

Sebastian van Putten

Eine hybride Methode zur
objektiven Beschreibung
von Reifencharakteristika



Schriftenreihe des Lehrstuhls
Kraftfahrzeugtechnik

Herausgeber Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop

Band 3

ISSN 2509-694X





EINE HYBRIDE METHODE ZUR OBJEKTIVEN BESCHREIBUNG VON REIFENCHARAKTERISTIKA

Berend Jan Sebastiaan van Putten

Geboren am: 15.02.1986 in Nijmegen, Niederlande

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR (DR.-ING.)

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Hirschberg

Eingereicht am: **18.07.2016**

Verteidigt am: **17.03.2017**



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2017

Zugl.: (TU) Dresden, Univ., Diss., 2017

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2017

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2017

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9523-9

eISBN 978-3-7369-8523-0



VORWORT





Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Kraftfahrzeugtechnik der Technischen Universität Dresden und als Doktorand in der Abteilung Eigenschaften Fahrwerkkonzepte, im Rahmen der Wissenschaftskooperation INI.TUD mit der AUDI AG.

Bedanken möchte ich mich zunächst bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop für das Vertrauen und die wissenschaftliche und persönliche Betreuung während der Promotionszeit. Besonders beeindruckt hat mich Ihre Fähigkeit, bei der Vielzahl und Komplexität der Themen immer den roten Faden im Blick zu behalten und sie mit kritischen Fragen zu lenken. Unsere Diskussionen haben mir immer wieder neue Blickwinkel eröffnet. Außerdem bedanke ich mich recht herzlich bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Hirschberg für das Interesse an die Arbeit und die Übernahme des Koreferates.

Des Weiteren gilt mein besonderer Dank Herrn Dr.-Ing. Stefan Einsle. Einerseits für die Diskussionen, die zu dem Forschungsprojekt geführt haben und andererseits insbesondere für die vielen Möglichkeiten und die Freiheit, die Du mir in der Umsetzung des Projektes gewährt hast. Diese beiden Elemente haben maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Weiterhin bedanke ich mich recht herzlich bei Herrn Dr.-Ing. Andreas Wagner und Herrn Dr.-Ing. Armin Schöpfel für die Ermöglichung des Forschungsprojektes, die nachhaltige Anerkennung der Relevanz von Reifeneigenschaften in der Fahrwerkentwicklung und die vielen kritischen Anregungen während der Laufzeit des Forschungsprojektes. Vielen Dank weiterhin an Herrn Dipl.-Ing. Robert Clauß für die schier unendlich vielen Diskussionen und Anregungen zum Thema, insbesondere auch während der Zugfahrt von und nach Ingolstadt. Des Weiteren ein herzliches Dankeschön an die Kollegen der Abteilung I/EF-13.

Die Untersuchung der Vermessung von Reifeneigenschaften auf einer realen Fahrbahnoberfläche erforderte Messkampagnen auf verschiedenen Prüfstrecken. Für die vielen heiteren Stunden, die wir hinten im Trailer verbracht haben, und die herausragende Zusammenarbeit bedanke ich mich recht herzlich bei Sonny Huisman und Willem Verstedden.

Die Zeit in Dresden war eine sehr schöne. Dafür und für die offene und herzliche Aufnahme in das Team möchte ich mich bei allen Kollegen des Lehrstuhls Kraftfahrzeugtechnik bedanken. Besonders hervorheben möchte ich die Herren Dipl.-Ing. Jan Kubenz, Dipl.-Ing. Christoph Jahn und Dipl.-Ing. Frank Hermsdorf für die angenehme und erfolgreiche Zusammenarbeit. Es freut mich besonders, dass wir gemeinsam ein sehr interessantes Lehrprogramm im Bereich Fahrdynamik definieren, und das Gesamtfahrzeugpraktikum erfolgreich als einzigartiges Erlebnis innerhalb des Studiums Kraftfahrzeugtechnik installieren konnten. Außerdem vielen Dank für die lustige und lässige Zeit, auch abseits der Arbeit im schönen Dresden.

Ein herzliches Dankeschön gilt auch den Studenten, die ich während der Promotionszeit betreuen durfte. Dies gilt besonders für Herren Dipl.-Ing. Christian Angrick und Dipl.-Ing. Hendrik Abel. Es freut mich, dass wir weiterhin als Kollegen zusammenarbeiten.

Besonders prägend für mein Interesse am Reifenverhalten war bereits das Studium an der Eindhoven University of Technology und insbesondere die Lehrveranstaltung zum Thema Fahrdynamik von Herrn dr.ir. Igo Besselink. Wenngleich ich mich zu der Zeit viel stärker für die Hintergründe der Kinematik von Radaufhängungen interessierte; es waren Deine Vorlesungen, die den Grundstein für mein Interesse am Reifenverhalten gelegt haben. Vielen Dank dafür, Igo. Des Weiteren möchte ich mich bei meinem ehemaligen Kollegen Herrn Dipl.-Ing. Matthias Baderschneider für die vielen interessanten Diskussionen zum Reifenverhalten bedanken.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Familie und insbesondere bei Daniela bedanken für das bedingungslose Vertrauen, die Unterstützung und das Verständnis über die Jahre der Arbeit an dieser Dissertation und darüber hinaus.

