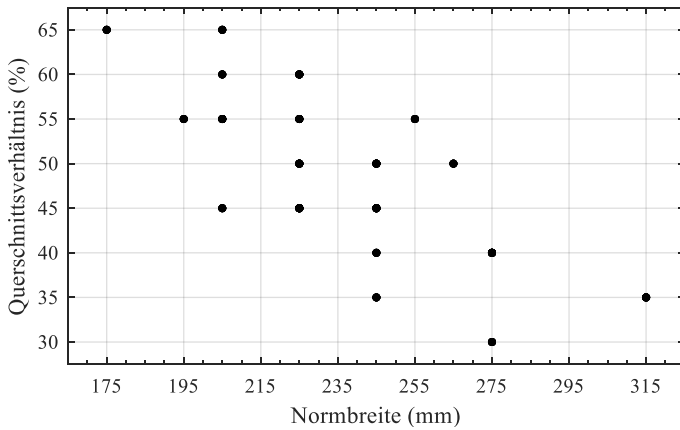
Anhang 10: Reifenbreiten und Querschnittsverhältnisse der Datenbasis (Reibwert längs)



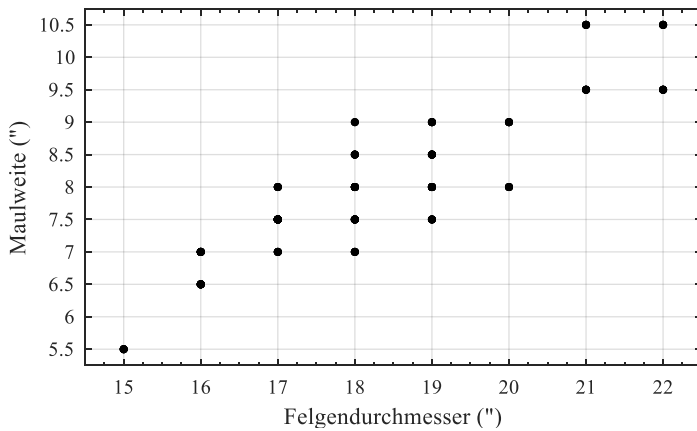
Anhang 11: Felgendurchmesser und Maulweiten der Datenbasis (Reibwert längs)



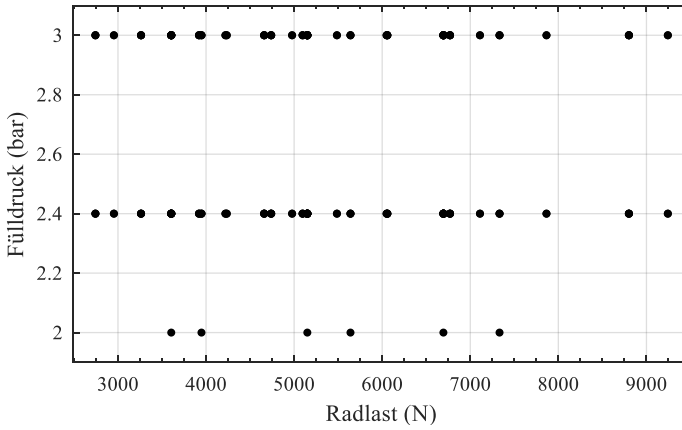
Anhang 12: Radlasten und Fülldrücke der Datenbasis (Reibwert längs)



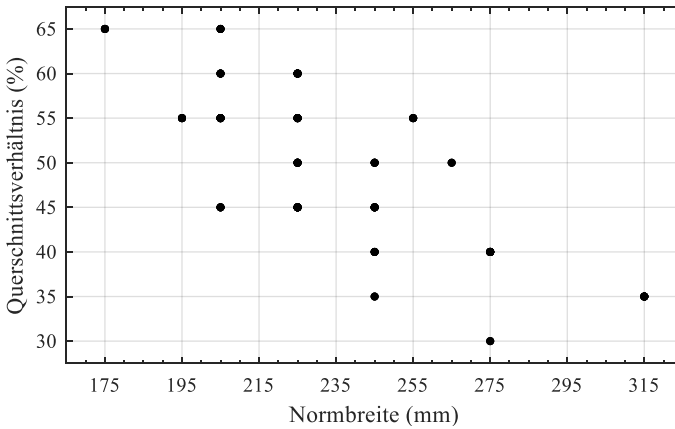
Anhang 13: Reifenbreiten und Querschnittsverhältnisse der Datenbasis (Aligning Stiffness)



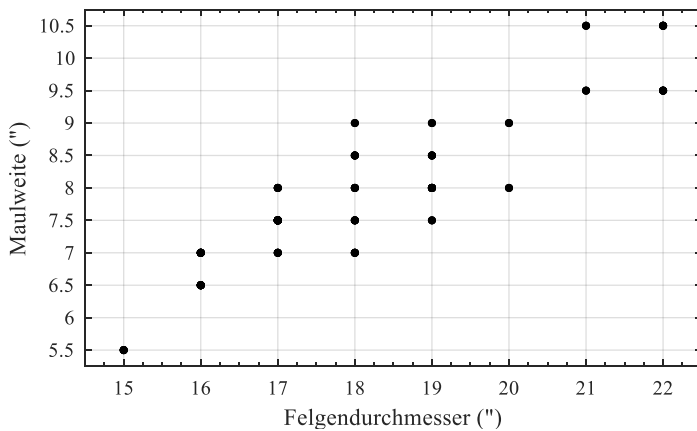
Anhang 14: Felgendurchmesser und Maulweiten der Datenbasis (Aligning Stiffness)



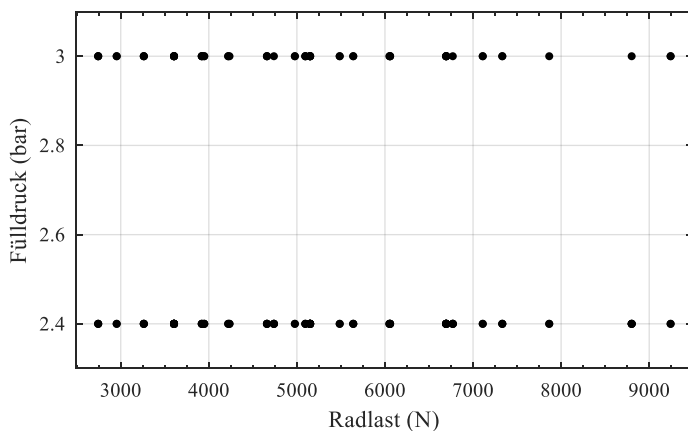
Anhang 15: Radlasten und Fülldrücke der Datenbasis (Aligning Stiffness)



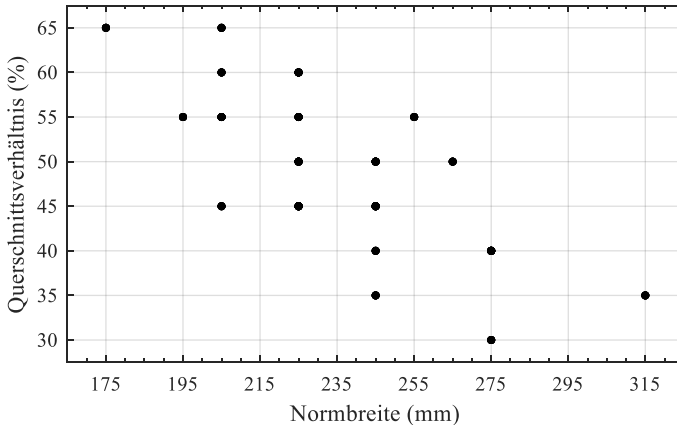
Anhang 16: Reifenbreiten und Querschnittsverhältnisse der Datenbasis (Bohrmoment)



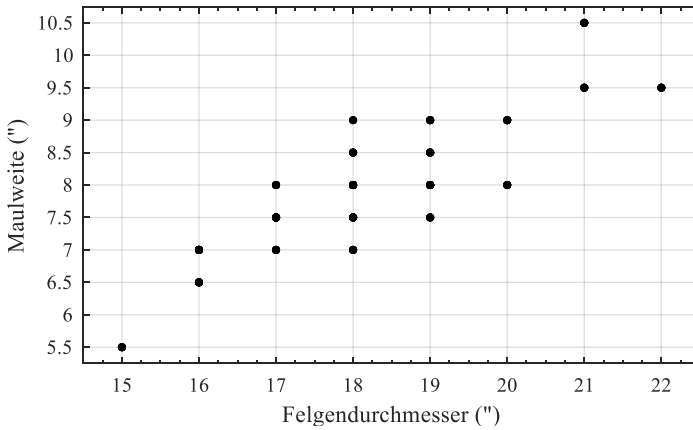
Anhang 17: Felgendurchmesser und Maulweiten der Datenbasis (Bohrmoment)



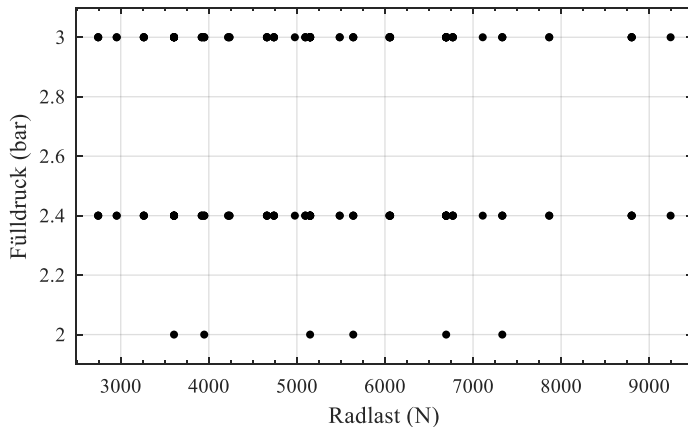
Anhang 18: Radlasten und Fülldrücke der Datenbasis (Bohrmoment)



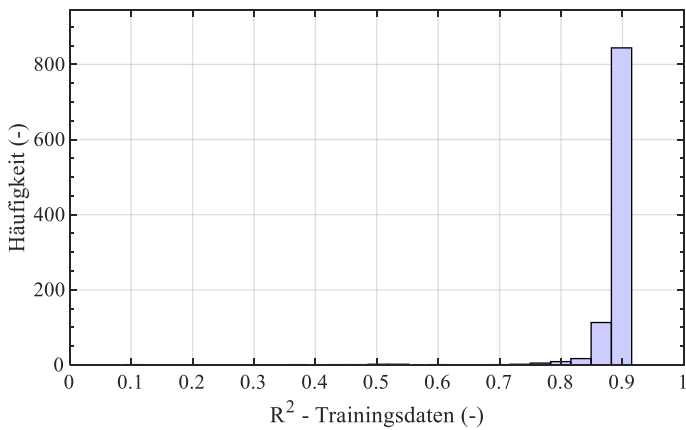
Anhang 19: Reifenbreiten und Querschnittsverhältnisse der Datenbasis (Sturzsteifigkeit)



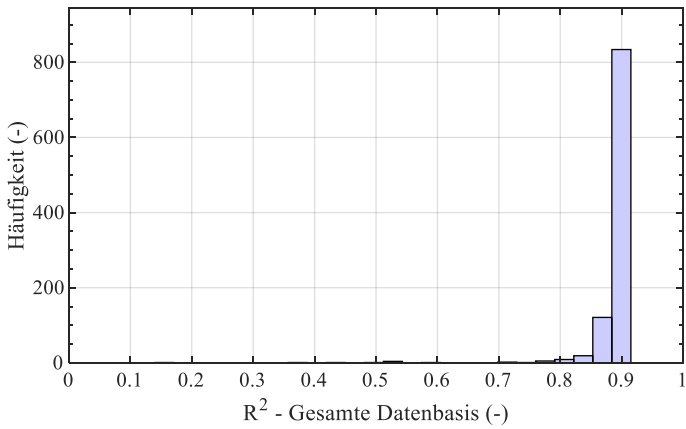
Anhang 20: Felgendurchmesser und Maulweiten der Datenbasis (Sturzsteifigkeit)



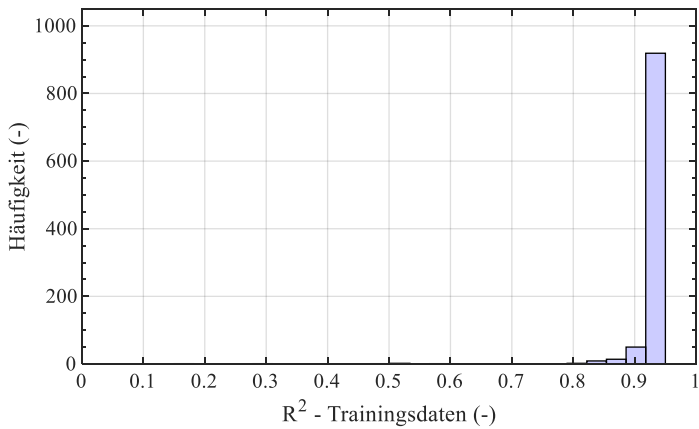
Anhang 21: Radlasten und Fülldrücke der Datenbasis (Sturzsteifigkeit)



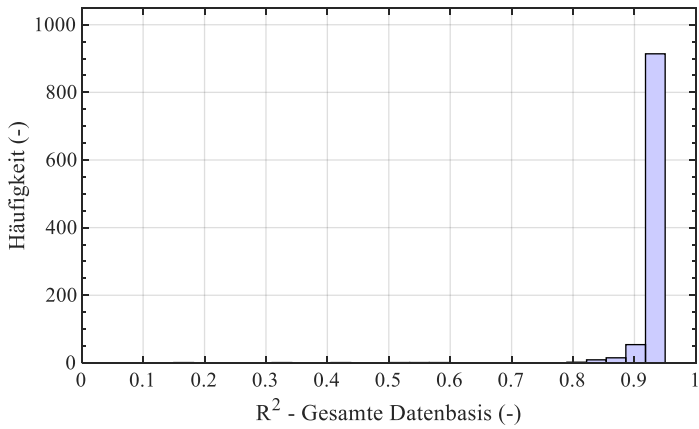
Anhang 22: Bestimmtheitsmaße der Trainingsdaten (Vertikalsteifigkeit)



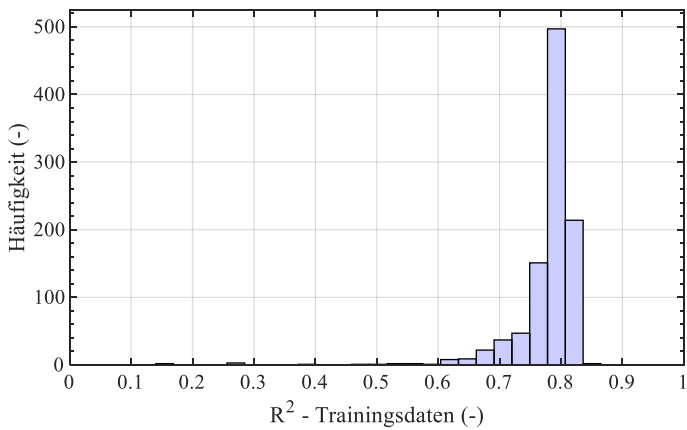
Anhang 23: Bestimmtheitsmaße der gesamten Datenbasis (Vertikalsteifigkeit)



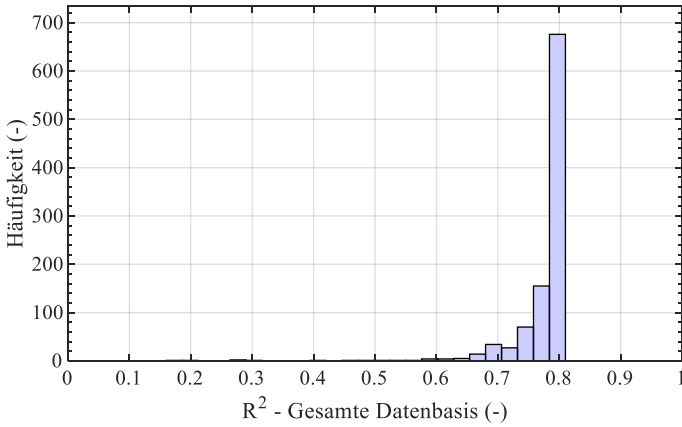
Anhang 24: Bestimmtheitsmaße der Trainingsdaten (Schräglaufsteifigkeit)



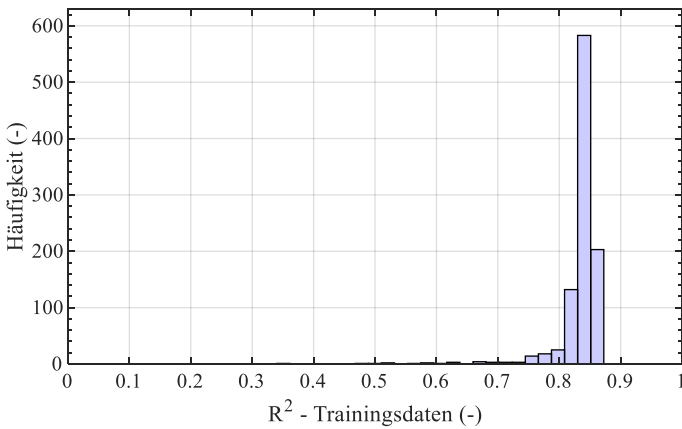
Anhang 25: Bestimmtheitsmaße der gesamten Datenbasis (Schräglaufsteifigkeit)



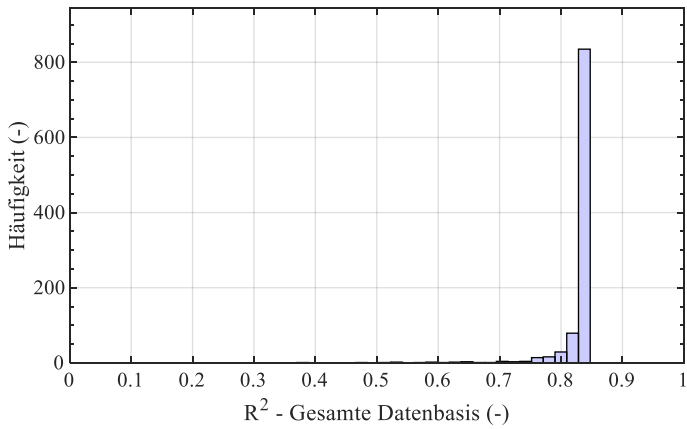
Anhang 26: Bestimmtheitsmaße der Trainingsdaten (Reibwert quer)



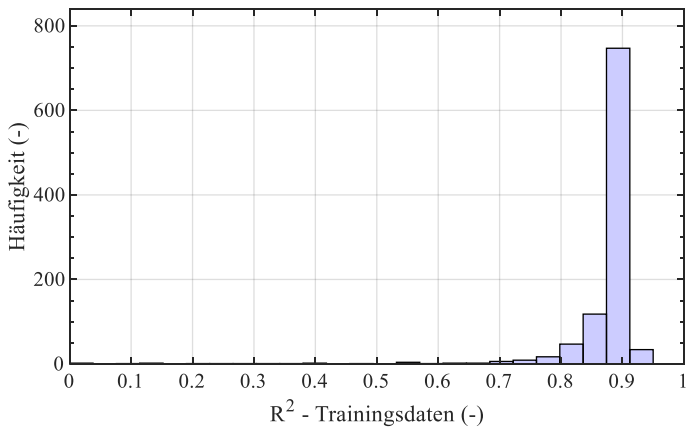
Anhang 27: Bestimmtheitsmaße der gesamten Datenbasis (Reibwert quer)



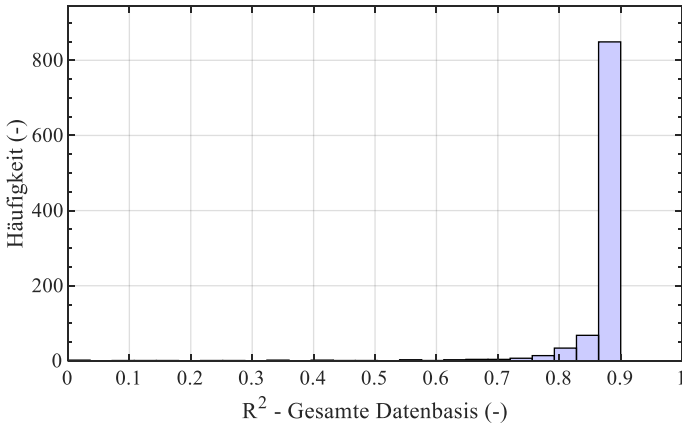
Anhang 28: Bestimmtheitsmaße der Trainingsdaten (Einlauflänge)



