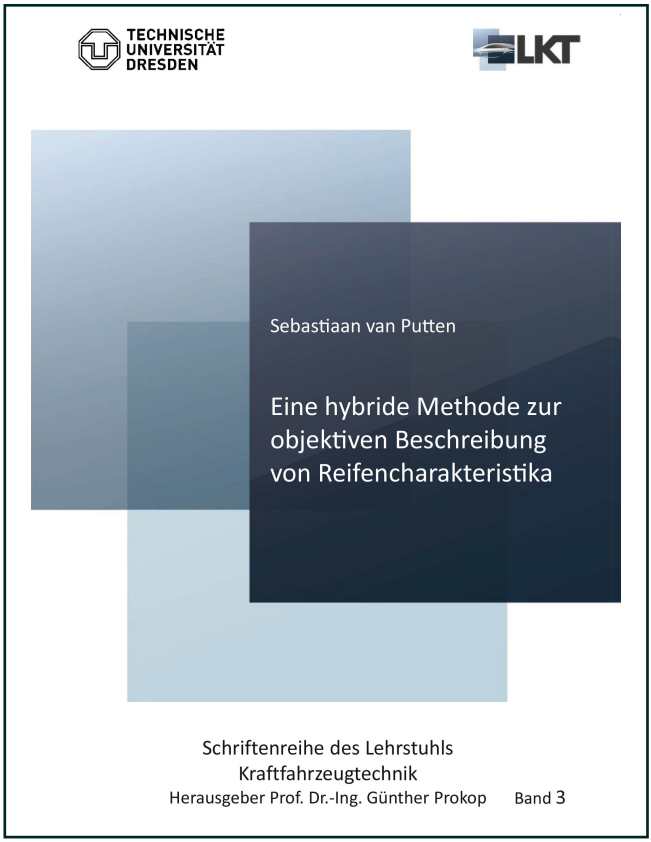
Sebastiaan van Putten (Autor)

Eine hybride Methode zur objektiven Beschreibung von Reifencharakteristika



https://cuvillier.de/de/shop/publications/7518

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: https://cuvillier.de

1. EINFÜHRUNG

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

(a)

(b)

Abbildung 1.1.: Portraits der Erfinder des Luftreifens: (a) John Boyd Dunlop, [Dun], der dem Luftreifen zu seinem Erfolg verhalf und (b) Robert William Thomson, [Tho], der den Luftreifen bereits vierzig Jahre zuvor tatsächlich erfand und patentierte.

Den Überlieferungen nach liegt die Geburtsstätte des Luftreifens in Schottland. Nicht John Boyd Dunlop im Jahr 1887, sondern bereits Robert William Thomson erfand und patentierte den Luftreifen im Jahr 1846. In beiden Fällen handelte es sich um einen dünnen Gummischlauch, der mit Luft aufgepumpt und mit einer Felge verbunden wurde. Die Ausführung von Thomson hatte dabei noch am meisten mit dem Luftreifen gemein, welcher heutzutage ein elementarer Bestandteil des Kraftfahrzeuges ist. Der Reifen Thomsons bestand bereits aus einem Materialverbund von natürlichem Kautschuk mit einer stabilisierenden Gewebeschicht und einer Außenschicht aus Leder. Trotz der offensichtlichen Komfortvorteile von bereiften Rädern konnte sich der Reifen von Thomson jedoch zunächst nicht durchsetzen. Dem Tierarzt Dunlop schließlich wird nachgesagt, auch die Leichtlaufeigenschaften des Luftreifens 1887 für die Räder des Dreirades seines Sohnes erkannt zu haben. Er versuchte seine Erfindung zu patentieren, wonach sich der Luftreifen als Ersatz für die bisherigen Stahlräder oder mit einer massiven Kautschukschicht überzogenen Stahl- und Holzräder verbreitete. In den 1890'er Jahren starteten u.a. auch die Brüder Michelin in Frankreich, die bereits zuvor Reifen aus massivem Kautschuk hergestellt hatten, sowie die Firma Continental in Deutschland mit der Produktion von Luftreifen. Diese Reifen waren jedoch insbesondere zur Anwendung auf Fahrrädern gedacht. Mit der annähernd zeitgleichen Erfindung und dem Aufstieg des Kraftfahrzeuges ergab sich schließlich die bisher bedeutendste Anwendung des Luftreifens, dessen Eigenschaften heutzutage über die damaligen Komfort- und Leichtlaufeigenschaften hinaus insbesondere die Longitudinal- und Lateraldynamik von Kraftfahrzeugen prägen.

1.1. MOTIVATION

Die Beeinflussung von Gesamtfahrzeugeigenschaften durch den Reifen ist bei aktuellen Fahrzeugen auch für Normalfahrer wahrnehmbar. Beispielhaft sind hierzu in Abbildung 1.2 zwei repräsentative Subjektivkriterien dargestellt, welche in einem schnellen doppelten Fahr-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