München, den 17. März 2017
Sebastian van Putten





KURZFASSUNG



Für die korrekte objektive Beschreibung der Fahrdynamik von Fahrzeugen im Linear- und Grenzbereich ist die präzise Beschreibung der Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn von großer Bedeutung. Aus einer Literaturübersicht wird jedoch geschlussfolgert, dass ein Ansatz zur Identifikation und Beschreibung von longitudinalen und lateralen Reifencharakteristika unter der Anwendung entsprechenden Bedingungen bis dato nicht existiert.

Der in der vorliegenden Arbeit beschriebene Prozess zur Reifencharakterisierung gründet sich auf einem definierten Satz objektiver Gesamtfahrzeugkenngrößen, welche mithilfe dedizierter Fahrmanöver identifiziert werden. Auf Basis einer umfassenden Analyse der auftretenden Reifenbetriebsbedingungen werden die zu identifizierenden Reifencharakteristika festgelegt. Der Kern der hybriden Methode besteht in der zweckmäßigen Klassifizierung von Reifencharakteristika nach Struktur- und Reibgrößen. Zur Beschreibung von Strukturgrößen wird die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn auf Basis der kinematischen Deformationsmechanismen in der Reifenkonstruktion hergeleitet. Dies erfolgt zunächst unter der Prämisse des Haftzustandes. Insbesondere zur korrekten Beschreibung des lateralen Verhaltens wird eine neuartige Beschreibung der Biegeform des Reifenaufbaus beschrieben. Diese erlaubt die Ableitung analytischer Formulierungen für die Schräglaufsteifigkeit und Rückstellsteifigkeit und liefert Einsichten in den Einfluss konstruktiver Reifeneigenschaften auf Strukturgrößen. Darüber hinaus wird auf diese Weise ein Verständnis für die Abhängigkeiten und Sensitivitäten von Strukturgrößen entwickelt, welche umfassend experimentell untersucht und auf Basis der vorangegangenen Herleitungen erläutert werden. Neuartige Konditionierungsverfahren werden zur Gewährleistung der Präzision von Reifenmessungen entwickelt und experimentell bestätigt. Des Weiteren werden bestehende Messverfahren weiterentwickelt und auf neuartige Weise kombiniert. Die Klassifizierung von Reifencharakteristika erlaubt außerdem die Identifikation von Strukturgrößen auf einem Flachbahnprüfstand, dessen Stärke insbesondere die präzise Kontrolle von Randbedingungen ist, während Reibgrößen auf einem Anhängerprüfstand auf realen Fahrbahnen identifiziert werden. Auf Basis einer signifikanten Stichprobe wird experimentell belegt, dass die Paarung eines Reifens mit einer der Anwendung entsprechenden Fahrbahnoberfläche insbesondere für Reibgrößen unumgänglich ist. Zur Synthese der unabhängig identifizierten Struktur- und Reibgrößen wird ein Synthesemodell beschrieben, welches auf die Herleitungen der Kraftübertragung im Haft- und partiellen Haft- und Gleitzustand aufbaut. Die Parameter des als Anwendermodellierung gewählten Magic Formula Reifenmodells werden mithilfe numerischer Optimierung aus virtuellen Messdaten des Synthesemodells bestimmt. Trotz der neuartigen hybriden Identifikationsmethode besteht nicht die Notwendigkeit, die Anwendermodellierung zu verändern. Diese ist durch ihre mathematisch-empirische Formulierung bereits in der Lage die zu beschreibenden Reifencharakteristika mit ausreichender Genauigkeit abzubilden.

In der Methodvalidierung wird zunächst festgestellt, dass eine repräsentative Referenz der zu identifizierenden Reifencharakteristika auf Komponentenebene nicht existiert. Aus diesem Grund wird die Validierung auf Gesamtfahrzeugebene auf Basis der eingangs definierten Gesamtfahrzeugkenngrößen durchgeführt. Zur Gewährleistung einer Vergleichsbasis wird zunächst das gewählte Fünf-Massen-Gesamtfahrzeugmodell hinsichtlich der Abbildung von Reifenbetriebsbedingungen validiert. Die Validierung der hybriden Methode anhand von neun Reifenindividuen unterschiedlicher Dimension und Bauart erfolgt anschließend durch einen Vergleich von gemessenen und gerechneten Gesamtfahrzeugkenngrößen und belegt die maßgebliche Verbesserung der Rechnungsergebnisse im Vergleich zum bisherigen Stand der Technik. Voraussetzung für die Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung ist jedoch, dass die Fahrzeugreifen bei der Gesamtfahrzeugvermessung analog zur Reifencharakterisierung konditioniert werden. Bemerkenswert ist, dass die Reibgrößen auf einer örtlich anderen Prüfstrecke ermittelt wurden, als die Gesamtfahrzeugkenngrößen. Hierdurch wird die Robustheit der Methode hinsichtlich unterschiedlicher, hinsichtlich ihrer Rauheitseigenschaften jedoch vergleichbarer, Fahrbahnoberflächen unterstrichen.