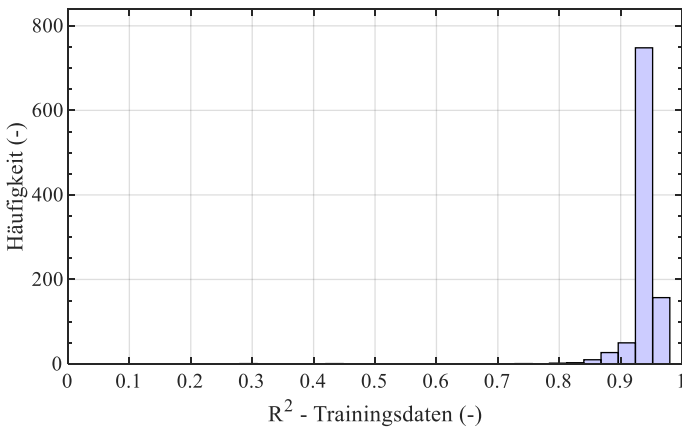
Anhang 29: Bestimmtheitsmaße der gesamten Datenbasis (Einlauflänge)



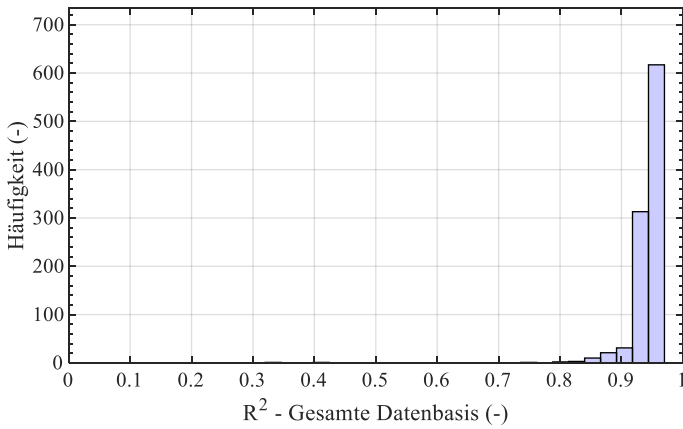
Anhang 30: Bestimmtheitsmaße der Trainingsdaten (Reibwert längs)



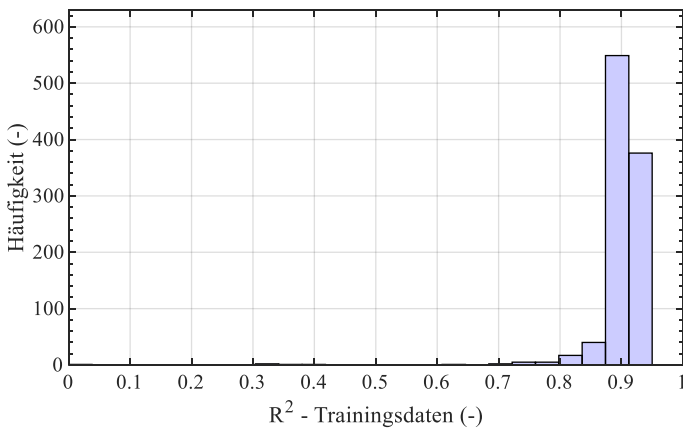
Anhang 31: Bestimmtheitsmaße der gesamten Datenbasis (Reibwert längs)



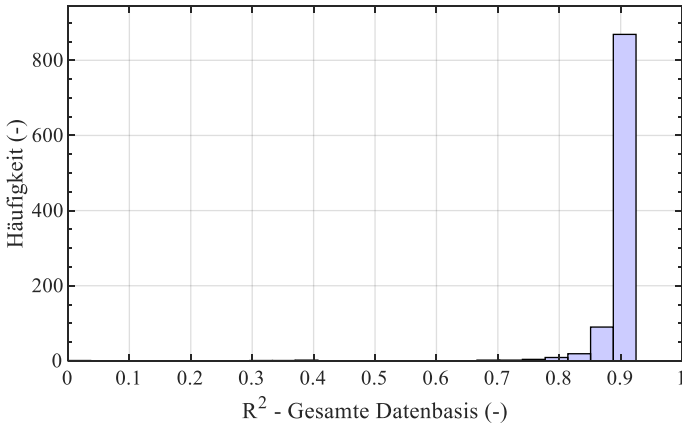
Anhang 32: Bestimmtheitsmaße der Trainingsdaten (Aligning Stiffness)



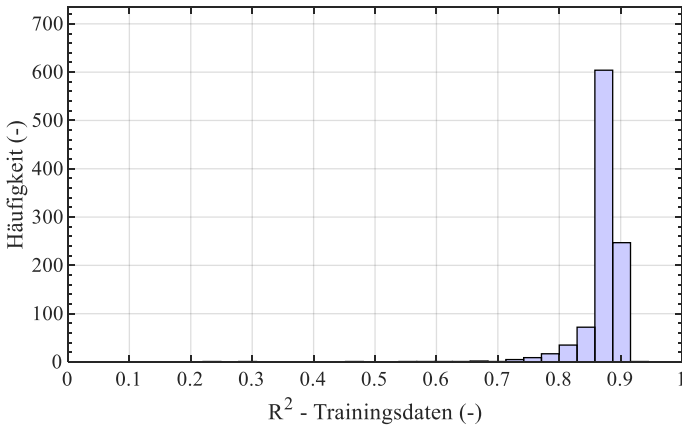
Anhang 33: Bestimmtheitsmaße der gesamten Datenbasis (Aligning Stiffness)



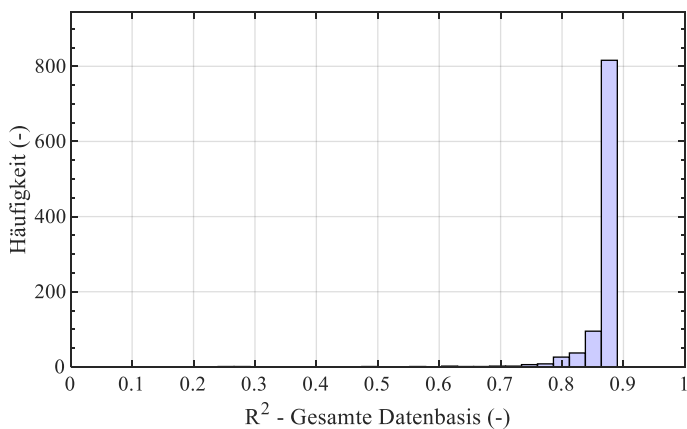
Anhang 34: Bestimmtheitsmaße der Trainingsdaten (Bohrmoment)



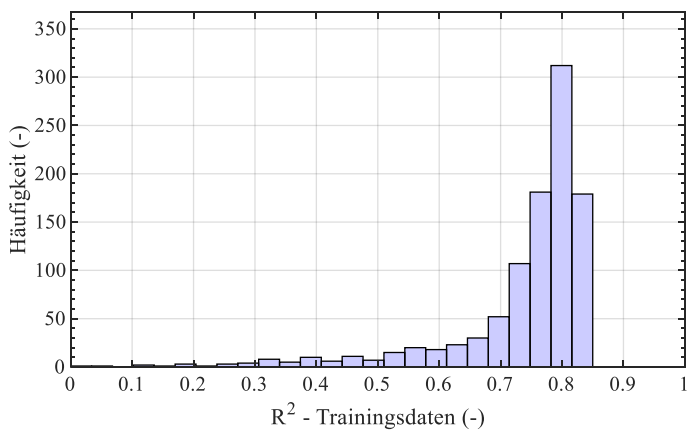
Anhang 35: Bestimmtheitsmaße der gesamten Datenbasis (Bohrmoment)



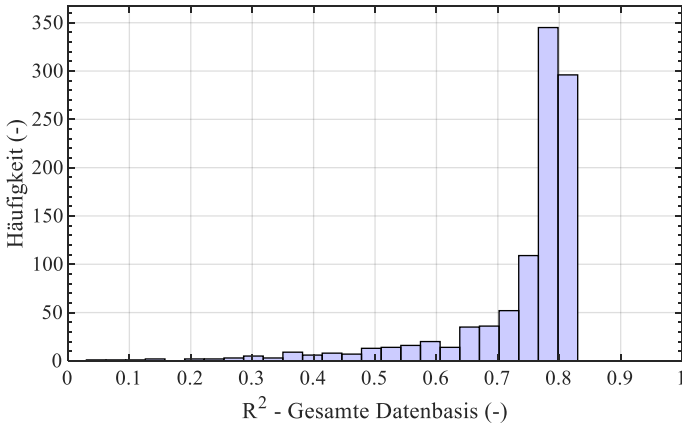
Anhang 36: Bestimmtheitsmaße der Trainingsdaten (Sturzsteifigkeit)



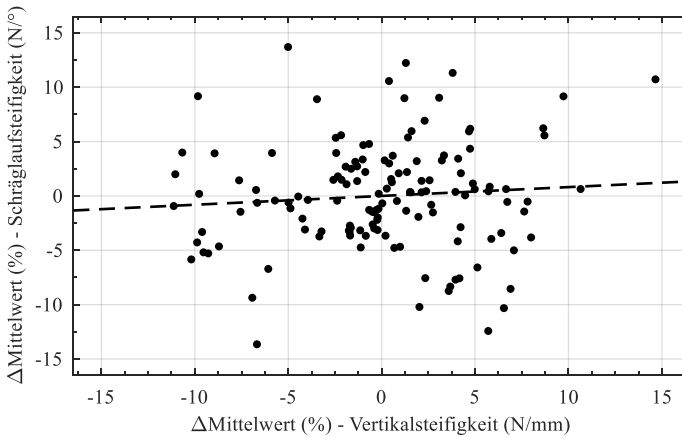
Anhang 37: Bestimmtheitsmaße der gesamten Datenbasis (Sturzsteifigkeit)



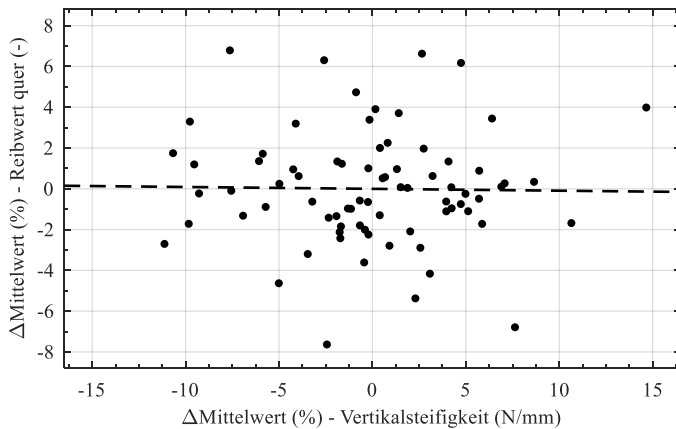
Anhang 38: Bestimmtheitsmaße der Trainingsdaten (Körperschall)



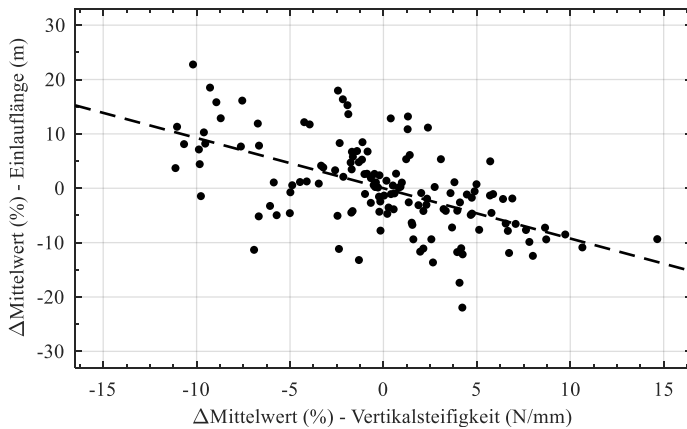
Anhang 39: Bestimmtheitsmaße der gesamten Datenbasis (Körperschall)



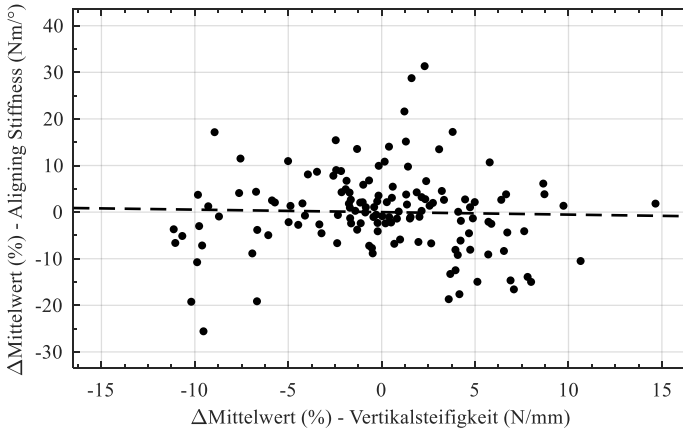
Anhang 40: Zusammenhang zwischen Vertikalsteifigkeit und Schräglaufsteifigkeit



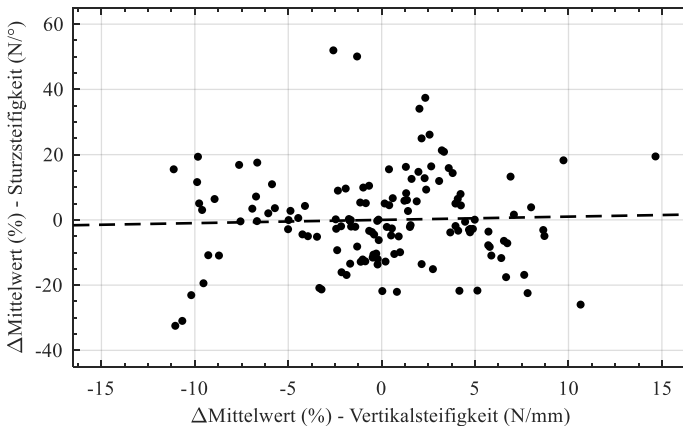
Anhang 41: Zusammenhang zwischen Vertikalsteifigkeit und Reibwert quer



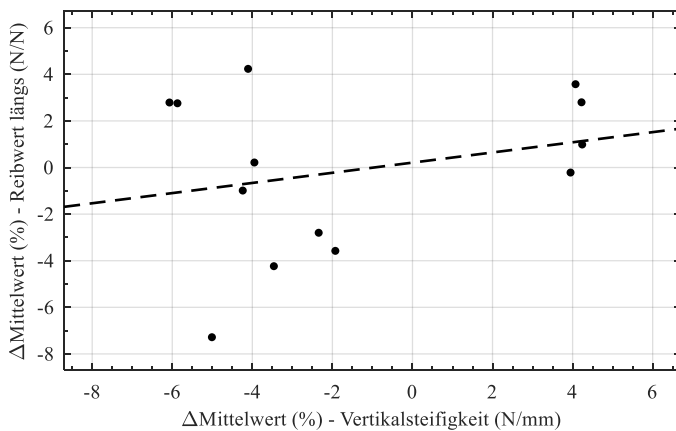
Anhang 42: Zusammenhang zwischen Vertikalsteifigkeit und Einlauflänge



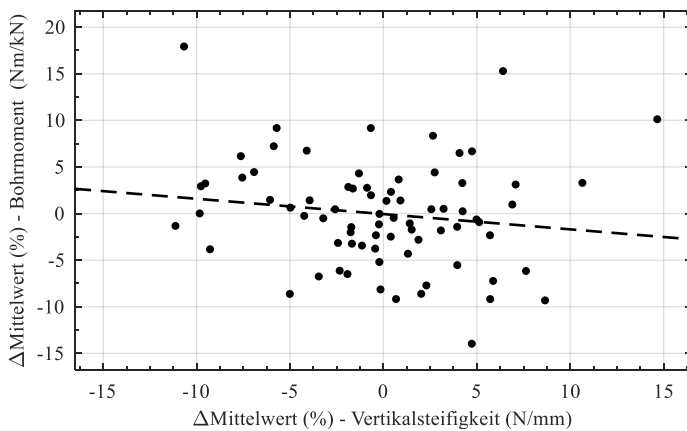
Anhang 43: Zusammenhang zwischen Vertikalsteifigkeit und Aligning Stiffness



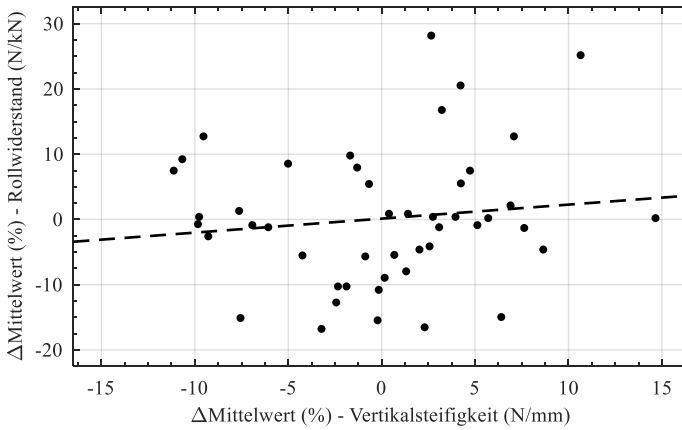
Anhang 44: Zusammenhang zwischen Vertikalsteifigkeit und Sturzsteifigkeit



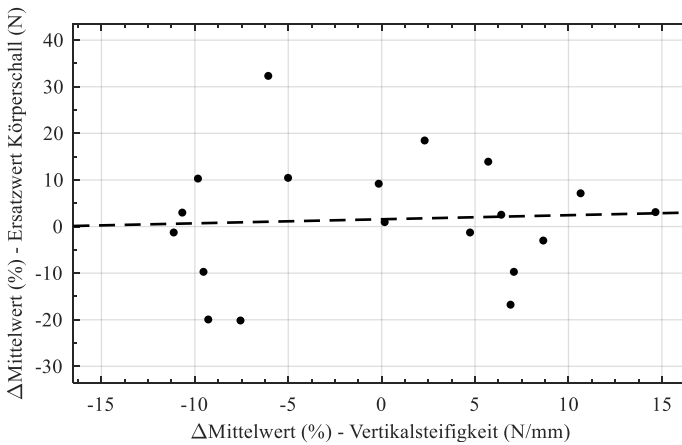
Anhang 45: Zusammenhang zwischen Vertikalsteifigkeit und Reibwert längs



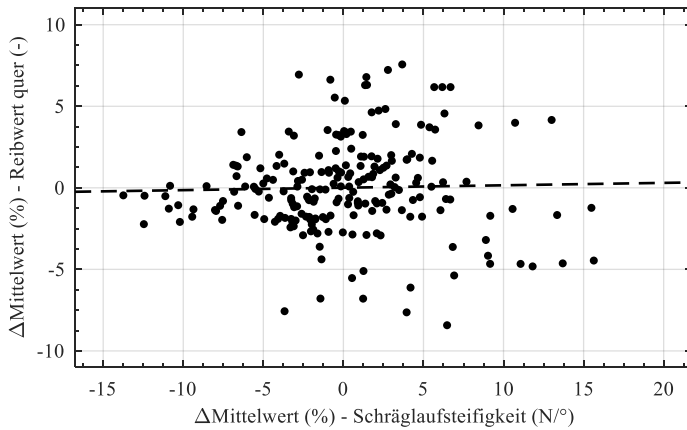
Anhang 46: Zusammenhang zwischen Vertikalsteifigkeit und Bohrmoment



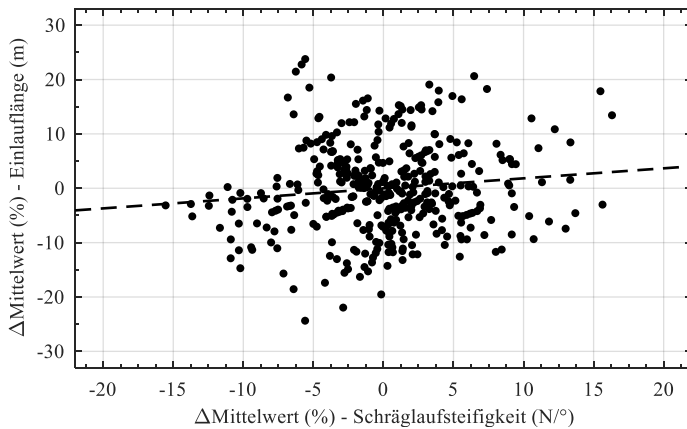
Anhang 47: Zusammenhang zwischen Vertikalsteifigkeit und Rollwiderstand