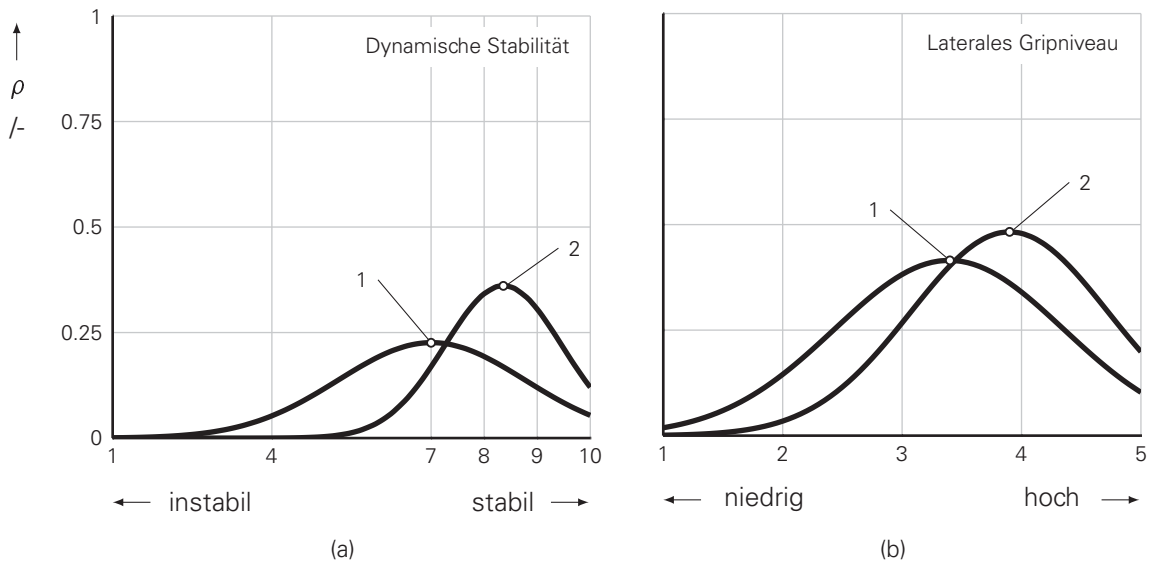


Abbildung 1.2.: Normalverteilte Dichtefunktion der Subjektivwertung der (a) Kenngröße „dynamische Stabilität" und (b) Kenngröße „laterales Gripniveau" für zwei baugleiche Fahrzeuge mit unterschiedlicher Bereifung. *1*– Fahrzeug mit 17"-Bereifung, *2*– Fahrzeug mit 18"-Bereifung. Stichprobengröße in (a) 89 Personen und in (b) 94 Personen

spurwechsel und einem Kreisfahrtversuch bewertet wurden. Der Versuch wurde mit zwei baugleichen Fahrzeugen mit Originalbereifung unterschiedlicher Dimension durchgeführt. Bei einer Stichprobengröße von mindestens 89 Normalfahrern wurde das in Abbildung 1.2(a) dargestellte Kriterium dynamische Stabilität bei dem Fahrzeug mit der 17"-Bereifung durchschnittlich mit der Note 7.0 bewertet, welche nach der Bewertungssystematik exakt der Mindestnote eines akzeptablen Fahrverhaltens entspricht. Wird das gleiche Fahrzeug mit der lediglich eine Dimension größeren und ebenfalls originalen 18"-Bereifung ausgestattet, so wird es mit der Note 8.4 deutlich besser bewertet. Außerdem ist die Standardabweichung kleiner, was auf ein eindeutigeres und in diesem Fall stabileres Fahrverhalten hindeutet. Auch die in Abbildung 1.2(b) dargestellte maximal erzielbare Lateralbeschleunigung der 18"-Bereifung wird von den Testpersonen im direkten Vergleich subjektiv höher bewertet. Neben der Tatsache, dass Unterschiede im Reifenverhalten subjektiv von Fahrern eindeutig wahrgenommen werden, kommt dem Reifen in der objektiven Beschreibung des Gesamtfahrzeugverhaltens eine bedeutende Rolle zu. Grundsätzlich gilt dies für alle Reifeneigenschaften, vom Rollwiderstand und der Aerodynamik im Verhältnis zum Kraftstoffverbrauch (vgl. hierzu [van11; Wit13]), über das Abrollgeräusch und dessen Auswirkung auf die Gesamtfahrzeugakustik bis hin zum Einfluss von Steifigkeits- und Schwingungseigenschaften des Reifens auf den Fahrkomfort (vgl. hierzu [Hil10]). In der longitudinalen und lateralen Gesamtfahrzeugdynamik ist die Wechselwirkung zwischen Reifencharakteristika und Gesamtfahrzeugeigenschaften jedoch besonders stark ausgeprägt. Der Unterschied im Fahrverhalten beim gleichen Fahrzeug mit unterschiedlicher Bereifung ist oftmals größer als der Unterschied zwischen verschiedenen Fahrzeuge innerhalb einer Fahrzeugklasse. Die Relevanz des Reifens in der Fahrzeugentwicklung zeigt sich darin, dass jeder führende OEM[1] in Zusammenarbeit mit den Reifenherstellern eine auf die eigenen Anforderungen zugeschnittene Reifenentwicklung betreibt. Die Produktpalette eines OEMs umfasst oftmals über zehn Modellreihen mit zusätzlichen Derivaten. In jeder Modellreihe stehen dem Kunden in der

[1] Original Equipment Manufacturer; gemeint ist hier Automobilhersteller

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

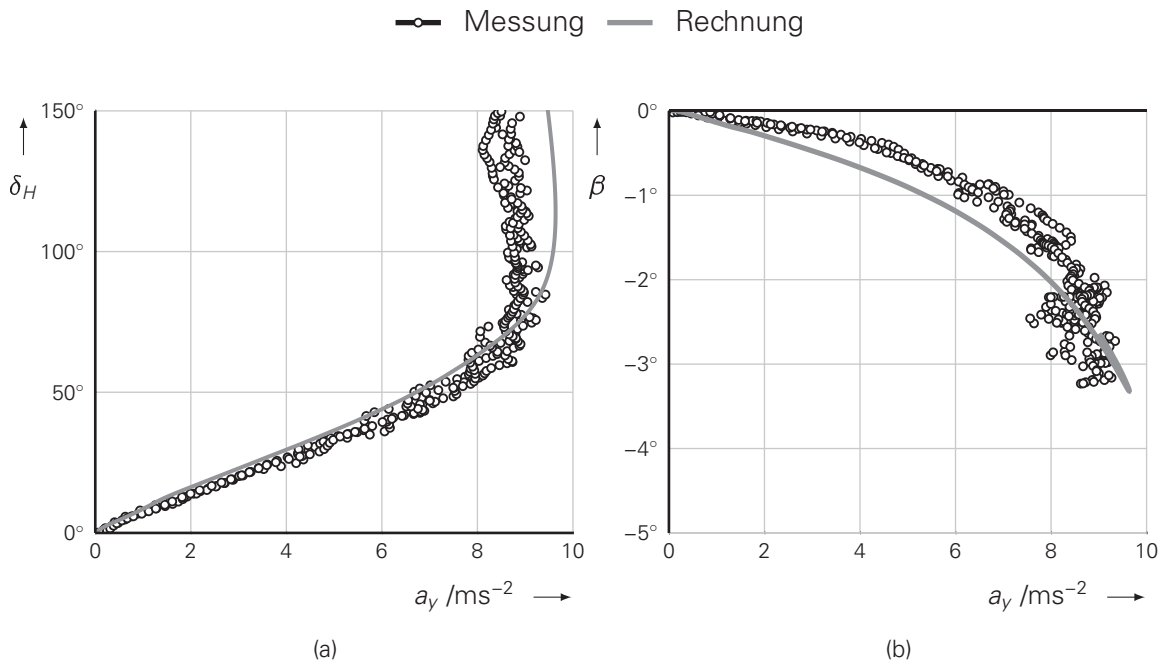


Abbildung 1.3.: Vergleich zwischen Messung und Rechnung nach dem Stand der Technik, (a) im Lenkradwinkeldiagramm für Lenkradwinkel δ_H über der Lateralbeschleunigung a_y und (b) im Schwimmwinkeldiagramm für Schwimmwinkel β im Schwerpunkt, ebenfalls über der Lateralbeschleunigung dargestellt