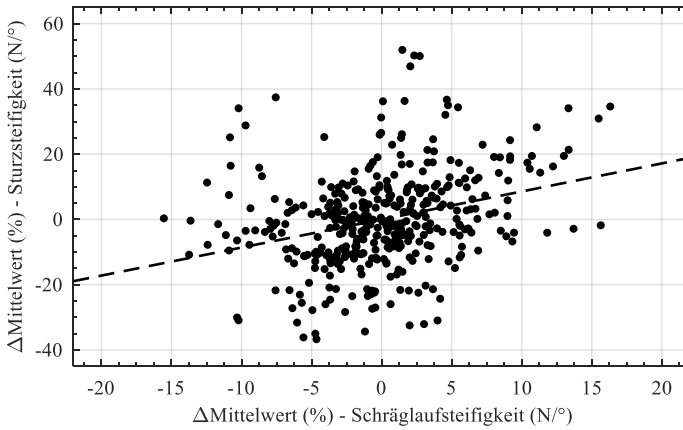
Anhang 48: Zusammenhang zwischen Vertikalsteifigkeit und Ersatzwert Körperschall



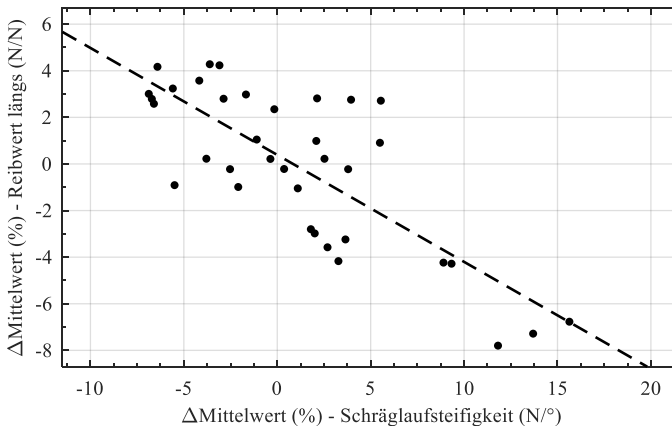
Anhang 49: Zusammenhang zwischen Schräglaufsteifigkeit und Reibwert quer



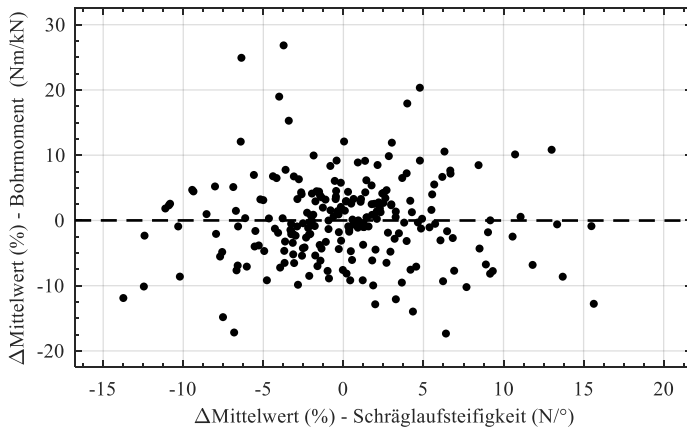
Anhang 50: Zusammenhang zwischen Schräglaufsteifigkeit und Einlauflänge



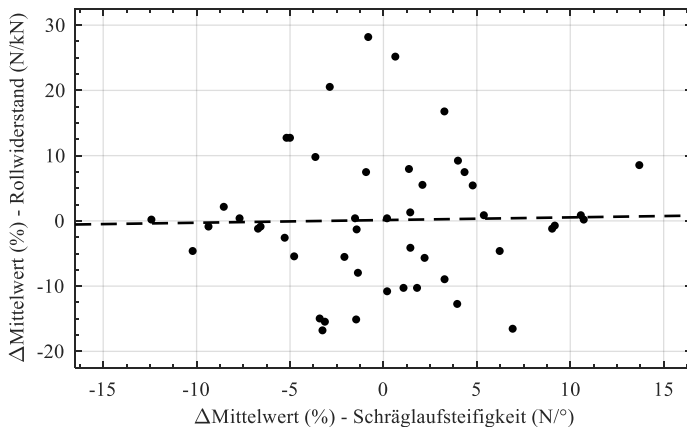
Anhang 51: Zusammenhang zwischen Schräglaufsteifigkeit und Sturzsteifigkeit



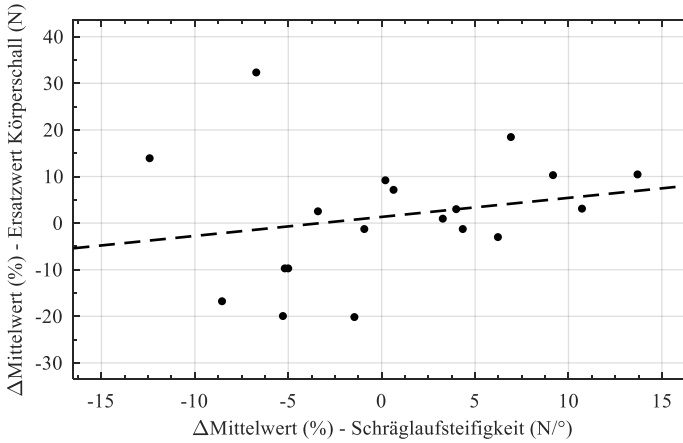
Anhang 52: Zusammenhang zwischen Schräglaufsteifigkeit und Reibwert längs



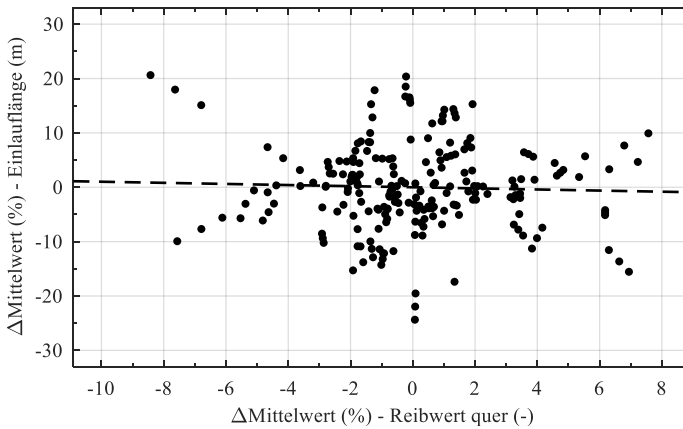
Anhang 53: Zusammenhang zwischen Schräglaufsteifigkeit und Bohrmoment



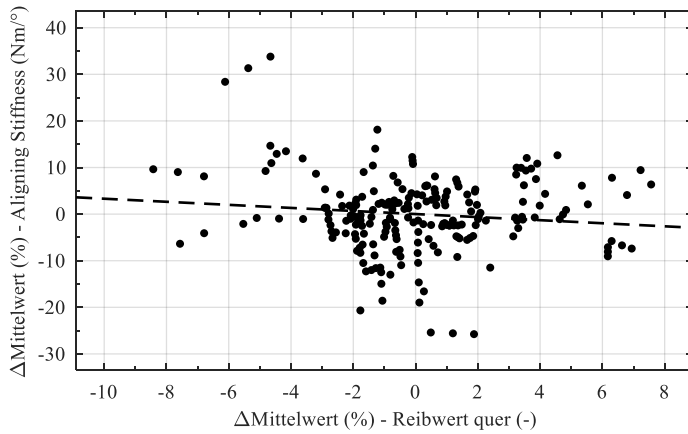
Anhang 54: Zusammenhang zwischen Schräglaufsteifigkeit und Rollwiderstand



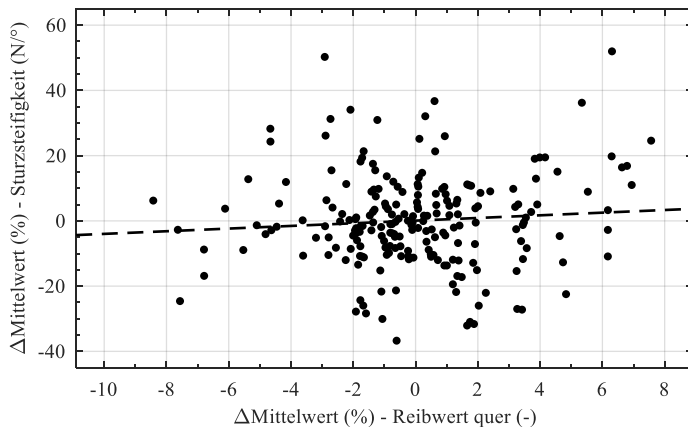
Anhang 55: Zusammenhang zwischen Schräglaufsteifigkeit und Ersatzwert Körperschall



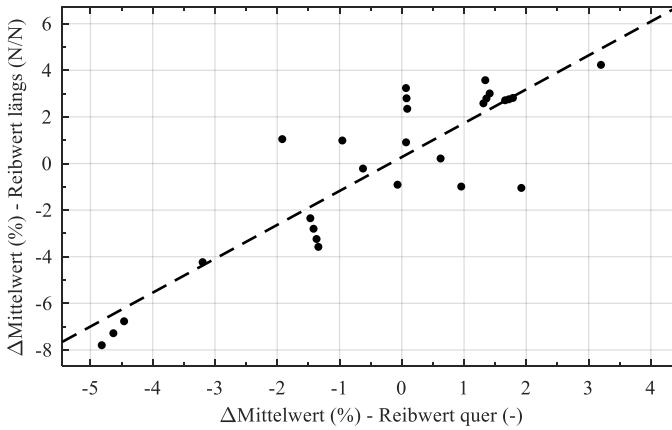
Anhang 56: Zusammenhang zwischen Reibwert quer und Einlauflänge



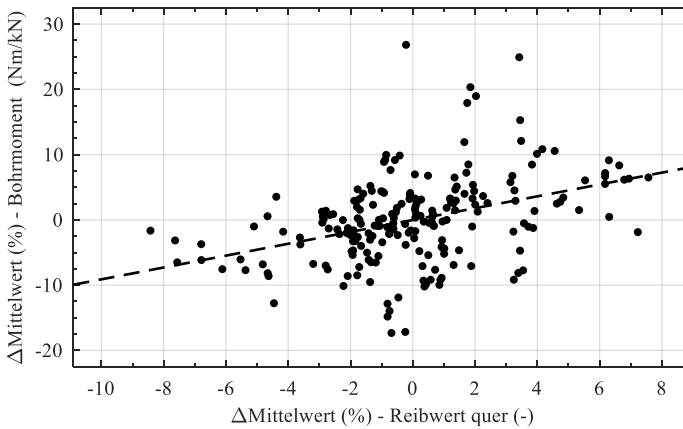
Anhang 57: Zusammenhang zwischen Reibwert quer und Aligning Stiffness



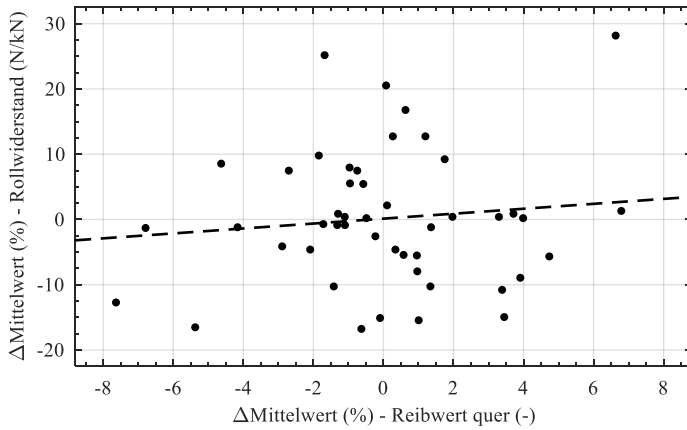
Anhang 58: Zusammenhang zwischen Reibwert quer und Sturzsteifigkeit



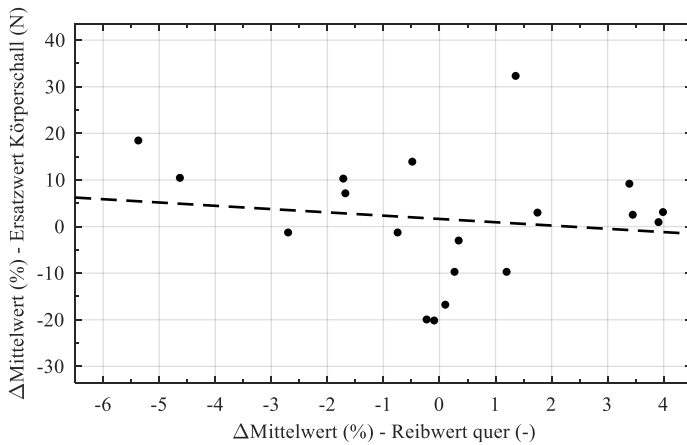
Anhang 59: Zusammenhang zwischen Reibwert quer und Reibwert längs



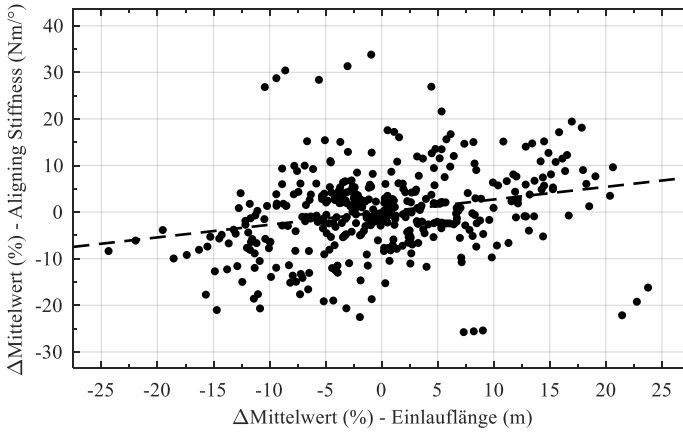
Anhang 60: Zusammenhang zwischen Reibwert quer und Bohrmoment



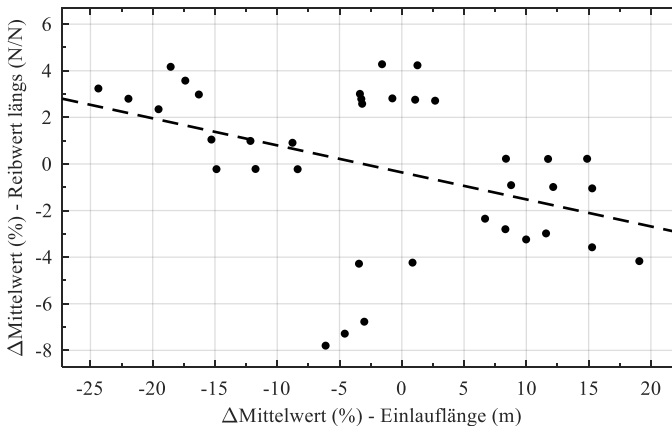
Anhang 61: Zusammenhang zwischen Reibwert quer und Rollwiderstand



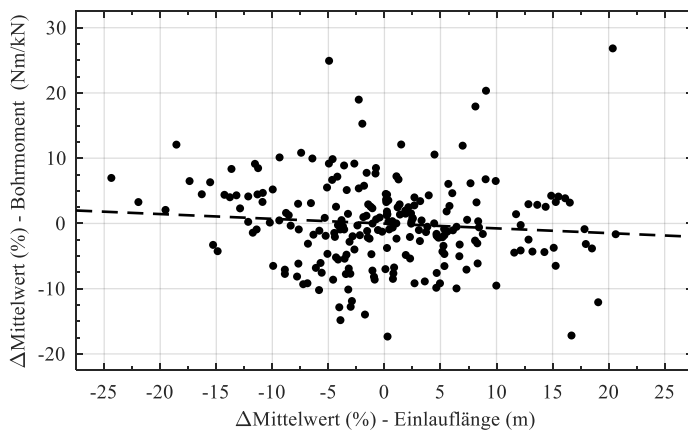
Anhang 62: Zusammenhang zwischen Reibwert quer und Ersatzwert Körperschall



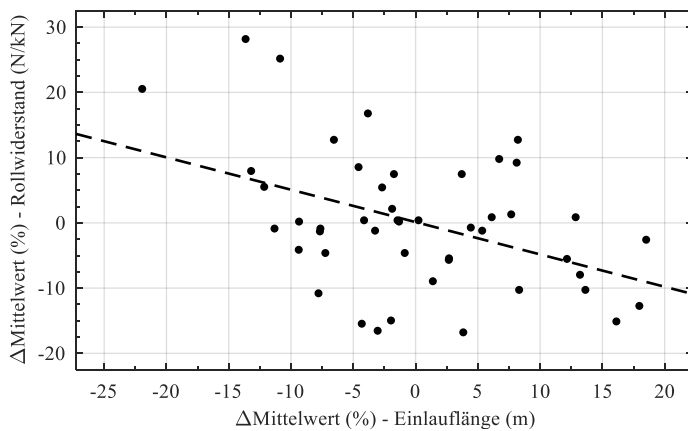
Anhang 63: Zusammenhang zwischen Einlauflänge und Aligning Stiffness



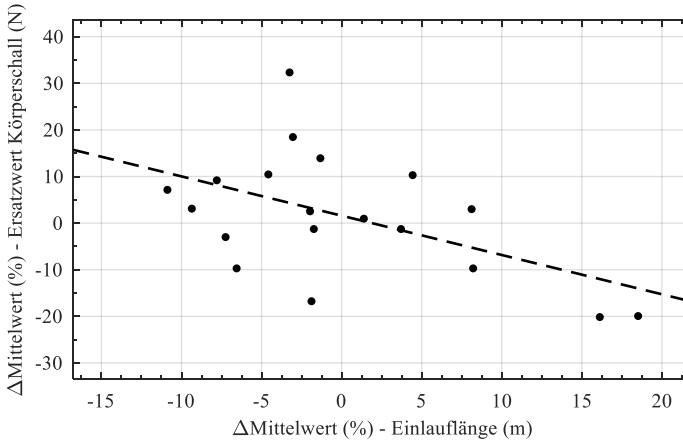
Anhang 64: Zusammenhang zwischen Einlauflänge und Reibwert längs



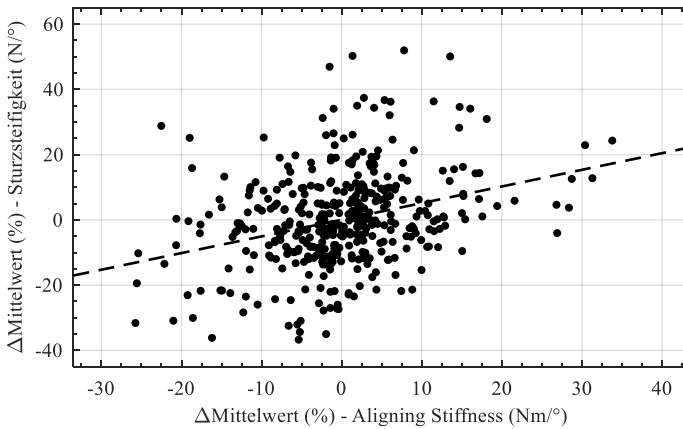
Anhang 65: Zusammenhang zwischen Einlauflänge und Bohrmoment



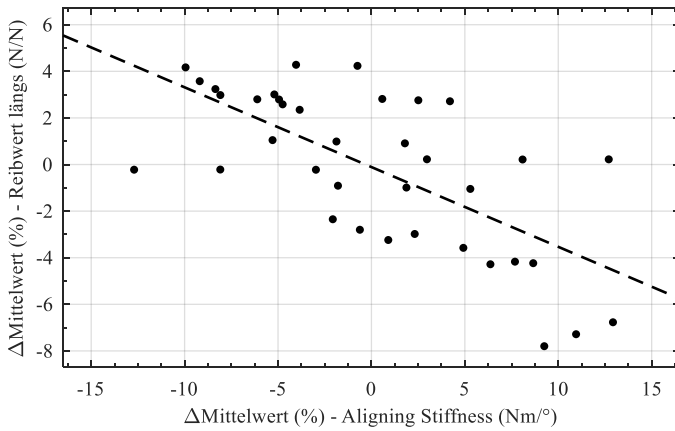
Anhang 66: Zusammenhang zwischen Einlauflänge und Rollwiderstand



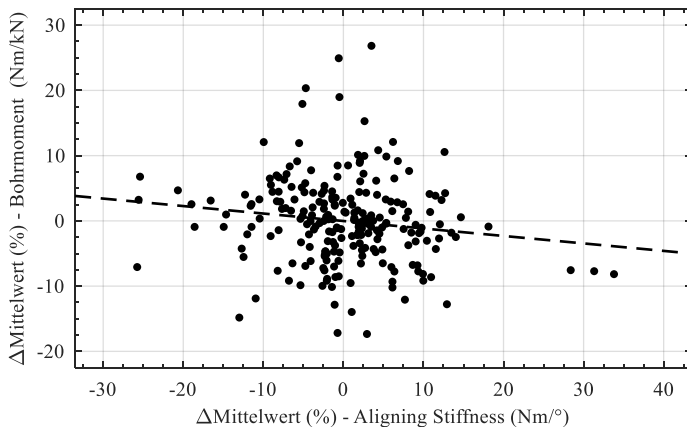
Anhang 67: Zusammenhang zwischen Einlauflänge und Ersatzwert Körperschall



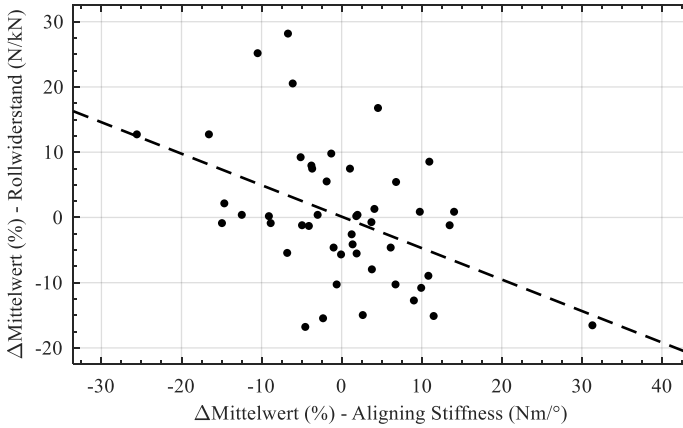
Anhang 68: Zusammenhang zwischen Aligning Stiffness und Sturzsteifigkeit



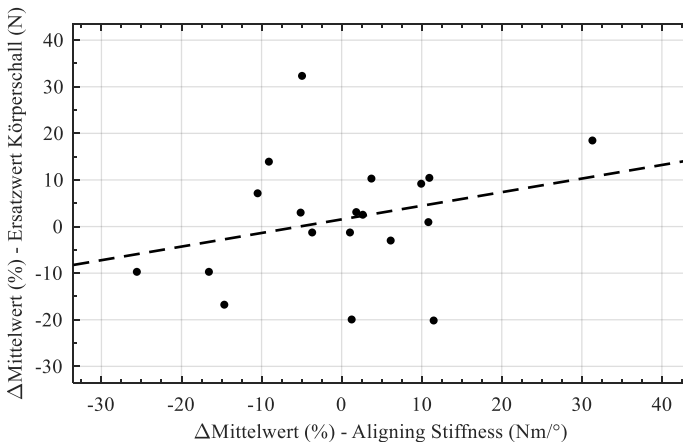
Anhang 69: Zusammenhang zwischen Aligning Stiffness und Reibwert längs



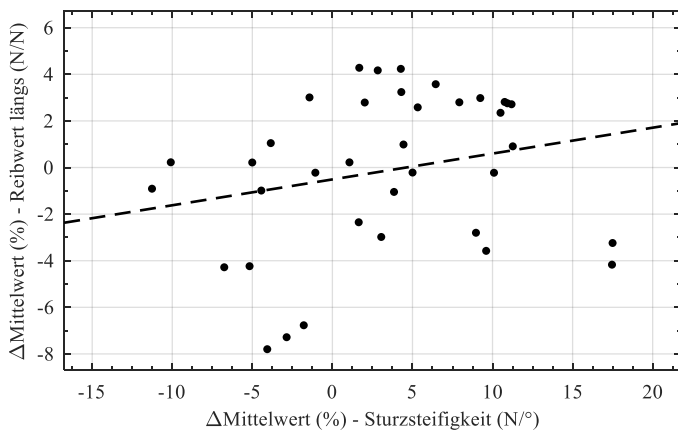
Anhang 70: Zusammenhang zwischen Aligning Stiffness und Bohrmoment



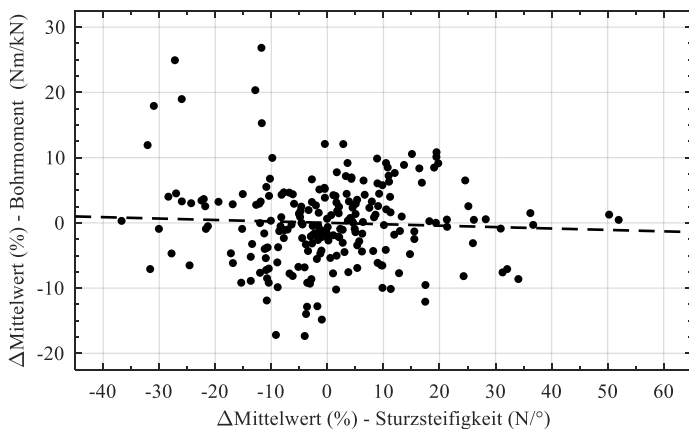
Anhang 71: Zusammenhang zwischen Aligning Stiffness und Rollwiderstand



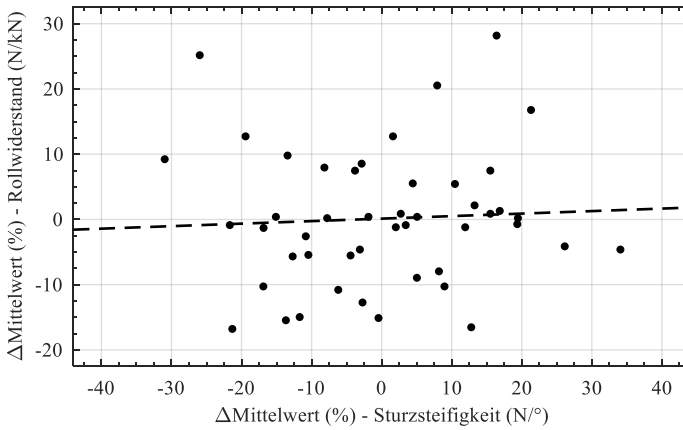
Anhang 72: Zusammenhang zwischen Aligning Stiffness und Ersatzwert Körperschall



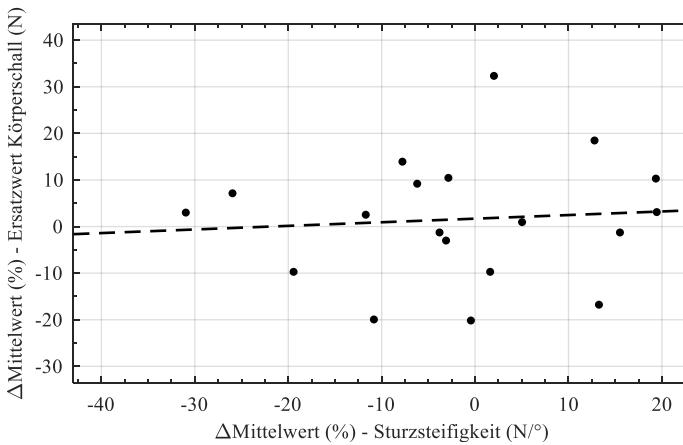
Anhang 73: Zusammenhang zwischen Sturzsteifigkeit und Reibwert längs



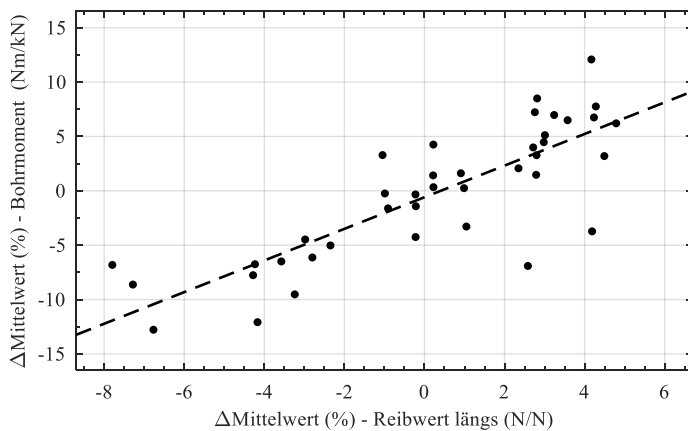
Anhang 74: Zusammenhang zwischen Sturzsteifigkeit und Bohrmoment



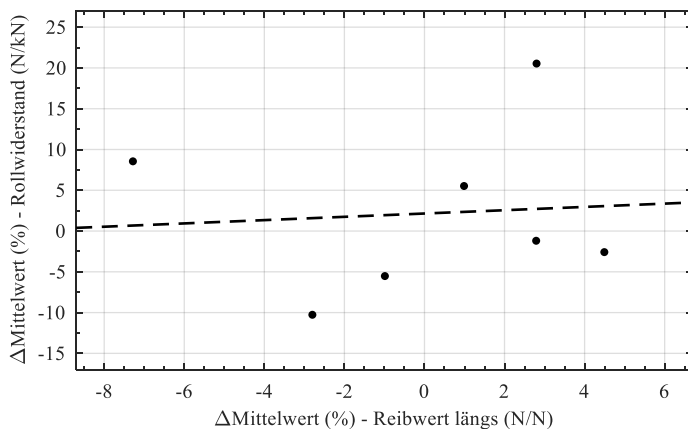
Anhang 75: Zusammenhang zwischen Sturzsteifigkeit und Rollwiderstand



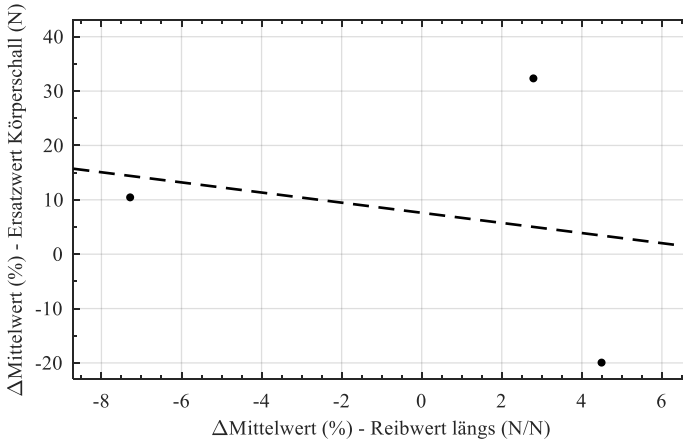
Anhang 76: Zusammenhang zwischen Sturzsteifigkeit und Ersatzwert Körperschall



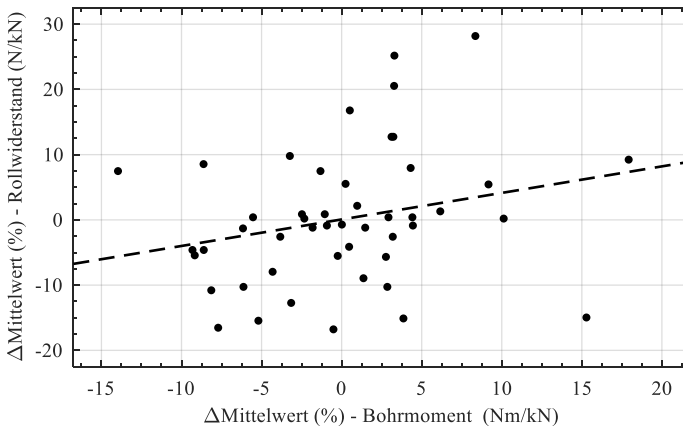
Anhang 77: Zusammenhang zwischen Reibwert längs und Bohrmoment



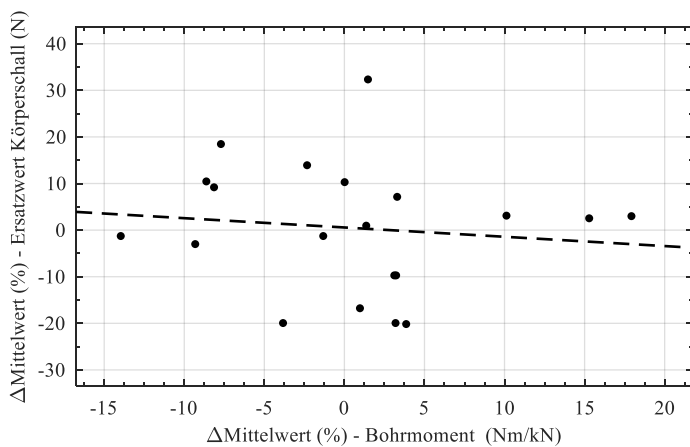
Anhang 78: Zusammenhang zwischen Reibwert längs und Rollwiderstand



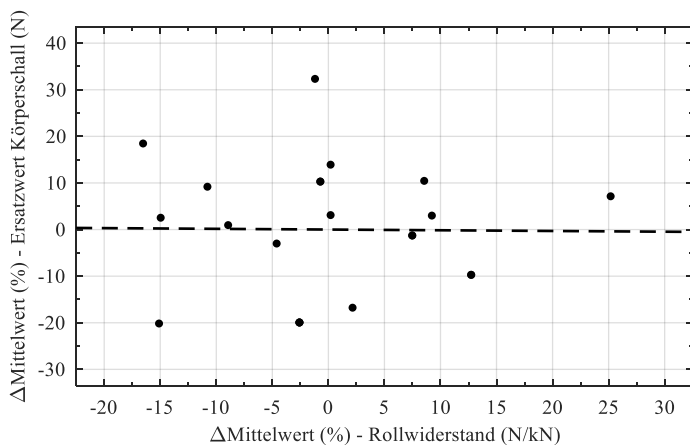
Anhang 79: Zusammenhang zwischen Reibwert längs und Ersatzwert Körperschall



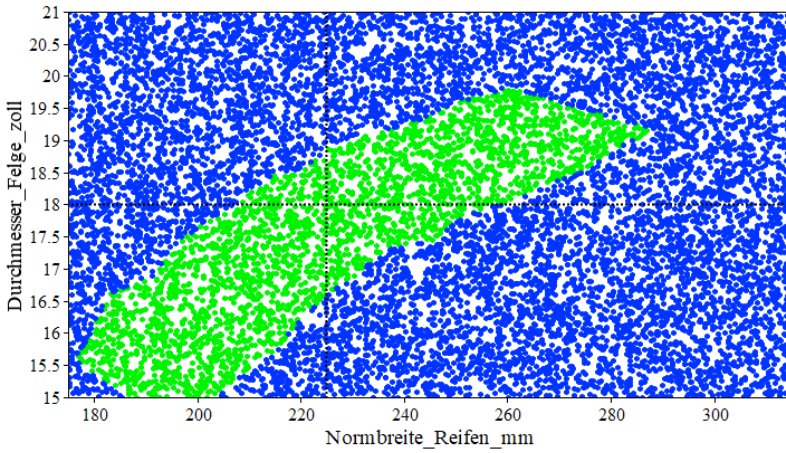
Anhang 80: Zusammenhang zwischen Bohrmoment und Rollwiderstand



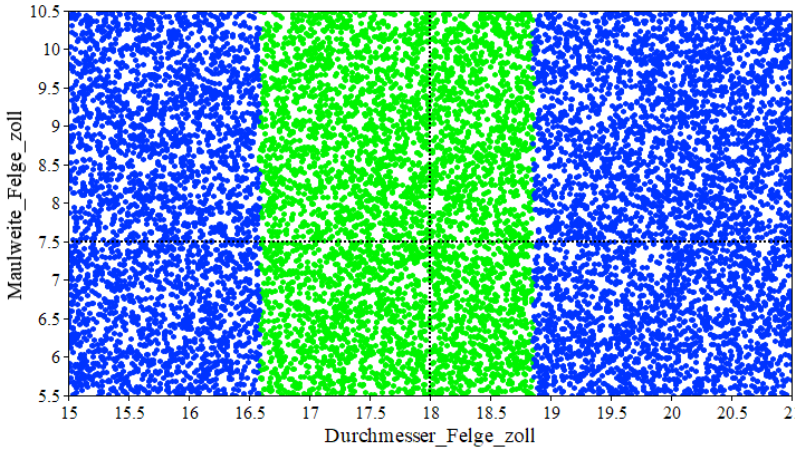
Anhang 81: Zusammenhang zwischen Bohrmoment und Ersatzwert Körperschall



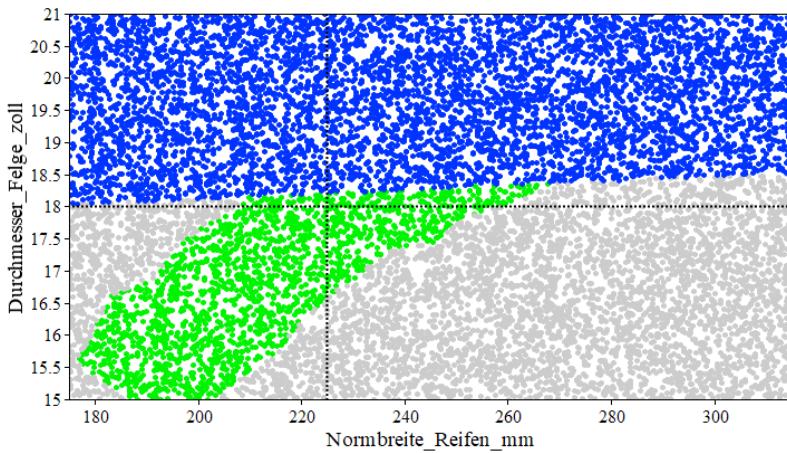
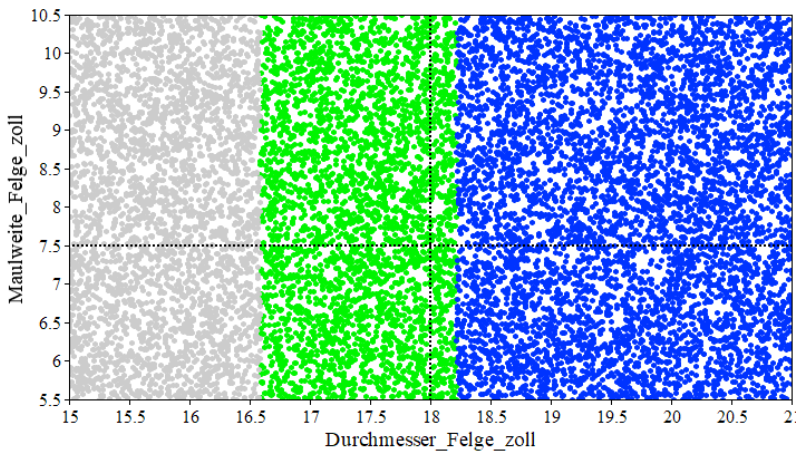
Anhang 82: Zusammenhang zwischen Rollwiderstand und Ersatzwert Körperschall

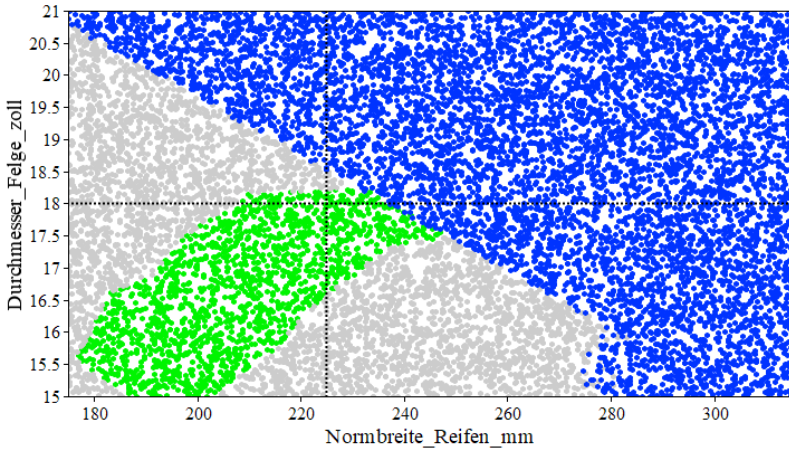


Anhang 83: Lösungsraum Tragfähigkeit ($B_F = 7,5''$)

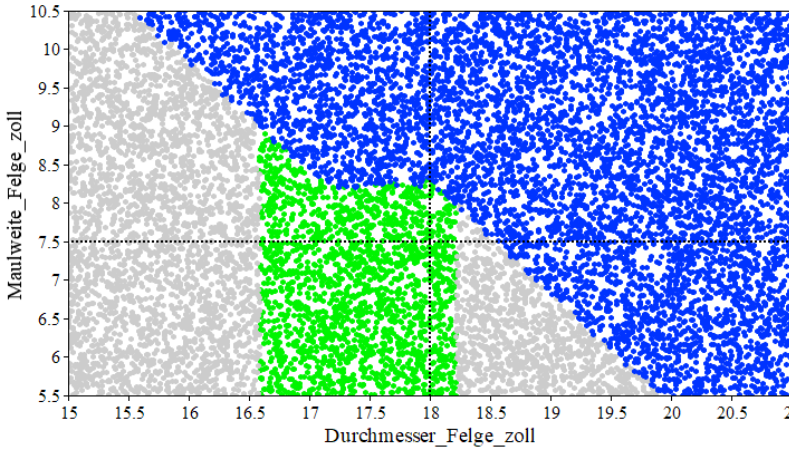


Anhang 84: Lösungsraum Tragfähigkeit ($B_{R,N} = 225\text{ mm}$)