Regel bis zu fünf Dimensionen zur Verfügung, welche aus Verfügbarkeits- und Wettbewerbsgründen von drei bis vier Reifenherstellern angeboten werden. Bereits aus dieser einfachen Überschlagsrechnung ergibt sich ein Totalvolumen von einhundertzwanzig bis zweihundert Reifen, welche pro Produktzyklus zu entwickeln sind. Die prozessualen Vorteile einer rechnergestützten und objektiven Entwicklungsbegleitung liegen somit auf der Hand.
Der aktuelle Stand der Technik der objektiven Beschreibung der Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen ist in Abbildung 1.3 in Form eines Lenkradwinkel- und Schwimmwinkeldiagrammes für die quasi-stationäre Lateraldynamik exemplarisch dargestellt. Erkennbar sind Abweichungen zwischen Messung und Rechnung, insbesondere in Bezug auf die maximal erzielbare Lateralbeschleunigung, sowie in Bezug auf den Schwimmwinkel im Linear- und Grenzbereich. Auffällig ist, dass der Schwimmwinkelgradient bereits im Linearbereich stark von der Messung abweicht. Diese Abweichung deutet auf eine fehlerhafte Identifikation der Schräglaufsteifigkeit der Reifen hin. Die Abweichung der maximalen Lateralbeschleunigung, welche insbesondere in Abbildung 1.3(a) auffällig ist, hängt jedoch stark mit dem bezogenen lateralen Reibungskoeffizienten zusammen. Die Identifikation der Reifeneigenschaften erfolgte gemäß dem Stand der Technik vollständig auf einem Flachbahnprüfstand.

1.2. LITERATURÜBERSICHT

Durch die Relevanz des Reifens für das Fahrverhalten von Fahrzeugen und die Herausforderungen sowohl hinsichtlich der Beschreibung der Kontaktkinematik als insbesondere hinsichtlich der Reibungsphänomene, stellt der Reifen ein interessantes Forschungsobjekt dar. Darüber hinaus führt die Tatsache, dass der Reifen bereits seit der Einführung des Radialreifens über mehreren Jahrzehnten in nahezu unveränderter Form in der Automobilproduktion Anwendung findet, dazu, dass ein Großteil der Grundlagenliteratur auch heute

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

noch aktuell ist. Prozessuale Ansätze, welche die Gesamtkette vom Verständnis der maßgeblichen Mechanismen der Kraftübertragung über die Eigenschaftsidentifikation bis zur Reifenmodellierung beschreiben, finden sich jedoch erst seit der jüngeren Vergangenheit. Im Folgenden wird eine Übersicht über relevante Ansätze aus der Literatur zur Charakterisierung und Beschreibung der Kraftübertragung von Reifen unter der Anwendung entsprechenden Bedingungen gegeben.

DISKUSSION DES ANSATZES NACH HÜSEMANN

Besonders hervorzuheben ist die Arbeit von Hüsemann [Hüs11]. Hüsemann beschäftigt sich mit der These, ob unter Laborbedingungen ermittelte Reifeneigenschaften mittels geeigneter Transformationen den Bedingungen auf realen Fahrbahnen angeglichen werden können. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass Reifeneigenschaften auf beliebigen bereits bestehenden Prüffeldern unter genau kontrollierbaren Laborbedingungen identifiziert werden können. Zunächst stellt er fest, dass auch unter Laborbedingungen vermessene Reifeneigenschaften erheblicher Streuung unterliegen. Die festgestellten Unterschiede werden einerseits, im Falle von Innen- oder Außentrommelprüfständen, mit den sich aufgrund der Oberflächenkrümmung ergebenden unterschiedlichen kinematischen Kontaktbedingungen begründet. Diese Argumentation betrifft vornehmlich die Schräglaufsteifigkeit. Andererseits werden kraftschlussbezogene Unterschiede mit Abweichungen des Fahrbahnreibwertkennfeldes begründet. Diese These ist für den weiteren Verlauf der Untersuchungen und Herleitungen von zentraler Bedeutung. Sie stellt jedoch gewissermaßen eine interpretatorische Unrichtigkeit dar. Ein Reibungskoeffizient kann im tribologischen Sinne erst dann Anwendung finden, wenn sich dieser auf die Reibung zweier Körper bezieht. Somit gilt ein Reibungskoeffizient definitionsgemäß immer nur für eine Paarung von -in dieser Anwendung- Reifenoberflächenmaterial und Fahrbahnoberfläche. Die Korrektur der reibungsbezogenen Eigenschaften erfolgt anschließend mithilfe einer speziellen Apparatur, welche eine Ermittlung des Reibungskoeffizienten an aus dem Reifen entnommenen Profilelementen auf einer beliebigen Oberfläche erlaubt. Ungeachtet der Tatsache, dass die von dieser Apparatur erreichbare Gleitgeschwindigkeit ($<1.5\ ms^{-1}$) eher gering erscheint, so wird doch speziell der Einfluss der Material- und Oberflächentemperatur auf die Reibungsphänomene von dieser Methode ausgelassen, obwohl diese nach Persson [Per06] von entscheidender Bedeutung ist. Des Weiteren beruht die Korrekturmethode der Oberflächenkrümmung nicht auf den zunächst korrekt hergeleiteten geometrischen Zusammenhängen, sondern auf einem mathematisch-phänomenologischen und somit de facto empirischen Ansatz. Wenngleich Gesetzmäßigkeiten hinsichtlich des Zusammenhanges von Reifeneigenschaften auf gekrümmter und ebener Fahrbahn annehmbar sind, so erscheint es doch unwahrscheinlich, dass diese in effektiv ausschließlich von der Vertikalkraft abhängigen Skalierfaktoren eindeutig und allgemeingültig erfasst werden können.