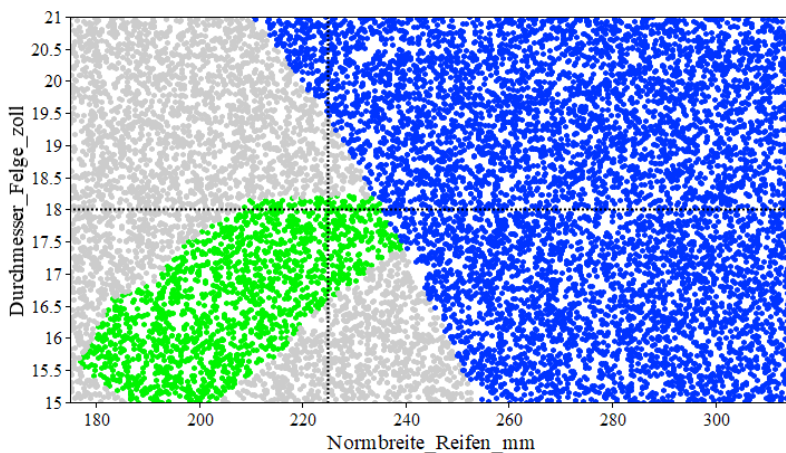
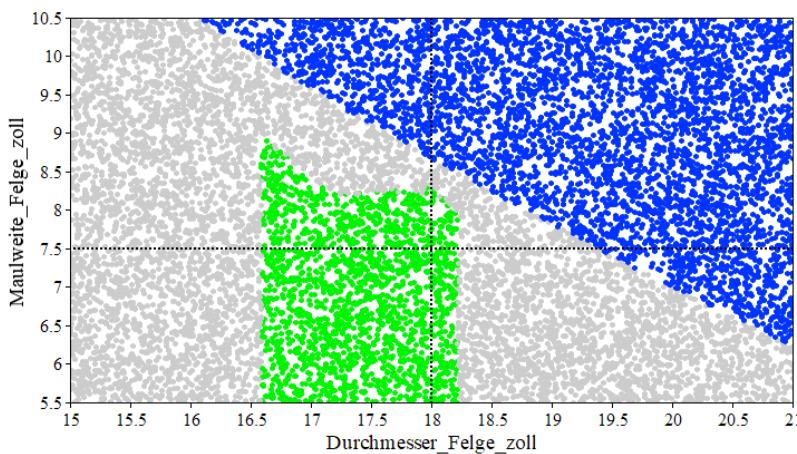
Anhang 85: Anhang 83 (grau) inklusive Rollwiderstand ($B_F = 7,5''$)Anhang 86: Anhang 84 (grau) inklusive Rollwiderstand ($B_{R,N} = 225 \text{ mm}$)

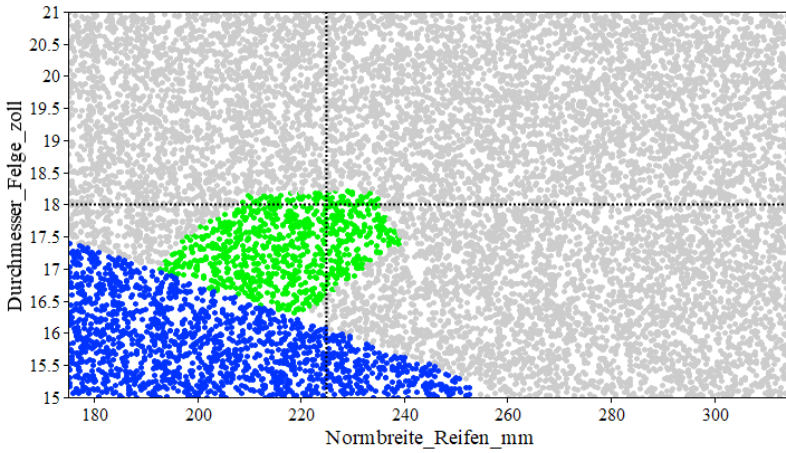


Anhang 87: Anhang 85 (grau) inklusive Aerodynamik ($B_F = 7,5''$)

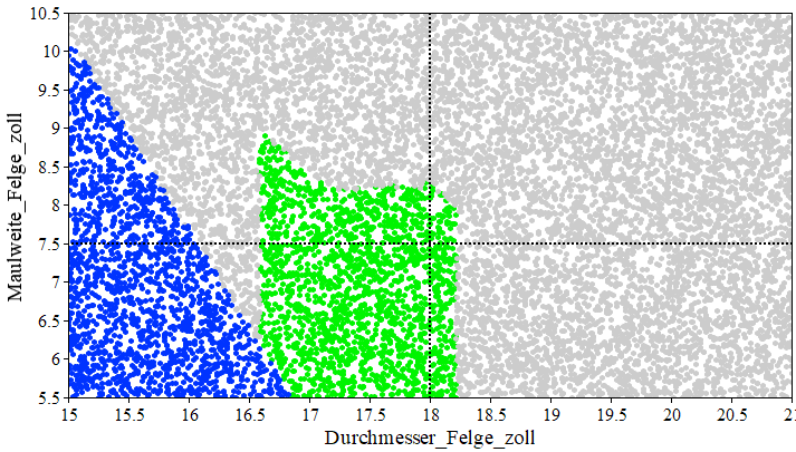


Anhang 88: Anhang 86 (grau) inklusive Aerodynamik ($B_{R,N} = 225\text{ mm}$)

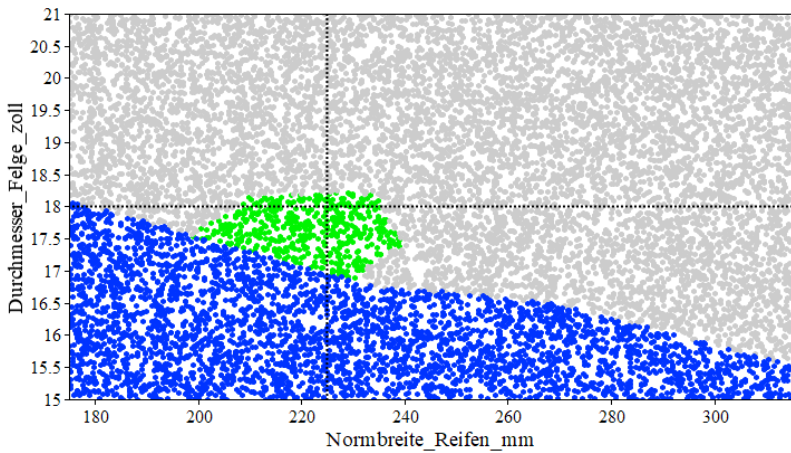
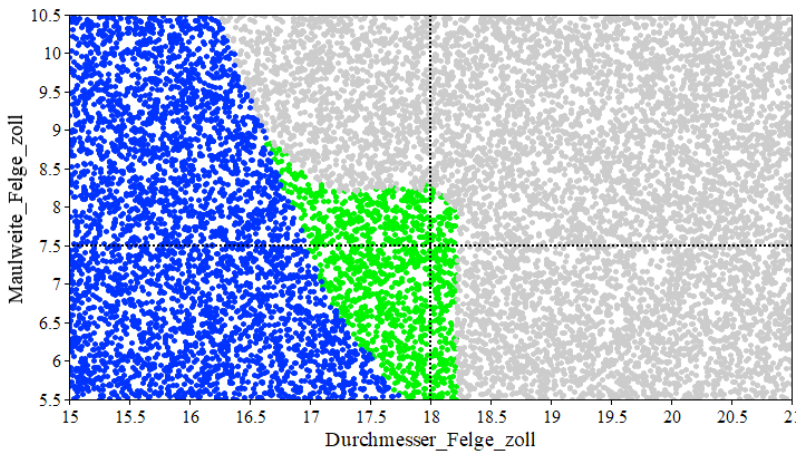
Anhang 89: Anhang 87 (grau) inklusive Masseneigenschaften ($B_F = 7,5''$)Anhang 90: Anhang 88 (grau) inklusive Masseneigenschaften ($B_{R,N} = 225 \text{ mm}$)

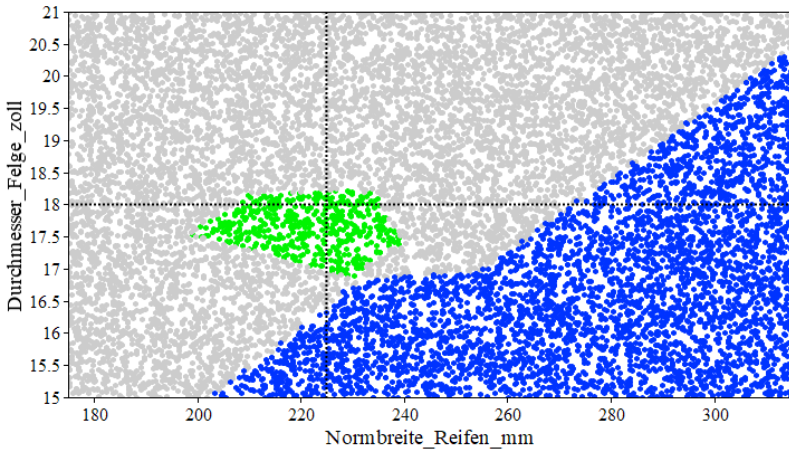


Anhang 91: Anhang 89 (grau) inklusive Vertikalsteifigkeit ($B_F = 7,5''$)

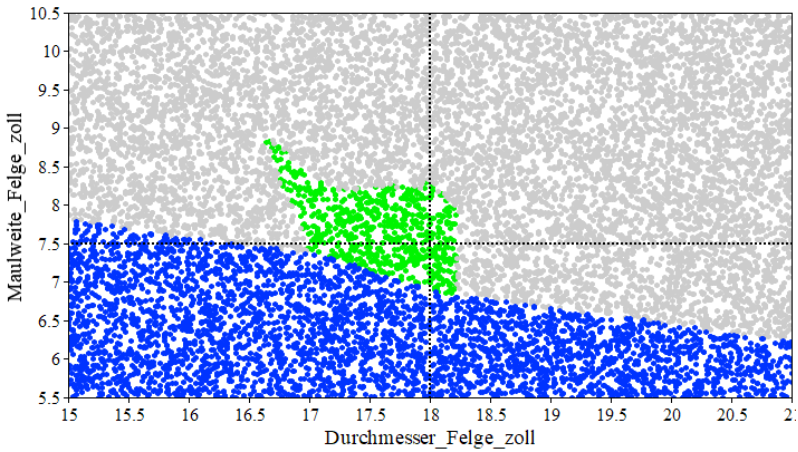


Anhang 92: Anhang 90 (grau) inklusive Vertikalsteifigkeit ($B_{R,N} = 225\text{ mm}$)

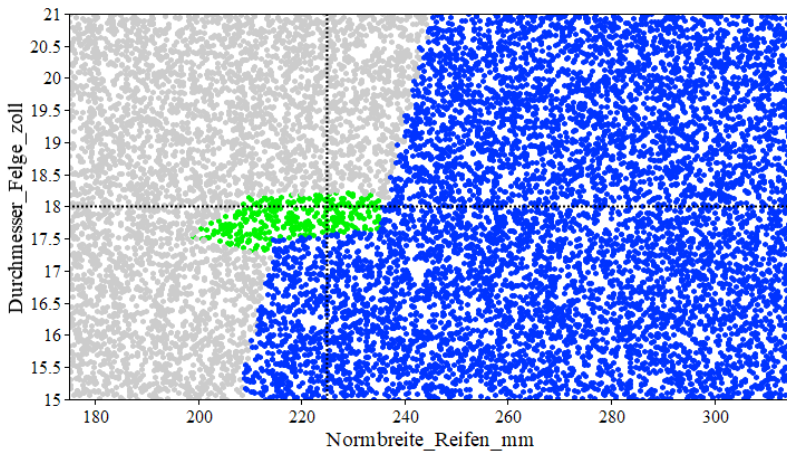
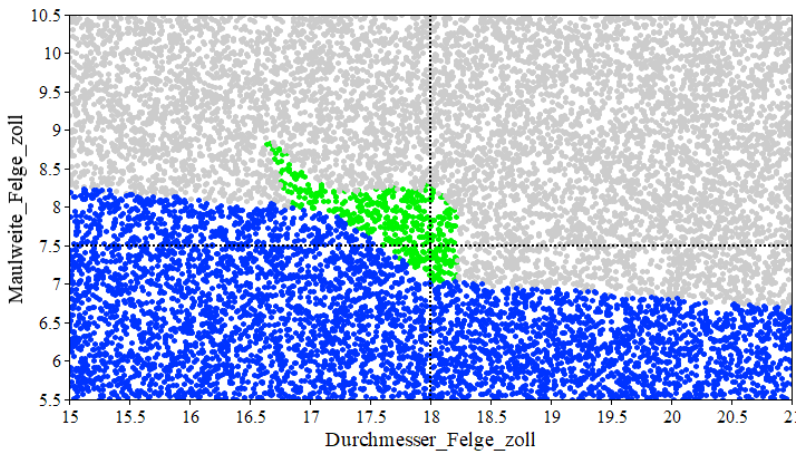
Anhang 93: Anhang 91 (grau) inklusive Schräglaufsteifigkeit ($B_F = 7,5''$)Anhang 94: Anhang 92 (grau) inklusive Schräglaufsteifigkeit ($B_{R,N} = 225\text{ mm}$)

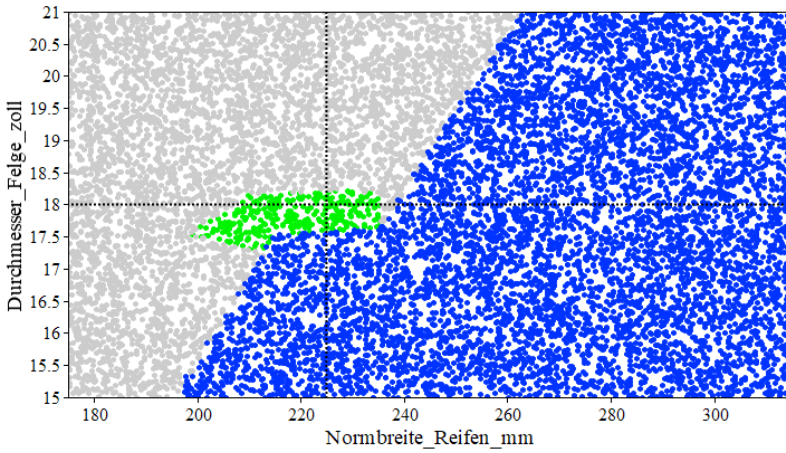


Anhang 95: Anhang 93 (grau) inklusive Reibwert quer ($B_F = 7,5''$)

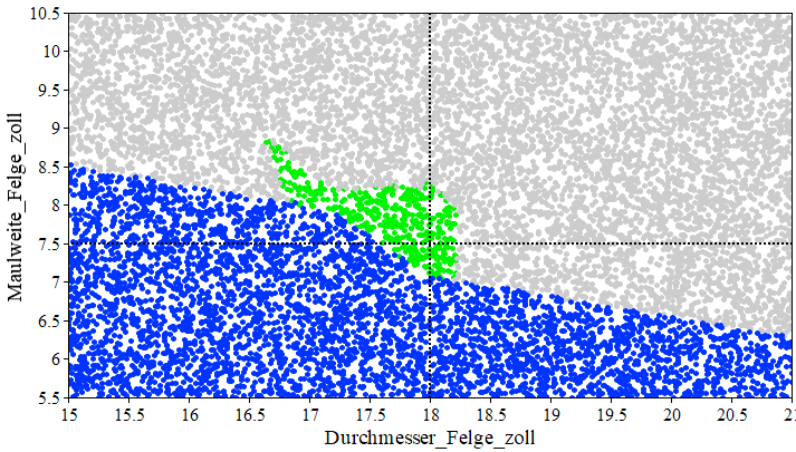


Anhang 96: Anhang 94 (grau) inklusive Reibwert quer ($B_{R,N} = 225\text{ mm}$)

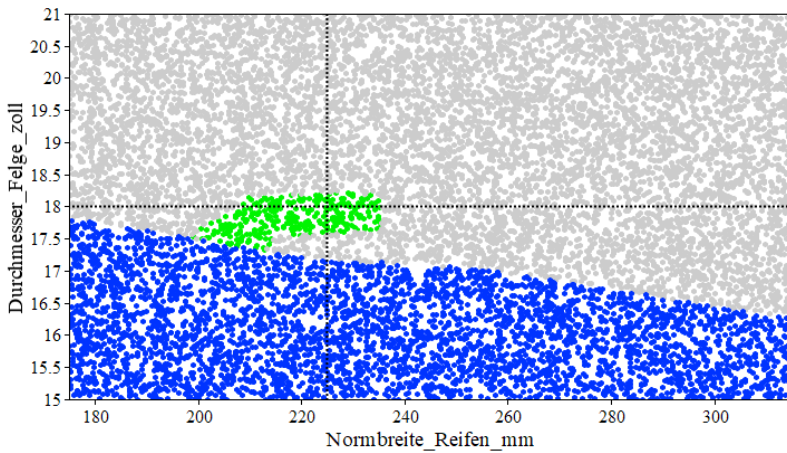
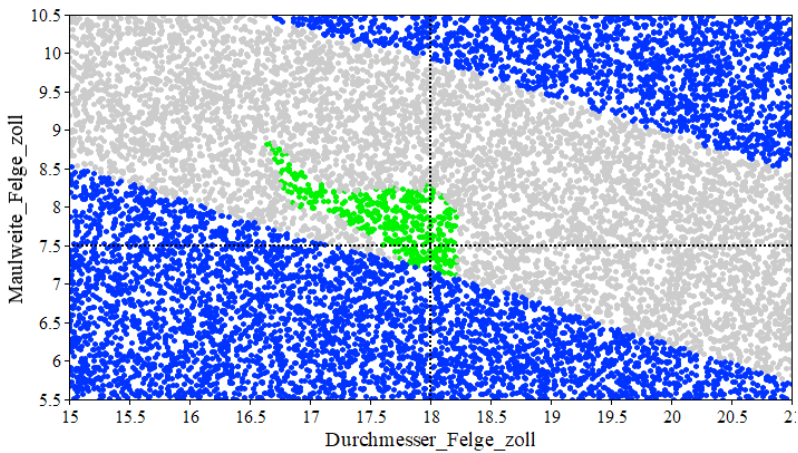
Anhang 97: Anhang 95 (grau) inklusive Einlauflänge ($B_F = 7,5''$)Anhang 98: Anhang 96 (grau) inklusive Einlauflänge ($B_{R,N} = 225 \text{ mm}$)

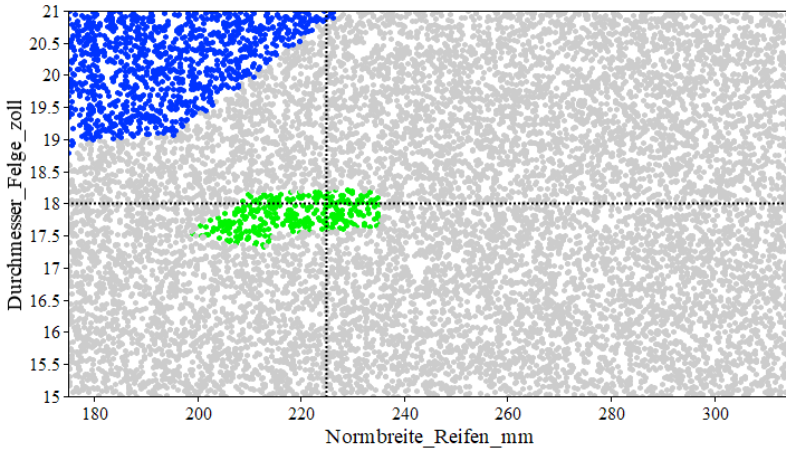


Anhang 99: Anhang 97 (grau) inklusive Reibwert längs ($B_F = 7,5''$)

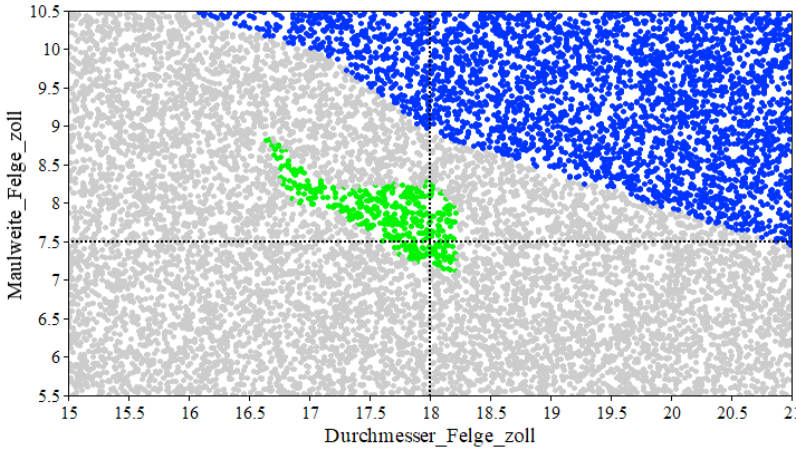


Anhang 100: Anhang 98 (grau) inklusive Reibwert längs ($B_{R,N} = 225\text{ mm}$)