DISKUSSION DER REIFENCHARAKTERISIERUNG MITTELS DES TIME-VERFAHRENS

Zur Beschreibung des Reifenverhaltens greift Hüsemann auf das semi-empirische „Magic Formula“ Reifenmodell zurück. Dieses Modell wurde von Bakker u. a. [BNP87] entwickelt und in Pacejka [Pac12] umfassend beschrieben. Es ist in der Lage mittels mathematischer Formulierungen und geometrischer Beziehungen fast jede erdenkliche, auf einem beliebigen Prüfstand gemessene, Reifencharakteristik abzubilden. Mit der Erstellung eines standardisierten Messverfahrens zur Parametrierung diesen Modells befasste sich Ende der 1990’er Jahre ein Konsortium, dessen Untersuchungen in der von Klaas u. a. [Kla99] und van Oosten u. a. [van99] veröffentlichten TIME-Prozedur mündeten. Ein solcher Fahrzeug- und Reifenhersteller-übergreifender Ansatz ist grundsätzlich erstrebenswert. Auch die Untersuchung der am Reifen während des stationären, wie instationären Fahrbetriebs auftretenden

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Betriebsbedingungen erscheint sinnvoll. Die Komplexität und gleichzeitig die Kernproblematik des TIME-Ansatzes liegt darin, die technischen und prozessualen Anforderungen so weit zu verstehen und vereinheitlichen, dass ein allgemeingültiger Ansatz entsteht. Die Erkenntnisse, die zum Entstehen der TIME-Prozedur geführt haben, stützen sich inhaltlich jedoch lediglich auf einen Reifen der Dimension 165/70R13. Dieser Reifen ist für die aktuelle Fahrzeugentwicklung von sportlichen Fahrzeugen nicht mehr zeitgemäß. Dieser Argumentation folgt Hüsemann [Hüs11] und entscheidet sich gegen Anwendung der TIME-Prozedur. Außerdem hat sich die TIME-Prozedur tatsächlich nicht zum Industriestandard entwickelt, welches sich im deutlich verkleinerten Teilnehmerkreis der Weiterentwicklung zu TIME2 widerspiegelt, [Tis04]. Seither sind keine nennenswerten Weiterentwicklungen der TIME-Prozedur bekannt. Die entscheidenden Defizite des TIME-Ansatzes liegen in der erhöhten und in vielen Betriebspunkten nicht dem Fahrzustand gerechten thermischen und mechanischen Belastung. Außerdem wird der Reifenkonditionierung zur Gewährleistung der Präzision der Eigenschaftsidentifikation nur unzureichend Rechnung getragen. Das von Klaas u. a. [Kla99] vorgeschlagene Verfahren, Messpunkte in einer "randomisierten Reihenfolge" anzufahren und diese anschließend "bei der Bestimmung von Reifenmodellparametern statistisch" abzutrennen, reicht hierzu keinesfalls aus. Schließlich wird in der TIME-Prozedur die Frage nach der inhaltlichen Korrektheit der Messergebnisse dem Vereinheitlichungsgedanke untergeordnet. Die Prozedur schreibt keine dedizierten Prüffelder vor, auf denen spezifische Reifeneigenschaften zu charakterisieren sind. Dies würde einen nachgeschalteten Ansatz im Sinne von Hüsemann erfordern, damit die ermittelten Reifencharakteristika tatsächlich dem Verhalten auf realen Fahrbahnoberflächen entsprächen.

DISKUSSION DER ANSÄTZE NACH MAULICK UND NÜSSLE

Maulick [Mau01] und Nüssle [Nüs03] entwickelten Ansätze zur Charakterisierung von Reifen unter realen Bedingungen und auf realen Fahrbahnoberflächen. Maulick untersucht eine komponetenbasierte Methode, welche die Erfassung von Reifencharakteristika auch bei Nässe erlaubt. Nüssle hingegen entwickelt eine Methode zur Reifencharakterisierung an einem mit umfassender Messtechnik ausgestattetem Versuchsfahrzeug. Diese Messtechnik umfasst eine Kreiselplattform, Kraftmessfelgen und optische Sensoren zur Erfassung des Schräglauf- und Sturzwinkels. Er stellt fest, dass an einem Fahrzeug speziell die Vertikalkraft und der Sturzwinkel nicht wie auf einem Reifenprüfstand separat eingestellt, sondern während der Kurvenfahrt vom Fahrzeug vorgegeben werden. Zur vereinfachten Darstellung und Interpretation schlägt er eine achsweise Betrachtung der Reifencharakteristik vor. Nachdem die Summe der Vertikalkraft pro Achse auch bei dynamischer Kurvenfahrt annähernd konstant bleibt, erscheint diese Annahme sinnvoll. Nüssle stellt jedoch fest, dass sich nun zwar die Seitenkraftdynamik mittels des vorgenannten „Magic Formula"-Reifenmodell beschreiben lässt, die Vertikalkraftdynamik aber folgerichtig nicht erfassbar ist. Außerdem ist eine vollständige Identifikation des Reifenmodells auf Basis der Fahrzeugmessungen nicht möglich und sind die Ergebnisse nur für das untersuchte Fahrzeug und die untersuchten Reifen gültig. Für den Ansatz von Maulick gelten diese Nachteile nicht, nachdem die von ihm entwickelte Methode eine Reifencharakterisierung auf Komponentenebene an einem fahrbaren Prüfstand vorsieht. Darüber hinaus hat der Ansatz von Maulick den Vorteil, dass Reifeneigenschaften, sowohl auf einer trockenen Fahrbahn, als auch bei definierten Wasserfilmhöhen durchgeführt werden können.

DISKUSSION DES ANSATZES NACH EINSLE

Einsle [Ein11] schließlich untersucht das transiente laterale Reifenverhalten, insbesondere bei kleinen Schräglaufwinkeln, und entwickelt hierzu neue Prüfmethoden. Zur Ermittlung der Schräglaufsteifigkeit schlägt er ein Radlastsprung-Verfahren vor, bei dem ein konstanter