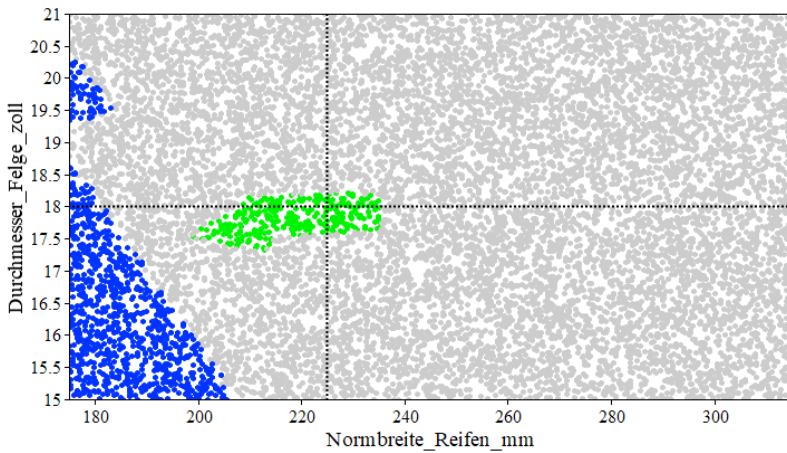
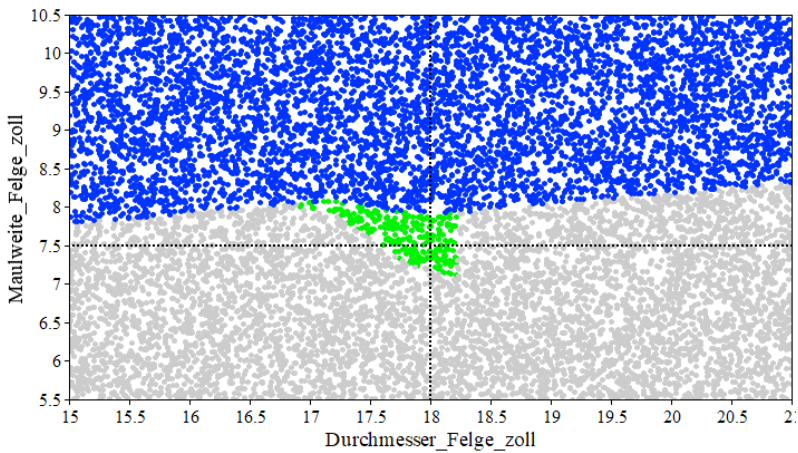
Anhang 101: Anhang 99 (grau) inklusive Aligning Stiffness ($B_F = 7,5''$)Anhang 102: Anhang 100 (grau) inklusive Aligning Stiffness ($B_{R,N} = 225 \text{ mm}$)

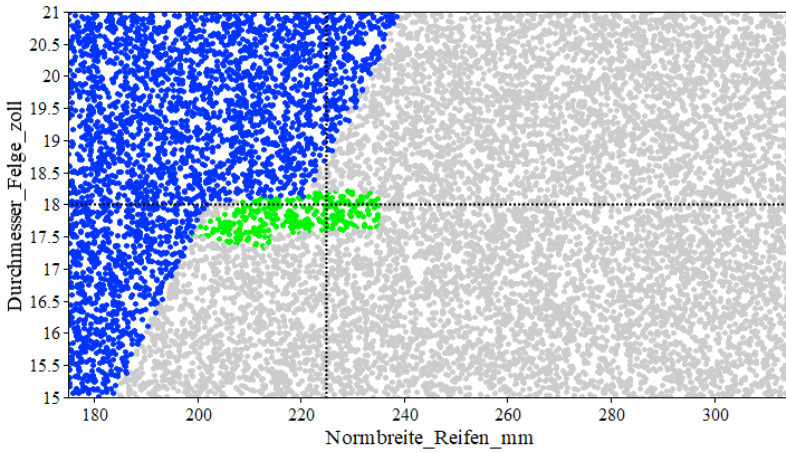


Anhang 103: Anhang 101 (grau) inklusive Bohrmoment ($B_F = 7,5''$)

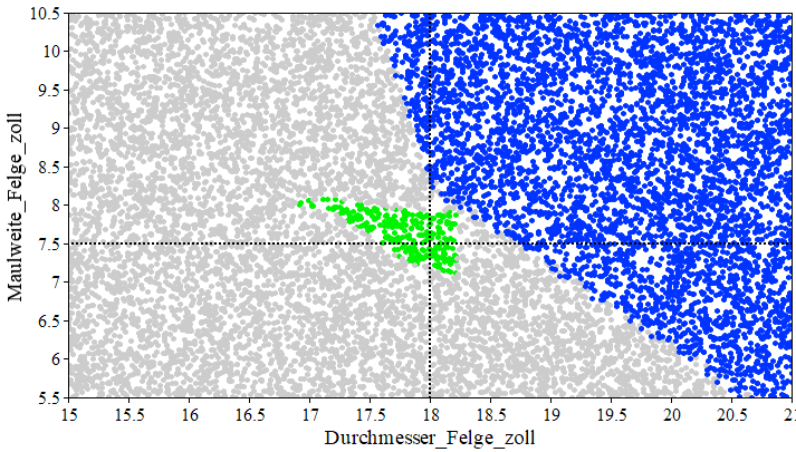


Anhang 104: Anhang 102 (grau) inklusive Bohrmoment ($B_{R,N} = 225\text{ mm}$)

Anhang 105: Anhang 103 (grau) inklusive Sturzsteifigkeit ($B_F = 7,5''$)Anhang 106: Anhang 104 (grau) inklusive Sturzsteifigkeit ($B_{R,N} = 225\text{ mm}$)



Anhang 107: Anhang 105 (grau) inklusive Körperschall ($B_F = 7,5''$)



Anhang 108: Anhang 106 (grau) inklusive Körperschall ($B_{R,N} = 225\text{ mm}$)

Literaturverzeichnis

- Adamski, D. (2014). *Simulation in der Fahrwerktechnik*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Allgemeiner Deutscher Automobil-Club. (2007). Eine Frage der Größe. *ADAC Motorwelt* 7/2007, S. 30.
- Arens, T., Hettlich, F., Karpfinger, C., Kockelkorn, U., Lichtenegger, K., & Stachel, H. (2018). *Mathematik*. Berlin: Springer Spektrum.
- Arenz, P. (2005). *Diskrete und schnelle Fourier Transformation*. Trier: Universität.
- Bachmann, T. (1996). Literaturrecherche zum Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn. *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12: Verkehrstechnik/ Fahrzeugtechnik, Nr. 286*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.
- Beckenbauer, T. (2008). Physik der Reifen-Fahrbahn-Geräusche. *Geräuschmindernde Fahrbahnbeläge in der Praxis - Lärmaktionsplanung 4. Informationstage*. Gelsenkirchen: Müller-BBM.
- Becker, K. (2000). *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen*. Tübingen: Expert.
- Böhm, F., & Knothe, K. (1998). *Hochfrequenter Rollkontakt der Fahrzeugräder*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Braess, H.-H. (2013). *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Breuer, B. (2012). *Bremsenhandbuch*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Breuer, S., & Rohrbach-Kerl, A. (2015). *Fahrzeugdynamik, Mechanik des bewegten Fahrzeugs*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Bundesministerium der Justiz. (2021). *Bundesgesetzblatt Jahrgang 2021 Teil I Nr. 48*.
- Caprioli, D., Ferrali, L., & Cardillo, M. (2018). Battery Electric Vehicles - What is the future for the NVH Package? *Automotive Acoustics, Sonderheft 2/2018*, S. 6-11.

- Clark, S. K. (1977). *Geometric Effects on the Rolling Resistance of Pneumatic Tires*. Cambridge: Society of Automotive Engineers.
- Cogotti, A. (1983). Aerodynamic Characteristics of Car Wheels. *International Journal of Vehicle Design, SP3, Impact of Aerodynamics on Vehicle Design*, S. 173-196.
- Continental Reifen Deutschland GmbH. (2009). *Reifengrundlagen Pkw*. Continental Reifen Deutschland GmbH.
- Curtiss, W. W. (1969). Low Power Loss Tires. *SAE paper No. 690108*.
- Decker, M. (2009). Dissertation. *Zur Beurteilung der Querdynamik von Personenkraftwagen*. München: Technische Universität.
- Dettki, F. (2005). Methoden zur objektiven Bewertung des Geradeauslaufs von Personenkraftwagen. *Dissertation*. Stuttgart: Universität.
- Deutscher Bundestag. (2017). *Drucksache 18/11776*. Berlin.
- Di Luise, P. (2015). Modelling and analysis of the influence tyres have on ride comfort. *Master Thesis*. Neapel: Università' degli studi di Napoli Federico II.
- Dietsche, K.-H. (2019). *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Dümbgen, L. (2016). *Einführung in die Statistik*. Basel: Springer.
- Einsle, S. (2010). Analyse und Modellierung des Reifenübertragungsverhaltens bei transienten und extremen Fahrmanövern. *Dissertation*. Dresden: Technische Universität Dresden.
- Europäische Union. (2009). *Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates*.
- Europäische Union. (2017). *Empfehlung (EU) 2017/948 der Kommission*.
- Europäische Union. (2019). *Verordnung (EU) 2019/631 des Europäischen Parlaments und des Rates*.
- European Environment Agency. (2016). Monitoring CO2 emissions from new passenger cars and vans in 2015. *EEA Report 27/2016*.
- Fach, M. (1996). Kraftschlußverhalten von „Öko-Reifen“. *Abschlussbericht zu Projekt Nr. 96 531: Kraftschluss bei Nässe, Einflussgrößen und*

- Erkennung, Kraftschlussverhalten von rollwiderstandsoptimierten Reifen.* Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Fahrmeir, L., Heumann, C., Künstler, R., Pigeot, I., & Tutz, G. (2016). *Statistik - Der Weg zur Datenanalyse.* Berlin: Springer Spektrum.
- French, T. (1989). *Tyre Technology.* New York: Adam Hilger.
- Fuchs, S. (2014). Verfahren zur parameterbasierten Gewichtsabschätzung neuer Fahrzeugkonzepte. *Dissertation.* München: Technische Universität.
- Gengenbach, W. (1967). Das Verhalten von Kraftfahrzeugreifen auf trockener und insbesondere nasser Fahrbahn: experimentelle Untersuchungen auf Prüfstand und Straße. *Dissertation.* Karlsruhe: Universität.
- Geyer, W. (1971). Beitrag zur Gummireibung auf trockenen und insbesondere nassen Oberflächen. *Dissertation.* München: Technische Universität.
- Greiner, M., & Heimann, P. (2013). Reifenrollwiderstand - Nassgriff - Reifen-Fahrbahn-Geräusch. *Abschlussbericht.* Stuttgart: Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg.
- Greiner, M., Sauer, R., Gauterin, F., & Wiedemann, J. (2016). Entwicklung einer realitätsnahen Rollwiderstandsmessprozedur basierend auf realen Fahrzyklen bei Elektrofahrzeugen. *Abschlussbericht.* Stuttgart: Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg.
- Grollius, S. (2013). Analyse des gekoppelten Systems Reifen-Hohlraum-Radführung im Rollzustand und Entwicklung eines Rollgeräuschmodells. *Dissertation.* Karlsruhe: Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, Band 18.
- Guiggiani, M. (2014). *The Science of Vehicle Dynamics.* Berlin: Springer, Dordrecht.
- Gutjahr, D. (2013). Objektive Bewertung querdynamischer Reifeneigenschaften im Gesamtfahrzeugversuch. *Dissertation.* Karlsruhe: Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, Band 20.
- Haken, K.-L. (2013). *Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik.* München: Hanser.
- Hedderich, J., & Sachs, L. (2016). *Angewandte Statistik - Methodensammlung mit R.* Berlin: Springer Spektrum.

- Heißing, B., & Ersoy, M. (2013). *Fahrwerkhandbuch*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Henze, N., & Kadelka, D. (2010). Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik für Studierende der Informatik und des Ingenieurwesens. *Vorlesungsskript*. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.
- Hermann, K. (2010). Die Diskrete Fouriertransformation (DFT). *Vorlesungsskript: Digital Signal Processing*. Wien: Technische Universität.
- Hilscher, C. (2008). Komfortrelevante Charakterisierung des Übertragungsverhaltens von Reifen in Messung und Simulation. *Dissertation*. Dresden: Technische Universität.
- Hoffmann, L. (2018). Entwicklung einer Methode zur Abschätzung komfortrelevanter Reifeneigenschaften am Beispiel des Körperschalls. *Master Thesis*. Hamburg: Technische Universität.
- Holtschulze, J. (2006). Analyse der Reifenverformungen für eine Identifikation des Reibwerts und weiterer Betriebsgrößen zur Unterstützung von Fahrdynamikregelsystemen. *Dissertation*. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule.
- ISO 2850. (2009). *ISO 2850: Passenger car, truck and bus tyres - Methods of measuring rolling resistance*. Genf: International Organization for Standardization.
- ISO 6344-2. (1998). *ISO 6344-2: Coated abrasives - Grain size analysis - Part 2: Determination of grain size distribution of macrogrits P12 to P220*. Genf: International Organization for Standardization.
- Jäger, H., Mastel, R., & Knaebel, M. (2016). *Technische Schwingungslehre, Grundlagen - Modellbildung - Anwendungen*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Janssen, L., & Hucho, W.-H. (1973). The effect of various parameters on the aerodynamic drag of passenger cars. *Advances in road vehicle aerodynamics*. Cranfield: British Hydromechanical Association.
- Jeschor, M. (2005). Ein neues Verfahren zur Bewertung von Runflat-Reifen - ein Beitrag auf dem Weg zum reserveradlosen Pkw. *Dissertation*. Dresden: Technische Universität.

- Käppler, W. (2015). *Smart Vehicle Handling, Test und Evaluation in der Fahrzeugtechnik*. Berlin: Springer Vieweg.
- Klempau, F. (2003). Untersuchungen zum Aufbau eines Reibwertvorhersagesystems in fahrenden Fahrzeug. *Dissertation*. Darmstadt: Technische Universität.
- Koblitz, V. (2016). Zielkonflikte in der Reifenentwicklung. *Technik Forum 2016*. Sevilla: Continental AG.
- Kosfeld, R., Eckey, H., & Türck, M. (2016). *Deskriptive Statistik*. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Kummer, H. (1966). Unified theory of rubber and tire friction. *Engineering Research Bulletin B-94*. Pennsylvania: The Pennsylvania State University.
- Kusaka, K., & Nagayama, N. (2015). A Statistical Tire Model Concept - Applications to Vehicle Development. *SAE Technical Papers, No. 2015-01-1578*. <https://doi.org/10.4271/2015-01-1578>.
- Kusaka, K., & Suzuki, T. (2013). The Statistical Tire Model and Its Application to Vehicle Dynamics Design. *7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control*. Tokyo: The International Federation of Automotive Control.
- Kuwayama, I., Matsumoto, H., & Heguri, H. (2013). Development of a next-generation-size tire for eco-friendly vehicles. *chassis.tech plus, 4th International Munich Chassis Symposium*, S. 623-644.
- Langer, W. (2002). Einführung in die Grundlagen der Regressionsanalyse. *Integrierte Veranstaltung Methoden IV - Wintersemester 2002/2003*. Halle-Wittenberg: Martin-Luther-Universität.
- Laschet, A. (2007). *Systemanalyse in der Kfz-Antriebstechnik IV: Schwingungen - NVH-Optimierung - Komplette Systemabstimmung – Akustische Beurteilung, Haus der Technik Fachbuch Band 79*. Essen: Expert Verlag.
- Leister, G. (2015). *Fahrzeugräder - Fahrzeugreifen*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Lepoittevin, G., Horak, J., & Caprioli, D. (2019). The New Challenges of NVH Package for BEVs. *SAE Technical Papers, No. 2019-01-1452*. Society of Automotive Engineers, Inc.

- Link, A., Widdecke, N., Wittmeier, F., & Wiedemann, J. (I-2016). Analyse, Messung und Optimierung des Ventilationswiderstands von Pkw-Rädern. *FAT-Schriftenreihe 291*. Berlin: VDA.
- Link, A., Widdecke, N., Wittmeier, F., & Wiedemann, J. (II-2016). Bestimmung des aerodynamischen Ventilationswiderstands von Pkw-Rädern. *Automobiltechnische Zeitschrift, 10/2016, Jahrgang 118*, S. 42-47.
- Löfdahl, M., Johnsson, R., & Nykänen, A. (2015). An auralization model for structure-borne tire noise. *Applied Acoustics, Volume 96*, S. 61-67.
- Mahnken, R. (2010). *Lehrbuch der Technischen Mechanik - Dynamik*. Berlin: Springer.
- Mainzer, K. (2019). *Künstliche Intelligenz – Wann übernehmen die Maschinen?* Berlin: Springer.
- Malinverni, G. (2015). *More than 50 years of standardisation*. Brüssel: The European Tyre and Rim Technical Organisation.
- Männer, R., & Lange, R. (1994). Rechnen mit Neuronalen Netzen - Wie funktionieren Neuronale Netze und wie werden sie trainiert? *Physical Review B, Jahrgang 50, Ausgabe 5*, S. 445-449.
- Massaro, M., Cossalter, V., & Cusimano, G. (2013). The effect of inflation pressure on tyre properties and motorcycle stability. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. Institution of Mechanical Engineers. <http://dx.doi.org/10.1177/0954407013496231>.
- MathWorks. (I-2018). Interpret Linear Regression Results. *Matlab R2018b - Documentation*. Natick, Massachusetts, United States: The MathWorks, Inc.
- MathWorks. (II-2018). Neural Network Toolbox. *Matlab R2018b - Documentation*. Natick, Massachusetts, United States: The MathWorks, Inc.
- MathWorks. (III-2018). zscore. *Matlab R2018b - Documentation*. Natick, Massachusetts, United States: The MathWorks, Inc.
- McKinsey&Company. (2016). Automotive revolution - perspective towards 2030. *Advanced Industries January 2016*.

- Mehrjerdian, E. (2015). Potenziale einer Lenkmomentenempfehlung unter fahrdynamischen Gesichtspunkten. *Dissertation*. Dortmund: Technische Universität.
- Mitschke, M., & Wallentowitz, H. (2014). *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Morello, L., Rosti Rossini, L., Pia, G., & Tonoli, A. (2011). *The Automotive Body*. Berlin: Springer Science + Business Media S.A.
- Niedermeier, F. (2015). Virtuelle Grundauslegung funktionaler Reifeneigenschaften im Auslegungsprozess Fahrdynamik. *Dissertation*. Karlsruhe: Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik.
- Niedermeier, F., Peckelsen, U., & Gauterin, F. (2013). Virtual tires in the early vehicle development phase. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Volume 3, Issue 7*.
- Niedermeier, F., Peckelsen, U., Gauterin, F., & Gobbi, M. (2013). Virtual Optimization of the Interaction between Tires and the Vehicle. *International Journal of Modeling an Optimization, Volume 3, No. 1*.
- Niemeyer, P. (2017). Einfluss der Felgenmaulweite auf das Fahrverhalten von Pkw. *Dissertation*. Aachen: Schriftenreihe Automobiltechnik, ika 210/17.
- Pacejka, H. (2002). *Tire and Vehicle Dynamics*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Pacejka, H., & Bakker, E. (1993). The Magic Formula tyre model. *Vehicle System Dynamics, Jahrgang 21*, S. 1-18.
- Pauwelussen, J., Dalhuijsen, W., & Merts, M. (2007). Tyre dynamics, tyre as a vehicle component; Part 1: Tyre handling performance. *Virtual Education in Rubber Technology (VERT), FI-04-B-F-PP-160531*. HAN University.
- Peckelsen, U. (2017). Objective Tyre Development Definition and Analysis of Tyre Characteristics and Quantification of their Conflicts. *Dissertation*. Karlsruhe: Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, Band 57.