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Schräglaufwinkel von 1° oder 2° eingestellt wird und anschließend, bei konstanter Geschwindigkeit, die Vertikalkraft schrittweise mit 2000 N erhöht und jeweils für eine bestimmte Zeit gehalten wird. Aus diesem Verfahren lässt sich die Schräglaufsteifigkeit ableiten, was besonders bei sehr kleinen Schräglaufwinkeln sinnvoll erscheint. Zur Charakterisierung des transienten lateralen Reifenverhaltens wird ein Schräglaufwinkelsprung-Verfahren vorgeschlagen, bei dem der Reifen bei konstanter Vertikalkraft und niedriger Geschwindigkeit mit mehreren sprungartigen Schräglaufwinkelanregungen unterschiedlicher Amplitude zwischen 0.1° und 2° angeregt wird. Dieses Verfahren wird zur Identifikation einer ausschließlich von der Vertikalkraft abhängigen Einlauflänge verwendet. Die Begründung, dass ein Schräglaufwinkelsprung der Anregung des Reifens am Fahrzeug am nächsten kommt, erscheint schlüssig. Die erforderliche niedrige Geschwindigkeit zur Durchführung dieser Methode hat jedoch in Bezug auf das transiente laterale Reifenverhalten zwei entscheidenden Nachteile: erstens ist zu erwarten, dass die niedrige Geschwindigkeit zu Phänomenen führt, welche bei für Fahrzeugversuche realistischen Geschwindigkeiten nicht oder in deutlich geringerer Ausprägung auftreten. Zweitens ist davon auszugehen, dass die Geschwindigkeit selber die Einlauflänge beeinflusst und diese sich somit bei der erforderlich niedrigen Geschwindigkeit nur unzureichend realitätsnah identifizieren lässt. Neben den diskutierten Prüfverfahren wird eine Modellierung des transienten Reifenverhaltens auf Basis der beobachteten Kraftantwort mit einem Verhalten zweiter Ordnung vorgestellt und der Parameter der Einlaufdämpfung D_α eingeführt. Dieser soll implizit die Steifigkeits- und Trägheitseigenschaften des mechanischen Systems berücksichtigen und sollte zur Gewährleistung einer überkritisch gedämpften Systemantwort im Wertebereich $D_\alpha > 1$ gewählt werden. In Hinblick auf die Kraftantwort erscheint dies zweckmäßig, liefert jedoch keine Einsichten in die tatsächlichen Mechanismen der transienten Kraftübertragung von Reifen.

DISKUSSION VON ANSÄTZEN ZUR SUBJEKTIVBEWERTUNG DES FAHRVERHALTENS

Die Übersetzung von Subjektivurteilen in objektive Kenngrößen, sowie allgemeine Methoden der Subjektivbeurteilung des Fahrverhaltens von Fahrzeugen, waren in der jüngeren Vergangenheit Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Diese Arbeit stützt sich auf einen integrierten und modellbasierten Objektivierungsansatz, wie er etwa von Huneke [Hun12] und Schimmel u. a. [Sch14] beschrieben wird. Inhaltlich überschneiden sich diese Ansätze stark mit dem Mess- und Simulationsvorgehen aus der Vergangenheit (vgl. beispielsweise [HH77]). Heutzutage können sie jedoch besser ein- und zugeordnet und zur Subjektivwertung korreliert werden. Sie bestehen aus einem kompakten Satz verhältnismäßig einfacher, open-loop Manöver, welche mit jedem Fahrzeug reproduzierbar durchführbar sind und speziell innerhalb einer Fahrzeugklasse einen objektiven Vergleich von Fahrzeugeigenschaften erlauben. Außerdem haben diese Ansätze den entscheidenden Vorteil, dass sie in der Konzept- und Serienentwicklung, sowie im Simulations- und Realversuch durchgängig anwendbar sind. Wenngleich zu diesem Thema nicht alle Fragestellungen abschließend beantwortet sind, wird hierauf in dieser Arbeit nicht näher eingegangen. An der Stelle sei auf aktuelle Literatur von Meyer-Tuve [Mey08], Zschocke [Zsc09], Schimmel [Sch10a] und Gutjahr [Gut14] zu diesem Thema verwiesen.

1.3. ZIELSTELLUNG UND STRUKTUR

Bereits aus der Motivation geht die Relevanz von Reifencharakteristika für die subjektive Bewertung des Gesamtfahrzeugverhaltens hervor. Außerdem wird klar, dass die objektive Beschreibung des Reifenverhaltens in Form von Berechnungsmodellen zu erheblichen Abweichungen zwischen gemessenem und gerechnetem Gesamtfahrzeugverhalten führt. Aus der umfassenden Literaturübersicht geht zudem hervor, dass auf dem Gebiet der Cha-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

rakterisierung von Reifeneigenschaften auf Komponentenebene bereits zahlreiche Arbeiten existieren. Diese behandeln jedoch meist Teilaspekte, wie die Identifikation einzelner, wichtiger Reifeneigenschaften oder die Modellierung von Reifenphänomenen. Ein übergreifender, prozessualer Ansatz zur objektiven Beschreibung von Reifencharakteristika existiert bis dato nicht. Die Ziele dieser Arbeit sind demnach wie folgt definiert:

1. Exakte Definition der zu beschreibenden Reifencharakteristika
2. Verbesserung der Abbildungsgüte von Reifenberechnungsmodellen in der Fahrdynamik
3. Entwicklung von Einsichten in die Mechanismen der Kraftübertragung von Reifen
4. Entwicklung eines dedizierten Identifikationsprozesses für longitudinal- und lateraldynamische Reifencharakteristika

In Kapitel 2 werden zunächst die wissenschaftlichen Grundlagen zur Kraftübertragung von Reifen diskutiert, wobei insbesondere auf das Verhalten des Reifenoberflächenmaterial und die Reibungsmechanismen eingegangen wird. In den folgenden Abschnitten werden die Grundlagen der Dynamik von Kraftfahrzeugen, Modellierungsansätze und erforderliche Prüffelder dargelegt. Anschließend werden in Kapitel 3 Gesamtfahrzeugkenngrößen und zugehörige Fahrmanöver beschrieben, welche sich besonders zur Objektivierung der Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen eignen. Charakteristische Kombinationen von Reifenzustandsgrößen werden auf Basis dieser Kenngrößen und Manöver im Gesamtfahrzeugversuch definiert. Hierzu wird das Versuchsfahrzeug mit einer umfassenden Messausrüstung ausgestattet. Kapitel 4 und Kapitel 5 gründen sich anschließend auf der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Klassifikation von Reifencharakteristika in Struktur- und Reibgrößen. In Kapitel 4 werden Strukturgrößen mechanisch-analytisch beschrieben, wonach auf der Basis der so geschaffenen Einsichten in die wirksamen Mechanismen, dedizierte Prüfmethoden abgeleitet werden. Anschließend werden auf dieser Basis verschiedene Einflussgrößen auf Strukturgrößen experimentell untersucht und anhand der hergeleiteten Zusammenhänge analysiert. In Kapitel 5 wird die gleiche Vorgehensweise für Reibgrößen angewendet. Hierzu werden die im Haftzustand gültigen Zusammenhänge aus Kapitel 4 um ein Reibungsgesetz und somit um den partiellen Haft- und Gleitzustand erweitert. In Kapitel 6 werden schließlich die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Struktur- und Reibgrößen zu einem Gesamtreifenverhalten synthetisiert. Das so erhaltene Modellverhalten spiegelt das Reifenverhalten auf einer realen Fahrbahn unter den in Kapitel 3 beschriebenen Randbedingungen wider. Aufgrund der fehlenden Referenz auf Komponentenebene erfolgt die Validierung der Methode in Kapitel 7 auf Gesamtfahrzeugebene, indem die in Kapitel 3 beschriebenen Gesamtfahrzeugkenngrößen zwischen Messung und Rechnung verglichen werden. Hierzu wird zunächst die erforderliche Validität der Gesamtfahrzeugmodellierung untersucht und anschließend Messungen und Rechnungen für eine repräsentative Stichprobe von Reifen am gleichen Fahrzeug durchgeführt. Abschließend werden die Erkenntnisse und Ergebnisse in Kapitel 8 diskutiert und aus der Arbeit abzuleitende Handlungsempfehlungen sowie ein Ausblick im Forschungsbereich dargelegt. Diese Struktur, welche ebenfalls die Überführung von der realen in die virtuelle, sowie von der Gesamtfahrzeug- in die Reifenebene beinhaltet, ist in Abbildung 1.4 grafisch dargestellt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

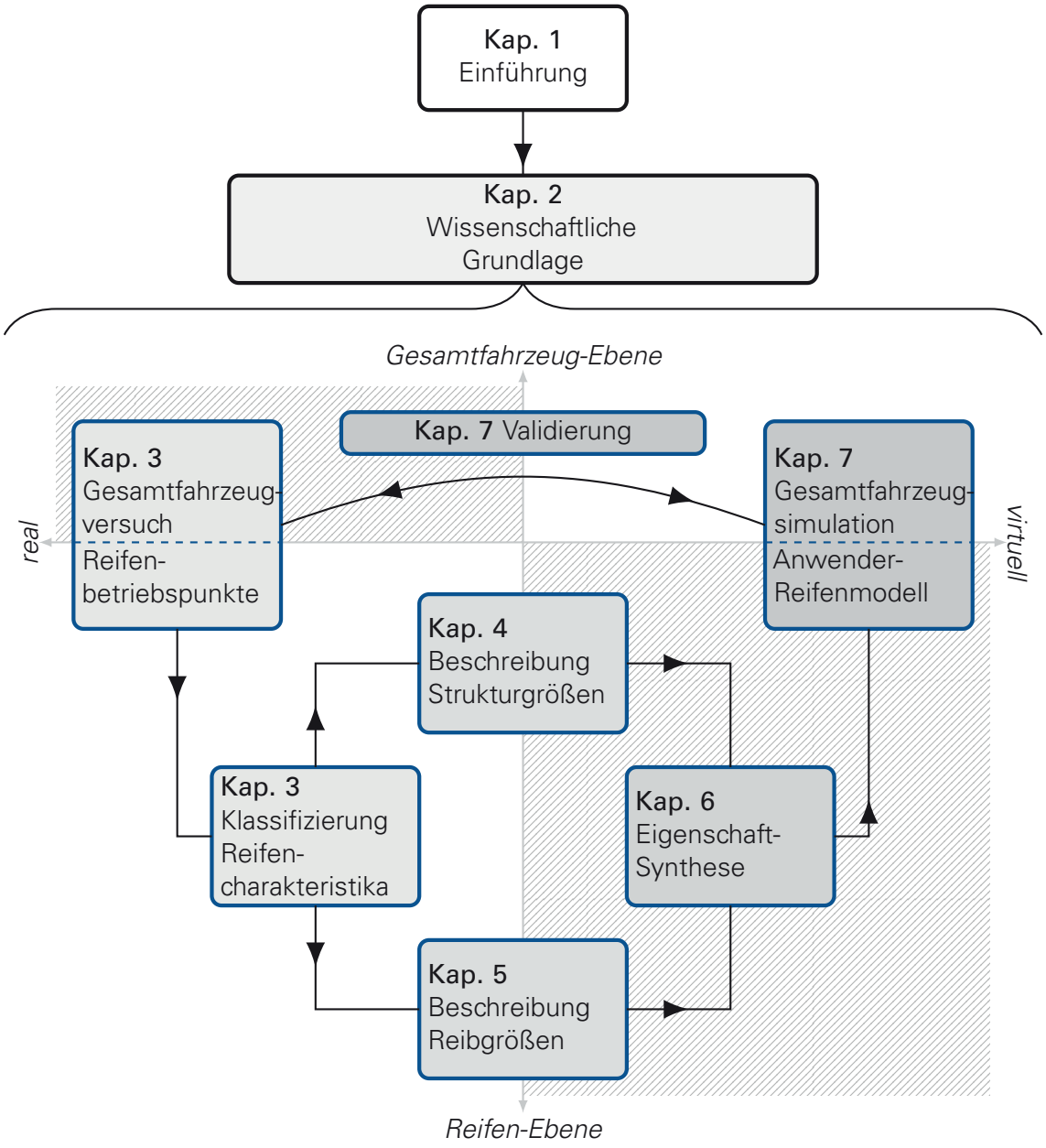


Abbildung 1.4.: Grafische Darstellung der Struktur der Arbeit

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

2. WISSENSCHAFTLICHE GRUNDLAGE

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Sowohl zum Thema der Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn, als zur Wechselwirkung von Reifen- und Gesamtfahrzeugeigenschaften besteht eine Vielzahl an Literaturquellen. Diese Arbeit befasst sich, dem vorangegangenen Kapitel 1 entsprechend, mit dem longidutinal- und lateraldynamischen Reifenverhalten zur Beschreibung und Vorhersage der Gesamtfahrzeugdynamik. In diesem Kapitel wird näher auf die wissenschaftliche Grundlage eingegangen, welche zur Analyse und zum anschließenden Verständnis der am Reifen und in der Reifenkontaktfläche auftretenden Mechanismen und deren Wechselwirkung mit dem Gesamtfahrzeug erforderlich ist. Hierzu wird zunächst in Abschnitt 2.1 auf die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn und in den folgenden Unterabschnitten auf den Reifenaufbau, die Kontaktfläche und Kontaktbedingungen, die wirksamen Reibungsmechanismen sowie die Wechselwirkung von Reifenoberflächenmaterial mit der Fahrbahnoberfläche eingegangen. Das für die Kraftübertragung von Reifen maßgebliche visko-elastische Materialverhalten des Reifenoberflächenmaterials wird in Unterabschnitt 2.1.4 eingehend diskutiert. Anschließend werden die Erkenntnisse in Abschnitt 2.2 auf das Gesamtfahrzeug bezogen. Hierzu wird auf Grundlagen der Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen in der horizontalen Ebene eingegangen. In Abschnitt 2.3 werden Grundlagen der Gesamtfahrzeugmodellierung sowie der Reifenmodellierung dargelegt und existierende Modellansätze hinsichtlich ihrer Zweckmäßigkeit und Prozessanforderungen gegenübergestellt.