- Peckelsen, U., Gauterin, F., & Unrau, H.-J. (2015). Definition and Modeling of the Power Loss of Tires. *Tire Science and Technology, Vol. 43, No. 2*, S. 163-180.
- Pfadenhauer, M., Wickern, G., & Zwicker, K. (1996). On the Influence of Wheels and Tyres on the Aerodynamic Drag of Vehicles. *MIRA International Conference on Vehicle Aerodynamics*. Birmingham.
- Pfeffer, P., & Harrer, M. (2013). *Lenkungsbandbuch*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Phleps, P., Feige, I., & Zapp, K. (2015). *Die Zukunft der Mobilität, Szenarien für Deutschland in 2035*. München: Institut für Mobilitätsforschung.
- Pottinger, M., & Yager, T. (1986). *The Tire Pavement Interface*. Baltimore: American Society for Testing and Materials.
- Proff, H., Brand, M., Mehnert, K., Schmidt, A., & Schramm, D. (2016). *Elektrofahrzeuge für die Städte von morgen*. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Reimpell, J., & Betzler, J. (2005). *Fahrwerktechnik : Grundlagen*. Würzburg: Vogel.
- Rhyne, T., & Cron, S. (2012). A Study on Minimum Rolling Resistance. *Tire Science and Technology, Vol. 40, No. 4*, S. 220-233.
- Rönitz, R., Braess, H.-H., & Zomotor, A. (1977). Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen. *Automobil-Industrie 1/77*, S. 29-39.
- Rösli, K. (2012). Eine Methode zur simulationsbasierten Grundauslegung von PKW-Fahrwerken mit Vertiefung der Betrachtungen zum Fahrkomfort. *Dissertation*. München: Technische Universität.
- SAE J2047. (1998). *Tire Performance Technology*. Society of Automotive Engineers.
- Saemann, E.-U. (2010). Innovative Reifen für grüne Stadtautos. *DAGA - Jahrestagung für Akustik*. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA).
- Sandberg, U., & Ejsmont, J. (2002). *Tyre/ Road Noise Reference Book*. Kisa, Schweden: Informex.

- Schmid, A., & Förschl, S. (2009). From Real to Virtual Tyre, Tyre Model Parameterisation. *Automobiltechnische Zeitschrift*, 03/2009, Jahrgang 111, S. 22-27.
- Schnepf, B. (2016). Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Umströmung eines Pkw-Rades in Simulation und Experiment. *Dissertation*. München: Technische Universität.
- Schönemann, B., Henze, R., Küçükay, F., & Kudritzki, D. (2013). Auswirkungen der Rekuperation auf die Fahrdynamik. *Automobiltechnische Zeitschrift*, 06/2013, Jahrgang 115, S. 520-527.
- Schulze, T., Bolz, G., Strübel, C., & Wies, B. (2010). Reifen im Zielkonflikt zwischen Rollwiderstand und Nassgriff. *Automobiltechnische Zeitschrift*, 07-08/2010, Jahrgang 112, S. 516-523.
- Schütz, T. (2013). *Hucho - Aerodynamik des Automobils*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Schütz, T. (2017). Aerodynamische Effizienz von Fahrwerkskomponenten bei zukünftigen Fahrzeugen. *VDI-Berichte 2296*, S. 111-121.
- Segatori, S. (2017). Quantification of the Influence Tyre Characteristics have on Steering Feel and Truck Groove Sensitivity and Modelling of their Conflicts. *Master Thesis*. Rom: Università di Roma La Sapienza.
- Siebertz, K., van Bebber, D., & Hochkirchen, T. (2010). *Statistische Versuchsplanung*. Heidelberg: Springer.
- Société de Technologie Michelin. (2002). *The tyre, Mechanical and acoustic comfort*. Clermont-Ferrand: Société de Technologie Michelin.
- Société de Technologie Michelin. (2005). *Der Reifen, Rollwiderstand und Kraftstoffersparnis*. Clermont-Ferrand: Société de Technologie Michelin.
- Strecker, S. (1997). Künstliche Neuronale Netze - Aufbau und Funktionsweise. *Arbeitspapiere WI, Nr. 10/1997*. Mainz: Johannes Gutenberg-Universität.
- Strigel, A., Peckelsen, U., Unrau, H.-J., & Gauterin, F. (2018). Auswirkungen der Reifendimension auf den Energieaufwand im Umfeld verschiedener Fahrzyklen und Fahrzeugkonzepte. *Forschung im Ingenieurwesen*. Springer. <https://doi.org/10.1007/s10010-018-0274-0>.

- Strigel, A., Peckelsen, U., Unrau, H.-J., & Gauterin, F. (2019). Estimation of feasible ranges of functional tire characteristics based on tire dimension, inflation pressure, and wheel load. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. Institution of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1177/0954407019831575>.
- Strigel, A., Peckelsen, U., Unrau, H.-J., & Gauterin, F. (2020). Determination of optimal rim and tire dimensions regarding load capacity, driving dynamics, and efficiency. *Automotive and Engine Technology*. Springer Nature Switzerland AG. <https://doi.org/10.1007/s41104-020-00064-z>.
- The European Tyre and Rim Technical Organisation. (2018). *Standards Manual 2018*. Brussels: The European Tyre and Rim Technical Organisation.
- The International Council on Clean Transportation. (2016). European Vehicle Market Statistics. *Pocketbook 2016/17*.
- Thomaier, M. (2008). Optimierung der NVH-Eigenschaften von Pkw-Fahrwerkstrukturen mittels Active-Vibration-Control. *Dissertation*. Darmstadt: Technische Universität.
- Thompson, G. D. (1977). *Technical Support Report for Regulatory Action Variations in Tire Rolling Resistance*. U.S. Environmental Protection Agency.
- Trzesniowski, M. (2008). *Rennwagentchnik*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- United Nations. (2014). Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure. *Addendum 15: Global technical regulation No. 15*, S. 46-48.
- Unrau, H.-J. (2012). Der Einfluss der Fahrbahnoberflächenkrümmung auf den Rollwiderstand, die Cornering Stiffness und die Aligning Stiffness von Pkw-Reifen. *Dissertation*. Karlsruhe: Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, Band 16.
- Unterreiner, M. (2013). Modellbildung und Simulation von Fahrzeugmodellen unterschiedlicher Komplexität. *Dissertation*. Duisburg-Essen: Universität.
- van der Jagt, P. (1999). *Prediction of steering efforts during stationary or slow rolling parking maneuvers*. Aachen: Ford Forschungszentrum Aachen GmbH.

- Vennebörger, M., Strübel, C., Wies, B., & Wiese, K. (2013). Leichtlaufreifen für Pkw mit niedrigem CO₂-Ausstoss. *Automobiltechnische Zeitschrift*, 08/2013, Jahrgang 115, S. 572-577.
- Vilela, D., Luzetti, E., & Anderson, G. (2010). Tire size and inflation pressure influence on static steering effort. *SAE Technical Paper Series; 2010-36-0105*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Vogt, M., Duddeck, F., Wahle, M., & Zimmermann, M. (2018). Optimizing tolerance to uncertainty in systems design with early- and late-decision variables. *Journal of Management Mathematics*, S. 1-12.
<https://doi.org/10.1093/imaman/dpy003>.
- Vorotovic, G., Rakicevic, B., Mitic, S., & Stamenkovic, D. (2013). Determination of Cornering Stiffness Through Integration of A Mathematical Model and Real Vehicle Exploitation Parameters . *FME Transactions*, Vol. 41, No. 1, S. 66-71.
- Weinberger, M., & Schramm, D. (2017). Influencing factors on steering wheel torque during the static parking manoeuvre. 17. *Internationales Stuttgarter Symposium: Automobil- und Motorentechnik*, S. 899-914.
- Weinberger, M., Becker, J., & Schramm, D. (2018). Tire contact patch pressure distribution model for the static parking maneuver. 18. *Internationales Stuttgarter Symposium, Proceedings*, S. 391-406;
https://doi.org/10.1007/978-3-658-21194-3_95.
- Weisberg, S. (2005). *Applied Linear Regression*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Wiedemann, E. (2014). Ableitung von Elektrofahrzeugkonzepten aus Eigenschaftszielen. *Dissertation*. Göttingen: Cuvillier.
- Winterhoff, M., Kahner, C., Ulrich, C., Saylor, P., & Wenzel, E. (2009). *Zukunft der Mobilität 2020, Die Automobilindustrie im Umbruch?* Brüssel: Arthur D. Little.
- Wittmeier, F. (2014). *Ein Beitrag zur aerodynamischen Optimierung von Pkw Reifen*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Wittmeier, F., Widdecke, N., Wiedemann, J., & Lindener, N. (2013). Reifenentwicklung unter aerodynamischen Aspekten. *Automobiltechnische Zeitschrift*, 02/2013, Jahrgang 115, S. 144-150.
- Zeller, P. (2012). *Handbuch Fahrzeugakustik*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

- Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung, B.-W. (2018). *Presseinformation 04/2018*. Stuttgart.
- Zimmermann, M., & Edler von Hoessle, J. (2013). Computing solution spaces for robust design. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, S. 290-307. <https://doi.org/10.1002/nme.4450>.
- Zomotor, A. (1991). *Fahrwerktechnik: Fahrverhalten*. Würzburg: Vogel.
- Zomotor, A., Braess, H.-H., & Rönitz, R. (1998). Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen, Ein Rückblick auf die letzten 20 Jahre. *Automobiltechnische Zeitschrift*, 03/1998. <https://doi.org/10.1007/BF03223403>.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Reifenkennzeichnung nach ETRTO	8
Abbildung 2.2:	Reifenmaße nach ETRTO	10
Abbildung 2.3:	Phasen der Räder- und Reifenentwicklung (Hoffmann, 2018)	11
Abbildung 2.4:	Kräfte beim frei rollenden Reifen.....	16
Abbildung 2.5:	Außentrommelprüfstand zur Rollwiderstandsermittlung (Peckelsen, 2017)	17
Abbildung 2.6:	Flachbahnprüfstand der Firma IABG (Schmid & Förschl, 2009).....	31
Abbildung 2.7:	Außentrommelprüfstand zur Körperschallmessung	48
Abbildung 2.8:	Korrelation des vibroakustischen Ersatzwerts zum Innengeräusch.....	51
Abbildung 2.9:	Vorwärtsgerichtetes KNN mit einem Neuron.....	58
Abbildung 4.1:	Reifenbreiten und Querschnittsverhältnisse der Datenbasis (Rollwiderstand)	72
Abbildung 4.2:	Reifenbreiten und Felgendurchmesser der Datenbasis (Rollwiderstand)	73
Abbildung 4.3:	Mess- und Näherungswerte des Regressionsmodells (Rollwiderstand)	74
Abbildung 4.4:	Bestimmtheitsmaße der Trainingsdaten (Rollwiderstand). 77	
Abbildung 4.5:	Bestimmtheitsmaße der Test- und Validierungsdaten (Rollwiderstand)	78
Abbildung 4.6:	Bestimmtheitsmaße der gesamten Datenbasis (Rollwiderstand)	78
Abbildung 4.7:	Mess- und Näherungswerte des KNN (Rollwiderstand)....	79
Abbildung 4.8:	Streuungshistogramm des Rollwiderstandsbeiwerts.....	80

Abbildung 5.1:	Reifenbreiten und Querschnittsverhältnisse der Datenbasis (Vertikalsteifigkeit)	84
Abbildung 5.2:	Felgendurchmesser und Maulweiten der Datenbasis (Vertikalsteifigkeit)	85
Abbildung 5.3:	Radlasten und Fülldrücke der Datenbasis (Vertikalsteifigkeit)	86
Abbildung 5.4:	Mess- und Näherungswerte des Regressionsmodells (Vertikalsteifigkeit)	87
Abbildung 5.5:	Bestimmtheitsmaße der Test- und Validierungsdaten (Vertikalsteifigkeit)	89
Abbildung 5.6:	Mess- und Näherungswerte des KNN (Vertikalsteifigkeit)	91
Abbildung 5.7:	Streuungshistogramm der Vertikalsteifigkeit.....	92
Abbildung 5.8:	Mess- und Näherungswerte des Regressionsmodells (Schräglaufsteifigkeit).....	94
Abbildung 5.9:	Mess- und Näherungswerte des Regressionsmodells (Reibwert quer)	95
Abbildung 5.10:	Mess- und Näherungswerte des Regressionsmodells (Einlauflänge).....	95
Abbildung 5.11:	Bestimmtheitsmaße der Test- und Validierungsdaten (Schräglaufsteifigkeit).....	99
Abbildung 5.12:	Bestimmtheitsmaße der Test- und Validierungsdaten (Reibwert quer)	99
Abbildung 5.13:	Bestimmtheitsmaße der Test- und Validierungsdaten (Einlauflänge).....	100
Abbildung 5.14:	Mess- und Näherungswerte des KNN (Schräglaufsteifigkeit)	102
Abbildung 5.15:	Mess- und Näherungswerte des KNN (Reibwert quer)...	102
Abbildung 5.16:	Mess- und Näherungswerte des KNN (Einlauflänge)	103
Abbildung 5.17:	Streuungshistogramm der Schräglaufsteifigkeit.....	104
Abbildung 5.18:	Streuungshistogramm des Reibwerts in Querrichtung	104
Abbildung 5.19:	Streuungshistogramm der Einlauflänge	105

Abbildung 5.20: Mess- und Näherungswerte des Regressionsmodells (Reibwert längs)	107
Abbildung 5.21: Bestimmtheitsmaße der Test- und Validierungsdaten (Reibwert längs)	110
Abbildung 5.22: Mess- und Näherungswerte des KNN (Reibwert längs) ..	111
Abbildung 5.23: Streuungshistogramm des Reibwerts in Längsrichtung... 112	
Abbildung 5.24: Mess- und Näherungswerte des Regressionsmodells (Aligning Stiffness)	114
Abbildung 5.25: Mess- und Näherungswerte des Regressionsmodells (Bohrmoment)	115
Abbildung 5.26: Bestimmtheitsmaße der Test- und Validierungsdaten (Aligning Stiffness)	118
Abbildung 5.27: Bestimmtheitsmaße der Test- und Validierungsdaten (Bohrmoment)	118
Abbildung 5.28: Mess- und Näherungswerte des KNN (Aligning Stiffness)120	
Abbildung 5.29: Mess- und Näherungswerte des KNN (Bohrmoment).....	120
Abbildung 5.30: Streuungshistogramm der Aligning Stiffness	121
Abbildung 5.31: Streuungshistogramm des Bohrmoments	122
Abbildung 5.32: Mess- und Näherungswerte des Regressionsmodells (Sturzsteifigkeit)	124
Abbildung 5.33: Bestimmtheitsmaße der Test- und Validierungsdaten (Sturzsteifigkeit)	126
Abbildung 5.34: Mess- und Näherungswerte des KNN (Sturzsteifigkeit)..	128
Abbildung 5.35: Streuungshistogramm der Sturzsteifigkeit	129
Abbildung 6.1: Reifenbreiten und Querschnittsverhältnisse der Datenbasis (Körperschall)	132
Abbildung 6.2: Felgendurchmesser und Maulweiten der Datenbasis (Körperschall)	132
Abbildung 6.3: Radlasten und Fülldrücke der Datenbasis (Körperschall)	133

Abbildung 6.4:	Mess- und Näherungswerte des Regressionsmodells (Körperschall)	135
Abbildung 6.5:	Bestimmtheitsmaße der Test- und Validierungsdaten (Körperschall)	137
Abbildung 6.6:	Mess- und Näherungswerte des KNN (Körperschall).....	139
Abbildung 6.7:	Streuungshistogramm des Ersatzwerts für Körperschall.	140
Abbildung 7.1:	Beispiel zweier FTC mit starkem Zusammenhang	146
Abbildung 7.2:	Beispiel zweier FTC mit geringem Zusammenhang	147
Abbildung 8.1:	Lösungsraum Tragfähigkeit ($BF = 7,5''$).....	161
Abbildung 8.2:	Lösungsraum Tragfähigkeit ($BR, N = 225 mm$).....	162
Abbildung 8.3:	Lösungsraum Energieeffizienz ($BF = 7,5''$).....	164
Abbildung 8.4:	Lösungsraum Energieeffizienz ($BR, N = 225 mm$).....	165
Abbildung 8.5:	Lösungsraum Fahrdynamik ($BF = 7,5''$).....	167
Abbildung 8.6:	Lösungsraum Fahrdynamik ($BR, N = 225 mm$).....	168
Abbildung 8.7:	Lösungsraum Vibroakustik ($BF = 7,5''$)	169
Abbildung 8.8:	Lösungsraum Vibroakustik ($BR, N = 225 mm$)	170
Abbildung 8.9:	Lösungsraum kombiniert ($BF = 7,5''$).....	171
Abbildung 8.10:	Lösungsraum kombiniert ($BR, N = 225 mm$).....	171
Anhang 1:	Reifenbreiten und Querschnittsverhältnisse der Datenbasis (Schräglaufsteifigkeit).....	181
Anhang 2:	Felgendurchmesser und Maulweiten der Datenbasis (Schräglaufsteifigkeit).....	181
Anhang 3:	Radlasten und Fülldrücke der Datenbasis (Schräglaufsteifigkeit).....	182
Anhang 4:	Reifenbreiten und Querschnittsverhältnisse der Datenbasis (Reibwert quer)	182
Anhang 5:	Felgendurchmesser und Maulweiten der Datenbasis (Reibwert quer)	183
Anhang 6:	Radlasten und Fülldrücke der Datenbasis (Reibwert quer)	183

Anhang 7:	Reifenbreiten und Querschnittsverhältnisse der Datenbasis (Einlauflänge).....	184
Anhang 8:	Felgendurchmesser und Maulweiten der Datenbasis (Einlauflänge).....	184
Anhang 9:	Radlasten und Fülldrücke der Datenbasis (Einlauflänge)	185
Anhang 10:	Reifenbreiten und Querschnittsverhältnisse der Datenbasis (Reibwert längs)	185
Anhang 11:	Felgendurchmesser und Maulweiten der Datenbasis (Reibwert längs)	186
Anhang 12:	Radlasten und Fülldrücke der Datenbasis (Reibwert längs)	186
Anhang 13:	Reifenbreiten und Querschnittsverhältnisse der Datenbasis (Aligning Stiffness)	187
Anhang 14:	Felgendurchmesser und Maulweiten der Datenbasis (Aligning Stiffness).....	187
Anhang 15:	Radlasten und Fülldrücke der Datenbasis (Aligning Stiffness)	188
Anhang 16:	Reifenbreiten und Querschnittsverhältnisse der Datenbasis (Bohrmoment)	188
Anhang 17:	Felgendurchmesser und Maulweiten der Datenbasis (Bohrmoment)	189
Anhang 18:	Radlasten und Fülldrücke der Datenbasis (Bohrmoment)	189
Anhang 19:	Reifenbreiten und Querschnittsverhältnisse der Datenbasis (Sturzsteifigkeit).....	190
Anhang 20:	Felgendurchmesser und Maulweiten der Datenbasis (Sturzsteifigkeit).....	190
Anhang 21:	Radlasten und Fülldrücke der Datenbasis (Sturzsteifigkeit)	191
Anhang 22:	Bestimmtheitsmaße der Trainingsdaten (Vertikalsteifigkeit)	191
Anhang 23:	Bestimmtheitsmaße der gesamten Datenbasis (Vertikalsteifigkeit)	192

Anhang 24:	Bestimmtheitsmaße der Trainingsdaten (Schräglaufsteifigkeit).....	192
Anhang 25:	Bestimmtheitsmaße der gesamten Datenbasis (Schräglaufsteifigkeit).....	193
Anhang 26:	Bestimmtheitsmaße der Trainingsdaten (Reibwert quer)	193
Anhang 27:	Bestimmtheitsmaße der gesamten Datenbasis (Reibwert quer)	194
Anhang 28:	Bestimmtheitsmaße der Trainingsdaten (Einlauflänge) ..	194
Anhang 29:	Bestimmtheitsmaße der gesamten Datenbasis (Einlauflänge)	195
Anhang 30:	Bestimmtheitsmaße der Trainingsdaten (Reibwert längs)	195
Anhang 31:	Bestimmtheitsmaße der gesamten Datenbasis (Reibwert längs).....	196
Anhang 32:	Bestimmtheitsmaße der Trainingsdaten (Aligning Stiffness)	196
Anhang 33:	Bestimmtheitsmaße der gesamten Datenbasis (Aligning Stiffness)	197
Anhang 34:	Bestimmtheitsmaße der Trainingsdaten (Bohrmoment)..	197
Anhang 35:	Bestimmtheitsmaße der gesamten Datenbasis (Bohrmoment)	198
Anhang 36:	Bestimmtheitsmaße der Trainingsdaten (Sturzsteifigkeit)	198
Anhang 37:	Bestimmtheitsmaße der gesamten Datenbasis (Sturzsteifigkeit).....	199
Anhang 38:	Bestimmtheitsmaße der Trainingsdaten (Körperschall) ..	199
Anhang 39:	Bestimmtheitsmaße der gesamten Datenbasis (Körperschall)	200
Anhang 40:	Zusammenhang zwischen Vertikalsteifigkeit und Schräglaufsteifigkeit	200
Anhang 41:	Zusammenhang zwischen Vertikalsteifigkeit und Reibwert quer	201

Anhang 42:	Zusammenhang zwischen Vertikalsteifigkeit und Einlauflänge.....	201
Anhang 43:	Zusammenhang zwischen Vertikalsteifigkeit und Aligning Stiffness	202
Anhang 44:	Zusammenhang zwischen Vertikalsteifigkeit und Sturzsteifigkeit.....	202
Anhang 45:	Zusammenhang zwischen Vertikalsteifigkeit und Reibwert längs.....	203
Anhang 46:	Zusammenhang zwischen Vertikalsteifigkeit und Bohrmoment	203
Anhang 47:	Zusammenhang zwischen Vertikalsteifigkeit und Rollwiderstand.....	204
Anhang 48:	Zusammenhang zwischen Vertikalsteifigkeit und Ersatzwert Körperschall	204
Anhang 49:	Zusammenhang zwischen Schräglaufsteifigkeit und Reibwert quer	205
Anhang 50:	Zusammenhang zwischen Schräglaufsteifigkeit und Einlauflänge.....	205
Anhang 51:	Zusammenhang zwischen Schräglaufsteifigkeit und Sturzsteifigkeit.....	206
Anhang 52:	Zusammenhang zwischen Schräglaufsteifigkeit und Reibwert längs.....	206
Anhang 53:	Zusammenhang zwischen Schräglaufsteifigkeit und Bohrmoment	207
Anhang 54:	Zusammenhang zwischen Schräglaufsteifigkeit und Rollwiderstand.....	207
Anhang 55:	Zusammenhang zwischen Schräglaufsteifigkeit und Ersatzwert Körperschall	208
Anhang 56:	Zusammenhang zwischen Reibwert quer und Einlauflänge.....	208
Anhang 57:	Zusammenhang zwischen Reibwert quer und Aligning Stiffness	209

Anhang 58:	Zusammenhang zwischen Reibwert quer und Sturzsteifigkeit	209
Anhang 59:	Zusammenhang zwischen Reibwert quer und Reibwert längs	210
Anhang 60:	Zusammenhang zwischen Reibwert quer und Bohrmoment	210
Anhang 61:	Zusammenhang zwischen Reibwert quer und Rollwiderstand	211
Anhang 62:	Zusammenhang zwischen Reibwert quer und Ersatzwert Körperschall.....	211
Anhang 63:	Zusammenhang zwischen Einlauflänge und Aligning Stiffness.....	212
Anhang 64:	Zusammenhang zwischen Einlauflänge und Reibwert längs	212
Anhang 65:	Zusammenhang zwischen Einlauflänge und Bohrmoment	213
Anhang 66:	Zusammenhang zwischen Einlauflänge und Rollwiderstand	213
Anhang 67:	Zusammenhang zwischen Einlauflänge und Ersatzwert Körperschall.....	214
Anhang 68:	Zusammenhang zwischen Aligning Stiffness und Sturzsteifigkeit.....	214
Anhang 69:	Zusammenhang zwischen Aligning Stiffness und Reibwert längs.....	215
Anhang 70:	Zusammenhang zwischen Aligning Stiffness und Bohrmoment.....	215
Anhang 71:	Zusammenhang zwischen Aligning Stiffness und Rollwiderstand.....	216
Anhang 72:	Zusammenhang zwischen Aligning Stiffness und Ersatzwert Körperschall.....	216
Anhang 73:	Zusammenhang zwischen Sturzsteifigkeit und Reibwert längs	217

Anhang 74:	Zusammenhang zwischen Sturzsteifigkeit und Bohrmoment	217
Anhang 75:	Zusammenhang zwischen Sturzsteifigkeit und Rollwiderstand	218
Anhang 76:	Zusammenhang zwischen Sturzsteifigkeit und Ersatzwert Körperschall	218
Anhang 77:	Zusammenhang zwischen Reibwert längs und Bohrmoment	219
Anhang 78:	Zusammenhang zwischen Reibwert längs und Rollwiderstand	219
Anhang 79:	Zusammenhang zwischen Reibwert längs und Ersatzwert Körperschall	220
Anhang 80:	Zusammenhang zwischen Bohrmoment und Rollwiderstand	220
Anhang 81:	Zusammenhang zwischen Bohrmoment und Ersatzwert Körperschall	221
Anhang 82:	Zusammenhang zwischen Rollwiderstand und Ersatzwert Körperschall	221
Anhang 83:	Lösungsraum Tragfähigkeit ($BF = 7,5''$).....	222
Anhang 84:	Lösungsraum Tragfähigkeit ($BR, N = 225\text{ mm}$).....	222
Anhang 85:	Anhang 83 (grau) inklusive Rollwiderstand ($BF = 7,5''$)	223
Anhang 86:	Anhang 84 (grau) inklusive Rollwiderstand ($BR, N =$ 225 mm)	223
Anhang 87:	Anhang 85 (grau) inklusive Aerodynamik ($BF = 7,5''$)..	224
Anhang 88:	Anhang 86 (grau) inklusive Aerodynamik ($BR, N =$ 225 mm)	224
Anhang 89:	Anhang 87 (grau) inklusive Masseneigenschaften ($BF =$ $7,5''$).....	225
Anhang 90:	Anhang 88 (grau) inklusive Masseneigenschaften ($BR, N =$ 225 mm)	225

Anhang 91:	Anhang 89 (grau) inklusive Vertikalsteifigkeit ($BF = 7,5''$)	226
Anhang 92:	Anhang 90 (grau) inklusive Vertikalsteifigkeit ($BR, N = 225\text{ mm}$).....	226
Anhang 93:	Anhang 91 (grau) inklusive Schräglaufsteifigkeit ($BF = 7,5''$)	227
Anhang 94:	Anhang 92 (grau) inklusive Schräglaufsteifigkeit ($BR, N = 225\text{ mm}$).....	227
Anhang 95:	Anhang 93 (grau) inklusive Reibwert quer ($BF = 7,5''$)	228
Anhang 96:	Anhang 94 (grau) inklusive Reibwert quer ($BR, N = 225\text{ mm}$).....	228
Anhang 97:	Anhang 95 (grau) inklusive Einlauflänge ($BF = 7,5''$)...	229
Anhang 98:	Anhang 96 (grau) inklusive Einlauflänge ($BR, N = 225\text{ mm}$)	229
Anhang 99:	Anhang 97 (grau) inklusive Reibwert längs ($BF = 7,5''$)	230
Anhang 100:	Anhang 98 (grau) inklusive Reibwert längs ($BR, N = 225\text{ mm}$).....	230
Anhang 101:	Anhang 99 (grau) inklusive Aligning Stiffness ($BF = 7,5''$)	231
Anhang 102:	Anhang 100 (grau) inklusive Aligning Stiffness ($BR, N = 225\text{ mm}$).....	231
Anhang 103:	Anhang 101 (grau) inklusive Bohrmoment ($BF = 7,5''$)	232
Anhang 104:	Anhang 102 (grau) inklusive Bohrmoment ($BR, N = 225\text{ mm}$).....	232
Anhang 105:	Anhang 103 (grau) inklusive Sturzsteifigkeit ($BF = 7,5''$)	233
Anhang 106:	Anhang 104 (grau) inklusive Sturzsteifigkeit ($BR, N = 225\text{ mm}$).....	233
Anhang 107:	Anhang 105 (grau) inklusive Körperschall ($BF = 7,5''$)	234
Anhang 108:	Anhang 106 (grau) inklusive Körperschall ($BR, N = 225\text{ mm}$).....	234

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Auftretenswahrscheinlichkeiten der Normalverteilung nach Gauß	63
Tabelle 4.1:	Regressionsparameter (Rollwiderstand)	75
Tabelle 4.2:	Standardisierte Regressionsparameter (Rollwiderstand) ...	75
Tabelle 4.3:	Bestimmtheitsmaße des KNN (Rollwiderstand)	79
Tabelle 4.4:	Streuintervall des Rollwiderstandsbeiwerts ($2 \cdot \sigma\varphi$)	80
Tabelle 5.1:	Regressionsparameter (Vertikalsteifigkeit)	88
Tabelle 5.2:	Standardisierte Regressionsparameter (Vertikalsteifigkeit)88	
Tabelle 5.3:	Bestimmtheitsmaße des KNN (Vertikalsteifigkeit)	90
Tabelle 5.4:	Streuintervall der Vertikalsteifigkeit ($2 \cdot \sigma\varphi$)	92
Tabelle 5.5:	Regressionsparameter (Querdynamik)	96
Tabelle 5.6:	Standardisierte Regressionsparameter (Querdynamik)	96
Tabelle 5.7:	Bestimmtheitsmaße des KNN (Querdynamik)	101
Tabelle 5.8:	Streuintervall der querdynamischen FTC ($2 \cdot \sigma\varphi$)	105
Tabelle 5.9:	Regressionsparameter (Reibwert längs)	108
Tabelle 5.10:	Standardisierte Regressionsparameter (Reibwert längs)..	108
Tabelle 5.11:	Bestimmtheitsmaße des KNN (Reibwert längs)	110
Tabelle 5.12:	Streuintervall des Reibwerts in Längsrichtung ($2 \cdot \sigma\varphi$) ..	112
Tabelle 5.13:	Regressionsparameter (Lenkungskräfte)	115
Tabelle 5.14:	Standardisierte Regressionsparameter (Lenkungskräfte).116	
Tabelle 5.15:	Bestimmtheitsmaße des KNN (Lenkungskräfte)	119
Tabelle 5.16:	Streuintervall der für die Lenkungskräfte relevanten FTC ($2 \cdot \sigma\varphi$)	122
Tabelle 5.17:	Regressionsparameter (Sturzsteifigkeit)	124
Tabelle 5.18:	Standardisierte Regressionsparameter (Sturzsteifigkeit)	124
Tabelle 5.19:	Bestimmtheitsmaße des KNN (Sturzsteifigkeit)	127

Tabelle 5.20:	Streuintervall der Sturzsteifigkeit ($2 \cdot \sigma\varphi$).....	129
Tabelle 6.1:	Regressionsparameter (Körperschall)	135
Tabelle 6.2:	Standardisierte Regressionsparameter (Körperschall).....	135
Tabelle 6.3:	Bestimmtheitsmaße des KNN (Körperschall)	138
Tabelle 6.4:	Streuintervall des Ersatzwerts für Körperschall ($2 \cdot \sigma\varphi$)	140
Tabelle 7.1:	Schnittmenge der Messdaten zur Analyse von Effekten zwischen FTC	145
Tabelle 7.2:	Regressionsparameter $a_0(i, j)$ (Zusammenhänge zwischen FTC).....	148
Tabelle 7.3:	Regressionsparameter $a_1(i, j)$ (Zusammenhänge zwischen FTC).....	149
Tabelle 7.4:	p-Werte der Regressionsmodelle (Zusammenhänge zwischen FTC).....	149
Tabelle 7.5:	Normierte Regressionsparameter $a_n, 1(i, j)$ signifikanter Näherungen	151
Tabelle 8.1:	Randbedingungen des beispielhaften Anwendungsfalls .	158
Tabelle 8.2:	Anforderungen Tragfähigkeit.....	160
Tabelle 8.3:	Anforderungen Energieeffizienz	163
Tabelle 8.4:	Anforderungen Fahrdynamik	166
Tabelle 8.5:	Anforderungen Vibroakustik.....	169

Abkürzungsverzeichnis

ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobilclub
ANN	Artificial Neural Networks
DFT	Diskrete Fouriertransformation
ETRTO	European Tyre and Rim Technical Organisation
EU	Europäische Union
FEM	Finite-Elemente-Methode
FTC	Functional Tyre Characteristics
IABG	Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft
ISO	International Organization of Standardization
KNN	Künstliches Neuronales Netz
MF	Magic Formula
SOP	Start of Production
TDP	Tyre Design Parameter
UN	United Nations
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure

Formelzeichen

α	Schräglaufwinkel	[°]
γ	Sturzwinkel	[°]
a_i	Regressionsparameter	[-]
$a_{s,i}$	Standardisierter Regressionsparameter	[-]
$a_{n,i}$	Normierter Regressionsparameter	[-]
$A(S)$	Aktivierungsfunktion KNN	[-]
A_α	Aligning Stiffness	[Nm/°]
A_L	Reifenaufstandsfläche	[m ²]
B_F	Felgenmaulweite	["]
$B_{F,M}$	Maulweite Messfelge	["]
$B_{R,N}$	Normbreite Reifen	[mm]
$B_{R,Q}$	Querschnittsbreite Reifen	[mm]
c_α	Schräglaufsteifigkeit	[N/°]
c_γ	Sturzsteifigkeit	[N/°]
c_k	Berechnungsvariable DFT	[-]
c_r	Rollwiderstandsbeiwert	[N/kN]
$c_{r,0}$	Rollwiderstandsbeiwert Ausgangszustand	[N/kN]

$c_{r,E}$	Rollwiderstandsbeiwert Ebene	[N/kN]
$c_{r,T}$	Rollwiderstandsbeiwert Trommel	[N/kN]
$c_{R,z}$	Quasistatische Vertikalsteifigkeit	[N/m]
c_w	Luftwiderstandsbeiwert	[-]
c_w^*	Resultierender Luftwiderstandsbeiwert	[-]
$c_{w,v}$	Anteil Ventilationswiderstand	[-]
c_y	Laterale Reifensteifigkeit	[N/m]
c_z	Vertikale Struktursteifigkeit	[N/m]
d	Abstand Radlastvektor zu Latschmitte	[m]
e	Eulersche Zahl	[-]
ΔB_F	Veränderung Felgenmaulweite	[m]
$\Delta B_{R,F}$	Differenz Reifenquerschnitt zu Felgenmaulweite	[m]
$\Delta B_{R,Q}$	Veränderung Reifenquerschnitt	[m]
Δc_w^*	Veränderung Luftwiderstandsbeiwert	[-]
ΔD_F	Veränderung Felgendurchmesser	[m]
ΔFTC_i	Abweichung von FTC-Mittelwert	[%]
ΔR^2	Summierte Abweichung Bestimmtheitsmaße KNN	[-]
D_F	Felgendurchmesser	["]
D_R	Außendurchmesser Reifen	[mm]
e_{FR}	Einflussfaktor Trommelkrümmung	[bar]

ε	Residuum	[-]
F	F-Wert	[-]
f	Frequenz	[Hz]
$f(x_j)$	Messpunkt DFT	[-]
f_o	Obergrenze Frequenzintervall	[Hz]
F_R	Rollwiderstandskraft	[N]
FTC_i	Messwert Functional Tire Characteristics	[-]
\overline{FTC}	Mittlerer Messwert Functional Tire Characteristics	[-]
f_u	Untergrenze Frequenzintervall	[Hz]
$F_{x,max}$	Maximale Längskraft Reifen	[N]
F_y	Seitenkraft Reifen	[N]
$F_{y,E}$	Vibroakustischer Ersatzwert	[N]
$F_{y,max}$	Maximale Seitenkraft Reifen	[N]
F_z	Radlast	[N]
$F_{z,0}$	Radlast Ausgangszustand	[N]
$F_{z,a}$	Anteil Radlast an zulässiger Traglast	[-]
H_R	Flankenhöhe	[mm]
i	Zählvariable	[-]
I	Imaginäre Zahl	[-]

$I_{R,LI}$	Tragfähigkeitskennzahl	[-]
$I_{R,SI}$	Geschwindigkeitssymbol	[-]
j	Zählvariable	[-]
J_F	Massenträgheitsmoment Rad	[kg·m ²]
J_R	Massenträgheitsmoment Reifen	[kg·m ²]
κ_A	Antriebsschlupf	[-]
κ_B	Bremsschlupf	[-]
k	Zählvariable	[-]
$k_{F,M}$	Berechnungsfaktor Messfelgenmaulweite	[-]
$\mu_{x,max}$	Maximaler Reibwert in Längsrichtung	[-]
$\mu_{y,max}$	Maximaler Reibwert in Querrichtung	[-]
m_φ	Mittelwert Funktionsvariablen Normalverteilung	[-]
M_B	Bohrmoment	[Nm]
$M_{B,n}$	Radlastnormiertes Bohrmoment	[Nm/kN]
m_E	Translatorische Ersatzmasse	[kg]
m_F	Radmasse	[kg]
m_R	Reifenmasse	[kg]
M_z	Rückstellmoment	[Nm]
$M_{z,max}$	Maximales Rückstellmoment	[Nm]
n	Zählvariable	[-]

n_R	Pneumatischer Nachlauf	[m]
Φ	Auftretenswahrscheinlichkeit Normalverteilung	[-]
$\varphi(x)$	Dichtefunktion Normalverteilung nach Gauß	[-]
p	p-Wert	[-]
P_B	„Stiffness factor“ MF-Reifenmodell	[-]
P_C	„Shape factor“ MF-Reifenmodell	[-]
P_D	„Peak value“ MF-Reifenmodell	[-]
P_E	„Curvature factor“ MF-Reifenmodell	[-]
$p(x)$	Approximationspolynom DFT	[-]
p_i	Reifenfülldruck	[Pa]
$p_{i,0}$	Reifenfülldruck Ausgangszustand	[Pa]
p_u	Umgebungsluftdruck	[Pa]
q	Summe quadrierter Residuen	[-]
Q_R	Querschnittsverhältnis Reifen	[%]
R^2	Bestimmtheitsmaß	[-]
R^2_t	Bestimmtheitsmaß Testdaten KNN	[-]
$R^2_{t,h}$	Häufigstes Bestimmtheitsmaß Testdaten KNN	[-]
R^2_{tr}	Bestimmtheitsmaß Trainingsdaten KNN	[-]
$R^2_{tr,h}$	Häufigstes Bestimmtheitsmaß Trainingsdaten KNN	[-]
R^2_v	Bestimmtheitsmaß Validierungsdaten KNN	[-]

$R^2_{v,h}$	Häufigstes Bestimmtheitsmaß Validierungsdaten KNN	[-]
r_R	Unbelasteter Reifenradius	[m]
$r_{R,d}$	Dynamischer Rollradius	[m]
$r_{R,s}$	Statischer Rollradius	[m]
r_T	Trommelradius	[m]
σ_i	Standardabweichung der Variable i	[-]
σ_i^2	Varianz der Variable i	[-]
σ_y	Laterale Einlaufänge	[m]
S	Berechnungsvariable Aktivierung KNN	[-]
$S_{H,P}$	„Horizontal Shift“ MF-Reifenmodell	[-]
$S_{V,P}$	„Vertical Shift“ MF-Reifenmodell	[-]
s_z	Vertikaler Einfederungsweg	[m]
t	Zeitvariable	[s]
v_o	Obergrenze Geschwindigkeitsintervall	[m/s]
v_R	Umfangsgeschwindigkeit Reifen	[m/s]
v_u	Untergrenze Geschwindigkeitsintervall	[m/s]
v_x	Abrollgeschwindigkeit	[m/s]
w_{kj}	Gewichtungsfaktor KNN	[-]
x	Eingangsvariable	[-]

x_{ij}	Datenpunkt Eingangsvariable	[-]
x_p	Eingangsvariable MF-Reifenmodell	[-]
x_u	Untere Intervallgrenze Normalverteilung	[-]
x_o	Obere Intervallgrenze Normalverteilung	[-]
y	Ausgangsvariable	[-]
y_i	Messwert Ausgangsvariable	[-]
\bar{y}	Mittlerer Messwert Ausgangsvariable	[-]
\hat{y}_i	Näherungswert Ausgangsvariable	[-]
$\bar{\hat{y}}$	Mittlerer Näherungswert Ausgangsvariable	[-]
y_p	Ausgangsvariable MF-Reifenmodell	[-]

Publikationen des Doktoranden

Strigel, A., Peckelsen, U., Unrau, H.-J., & Gauterin, F. (2018). Auswirkungen der Reifendimension auf den Energieaufwand im Umfeld verschiedener Fahrzyklen und Fahrzeugkonzepte. *Forschung im Ingenieurwesen*. Springer. <https://doi.org/10.1007/s10010-018-0274-0>.

Beitrag der Co-Autoren: Korrekturlesung, Supervision

Strigel, A., Peckelsen, U., Unrau, H.-J., & Gauterin, F. (2019). Estimation of feasible ranges of functional tire characteristics based on tire dimension, inflation pressure, and wheel load. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. Institution of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1177/0954407019831575>.

Beitrag der Co-Autoren: Korrekturlesung, Supervision

Strigel, A., Peckelsen, U., Unrau, H.-J., & Gauterin, F. (2020). Determination of optimal rim and tire dimensions regarding load capacity, driving dynamics, and efficiency. *Automotive and Engine Technology*. Springer Nature Switzerland AG. <https://doi.org/10.1007/s41104-020-00064-z>.

Beitrag der Co-Autoren: Korrekturlesung, Supervision