2.1. KRAFTÜBERTRAGUNG ZWISCHEN REIFEN UND FAHRBAHN

An der Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn sind grundsätzlich alle Bestandteile des Reifens beteiligt, angefangen vom Reifenaufbau, über die tragende Luftfeder in Form des Reifeninnendrucks bis hin zu den in direktem Kontakt zur Fahrbahnoberfläche stehenden Profilelementen. In Unterabschnitt 2.1.1 wird zunächst der Reifenaufbau und dessen Einfluss auf die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn beschrieben. Anschließend wird in Unterabschnitt 2.1.2 näher auf die sich unter den jeweiligen Betriebsbedingungen ausprägende Reifenkontaktfläche und die Kontaktbedingungen zur Fahrbahnoberfläche eingegangen. Es wird zwischen der augenscheinlichen, makroskopischen Kontaktfläche und der effektiven, mikroskopischen Kontaktfläche unterschieden und es wird darauf eingegangen, wie sich beide auf die Kraftübertragung auswirken. Die Kontaktkinematik unter longitudinaler und lateraler Beanspruchung und sich folglich ergebenden Schubspannungen werden in Unterabschnitt 2.1.3 dargelegt. Besonderer Bedeutung kommt in der Betrachtung der Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn die Begrenzung von kinematischen Schubspannungen durch das von der Paarung des Reifens mit der Fahrbahnoberfläche zur Verfügung gestellte Reibungspotenzial und die Reibungsmechanismen im Allgemeinen zu. Nachdem die grundlegenden Reibungsmechanismen ein eigenes Forschungsgebiet innerhalb der Physik darstellen und sich diese Arbeit vordergründig mit dem Prozess der Beschreibung von Gesamtreifencharakteristika befasst, wird zur Reibung zwischen Reifen- und Fahrbahnoberfläche eine umfassende Literaturübersicht gegeben. Die grundlegende Betrachtung der Reifenkraftübertragung wird schließlich mit einer Diskussion der Erkenntnisse abgerundet.
Die Analysen im weiteren Verlauf dieser Arbeit beziehen sich auf den in Abschnitt 2.1 dargestellten argumentativen Kreislauf zur Betrachtung der Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn. Argumentativ wird demnach von einer Geschwindigkeitsdifferenz Δv_x in longitudinaler, respektive Δv_y in lateraler Richtung auf Gesamtfahrzeugebene zwischen Radmittelpunkt und Fahrbahnoberfläche ausgegangen. Die Geschwindigkeitsdifferenz wird vom aktuellen Fahrzustand des Fahrzeuges hervorgerufen. Im Radsystem führt der Geschwindigkeitsunterschied zur Entstehung von kinematischem Schlupf κ, respektive zum kinematischen Schräglaufwinkel α_0 und anschließend zu Deformationen im Reifenoberflächenmaterial x_D, respektive y_D. Entsprechend den Eigenschaften des Oberflächenmaterials entstehen Schubspannungen γ_x und γ_y und schließlich Kräfte F_x und F_y in der Reifenkon-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

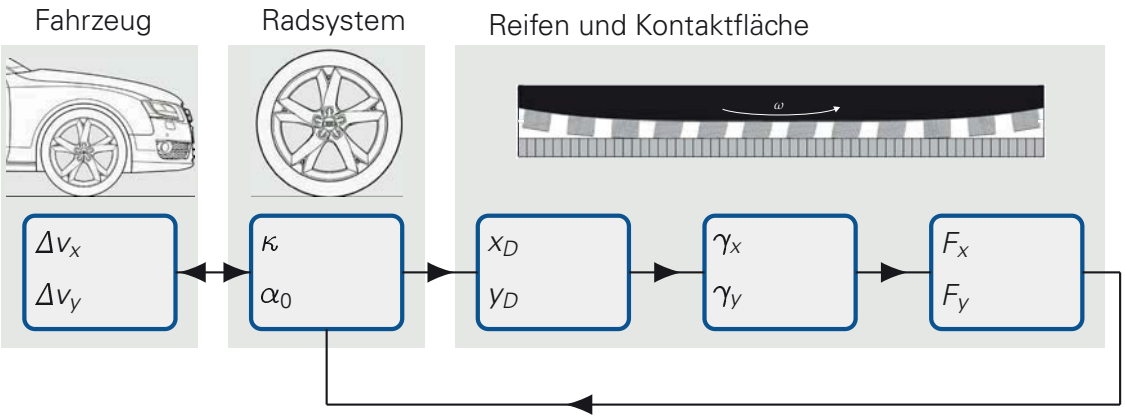


Abbildung 2.1.: Schematische Darstellung des argumentativen Kreislaufes der Kraftübertragung von Reifen. Bild rechts nach [Mol10].

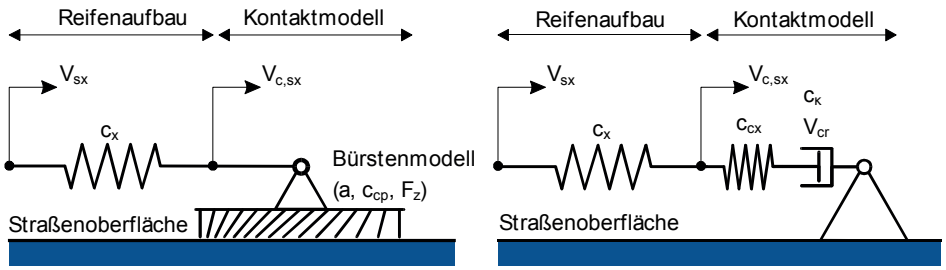


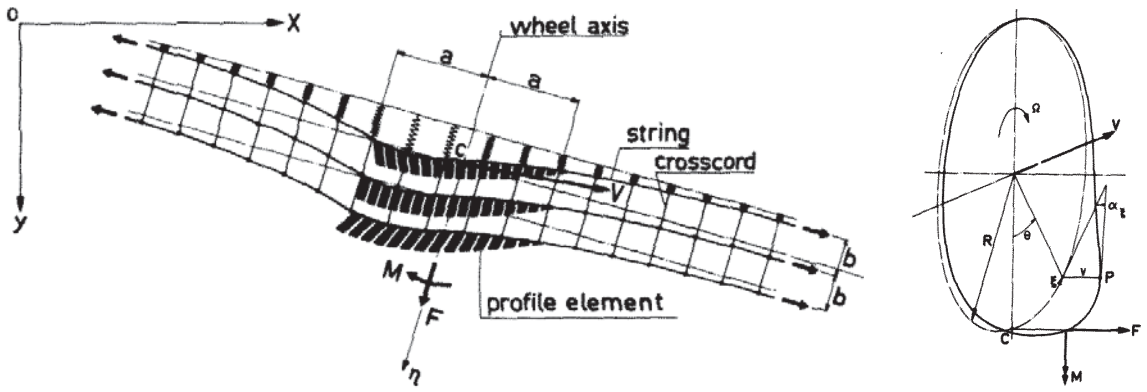
Abbildung 2.2.: Darstellung des Reifenaufbaus und der Kontaktfläche als mechanisches Ersatzssystem, nach [Zeg98].

taktfläche. Diese Kräfte werden anschließend über den Reifenaufbau, die Felge und die Radführung zurück in das Fahrzeug eingeleitet. Die Kraftwirkung wiederum bewirkt eine Beschleunigung des Fahrzeuges, welche zu einer Änderung der Relativgeschwindigkeiten führt. Dieser Kreislauf kann prinzipiell an jeder Stelle geschnitten werden. Demnach ist eine Betrachtung der Schlupfentstehung aufgrund von Krafteinwirkung genauso zulässig, wie die hier verwendete Betrachtung der Kraftübertragung durch kinematische Bewegungszustände.

2.1.1. REIFENAUFBAU UND EINFLUSS AUF DIE KRAFTÜBERTRAGUNG

Der Reifenaufbau stellt die Verbindung zwischen der direkt mit dem Fahrzeug verbundenen Felge und der in Verbindung zur Fahrbahn stehenden Reifenkontaktfläche dar. Entsprechend beeinflusst der Reifenaufbau die Kraftübertragung, insbesondere jedoch in lateraler Richtung und bei dynamischer Anregung. Dieser Einfluss besteht darin, dass der Reifenaufbau unter Krafteinwirkung seinen Stationärzustand erst nach einer bestimmten Abrolldistanz erreicht und bis dahin die Geschwindigkeitsverhältnisse in der Kontaktfläche beeinflusst. Dieses transiente Verhalten wurde erstmalig zur Analyse von sogenannten Flatterphänomenen bei Flugzeugreifen in den 1940'er Jahren untersucht, u.a. durch Schlippe u. a. [SD42]. Abbildung 2.2 zeigt auf schematischer Weise den Reifenaufbau und die Kontaktfläche als mechanisches Ersatzsystem nach Zegelaar [Zeg98]. Das Bürstenmodell in der linken Darstellung ist in der rechten Darstellung durch eine gelenkige Lagerung und ein effektives Feder-Dämpfer-Element ersetzt. Der Unterschied zwischen beiden Ersatzsystemen für die dynamische

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.



(a) (b)

Abbildung 2.3.: Schematische Darstellung der Deformation des Reifenaufbaus in (a) Draufsicht und (b) Ansicht von hinten. Deutlich sichtbar ist die Lateraldeformation und das schematisch dargestellte Deformationsmuster in der Kontaktfläche, beide aus [Pac66].

Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn besteht darin, dass in der linken Darstellung die kontaktkinematischen Vorgänge in der Reifenkontaktfläche berücksichtigt werden. In der rechten Darstellung jedoch spielen lediglich die strukturmechanischen Eigenschaften des Reifenaufbaus eine Rolle, hier dargestellt in Form einer Feder. Die Differentialgleichung zu dieser vereinfachten Darstellung ist eine Funktion erster Ordnung, in Übereinstimmung mit vielen Literaturstellen[Böh85; PS91; Zeg98; Ril06].
Pacejka [Pac66] analysiert und beschreibt den Einfluss des Reifenaufbaus eingehend anhand eines erweiterten Modells eines sogenannten Streched Strings. Er stellt fest, dass die Form des Reifenaufbaus, insbesondere im Bereich der Reifenkontaktfläche, bereits bei der stationären Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn in lateraler Richtung eine große Rolle spielt, [PS91]. In aktuelleren Veröffentlichungen, wie bspw. Pacejka [Pac12], wird der Einfluss des Reifenaufbaus auf die stationäre Kraftübertragung qualitativ angegeben, jedoch nicht näher diskutiert. Die Form des Reifenaufbaus im Bereich der Kontaktfläche wurde ebenfalls von Erdogan [Erd09] untersucht. Erdogan führt hierzu Experimente durch, bei denen eine Sensorik an den Reifenseitenwänden angebracht wurde. Die so ermittelte Verformung des Reifenaufbaus unter lateraler Beanspruchung stimmt qualitativ mit den in Abbildung 2.3 dargestellten schematischen Ansichten eines mit einer Biegesteifigkeit versehenen Streched Strings überein. Hanada u. a. [HNM89] beschreibt, wie sich konstruktive Eigenschaften des Reifens auf die jeweiligen Reifensteifigkeiten auswirken, mit dem Fokus auf Beschreibung des Phasenverzuges zwischen Schräglaufwinkel und Lateralkraft. Er stellt fest, dass insbesondere die Biege-, Radial- und Lateralsteifigkeit, sowie die torsionale Steifigkeit des Reifenaufbaus sich auf den Phasenverzug auswirken. Bezogen auf konstruktive Eigenschaften des Reifens kommt er zu folgenden Schlussfolgerungen:

1. Der Reifeninnendruck p_i hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Vertikalsteifigkeit c_z

2. Insbesondere die Textilcordeinlage und der Wulstverstärker haben maßgeblichen Einfluss auf die Lateralsteifigkeit c_y

3. Das Volumen und die Eigenschaften des Elastomermaterials im Bereich der Reifenschulter und der Seitenwand haben maßgeblichen Einfluss auf die torsionale Steifigkeit c_θ

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.