ABSTRACT



For correct description of vehicle dynamics in both the linear and limit range, precise description and modelling of force transmission between tyre and road is of particular importance. A study into existing literature however reveals, that comprehensive methods for identification and description of longitudinal and lateral tyre characteristics are not known to exist to date. This specifically applies to the representation of tyre operating conditions corresponding to the application on vehicle level.

The hybrid method for objective tyre characterisation discussed in this work is based on a defined set of objective vehicle dynamics quantities, identified using dedicated vehicle manoeuvres. By means of measurement and analysis of tyre operating conditions during the execution of these manoeuvres, significant tyre characteristics are defined. A key aspect of the hybrid method is classification of these tyre characteristics into structural and friction quantities. For description of structural quantities, the mechanisms of kinematic deformation governing force transmission within the contact area are derived, under the assumption of full stick. For correct description of the contact kinematics during both steady-state and dynamic force transmission, tyre belt deformation is found to have significant influence. This especially holds for the lateral direction, where a novel mechanical approximation of the bending shape of the tyre belt is formulated, allowing for analytical description of both cornering stiffness and self-aligning stiffness. Insights gained into the influence of mechanical tyre properties on structural quantities furthermore allow for understanding of the dependencies and sensitivities of these characteristics with respect to varying tyre operating conditions. These dependencies and sensitivities are subsequently investigated experimentally. To this extent, novel methods for tyre temperature conditioning are developed and existing methods for tyre measurement are refined. This translates into a high overall measurement precision of both structural and friction quantities. The presented classification of tyre characteristics moreover allows for identification of structural quantities by utilization of an indoor flat track test facility, by use of which operating conditions can be controlled with high precision. Identification of friction quantities is performed by means of an outdoor trailer type test facility under real road conditions. Based on a significant sample of tyres, it is experimentally validated that, for friction quantities in particular, pairing of the tyre to a road surface which corresponds with the application in question, is unavoidable. On the basis of the mechanical-analytical formulations for tyre force transmission derived before, a synthesis model is described for the composition of independently identified structural and friction quantities. Parameters of an end-user tyre model of the Magic Formula type are determined by means of numerical optimization, based on the virtual measurement data from the synthesis model. Despite the novel identification method for tyre characteristics, there is no need to exchange the end-user tyre model. Its mathematical empirical formulation allows for precise description of the identified tyre characteristics.

During validation of the developed hybrid method, it is found that, on tyre level, no absolute reference for the identified characteristics exists. Instead, validation is performed based on the objective vehicle dynamics quantities defined before. A basis of comparison is found by validation of a two track vehicle model with respect to the representation of tyre operating conditions. Subsequently, validity of the hybrid method is demonstrated by comparison of measured and calculated vehicle characteristics for a sample nine tyres of different size and make. The accuracy of calculation is improved substantially by means of the hybrid method compared to the state of the art. For comparability between measured and calculated vehicle characteristics, it is found to be necessary that tyre conditioning is similar during vehicle and tyre measurement. It is remarkable that a high level of accuracy of calculation is achieved, even though tyre friction quantities have been identified on a different proving ground compared to the vehicle quantities. This emphasises the robustness of the method with respect to varying road surfaces with comparable roughness characteristics.





INHALTSVERZEICHNIS



Vorwort	I
Kurzfassung	V
Abstract	IX
Notation	XIX
1. Einführung	1
1.1. Motivation	3
1.2. Literaturübersicht	5
1.3. Zielstellung und Struktur	8
2. Wissenschaftliche Grundlage	11
2.1. Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn	13
2.1.1. Reifenaufbau und Einfluss auf die Kraftübertragung	14
2.1.2. Reifenkontaktfläche und Kontaktbedingungen	16
2.1.3. Deformationskinematik	17
2.1.4. Visko-elastisches Materialverhalten und Schubspannungen	18
2.1.5. Mechanismen der Elastomerreibung	23
2.1.6. Wechselwirkung von Fahrbahnoberflächen mit der Kraftübertragung	27
2.1.7. Charakteristische Größen der Kraftübertragung	28
2.2. Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen	29
2.2.1. Langsame und stationäre Kurvenfahrt	29
2.2.2. Schnelle und stationäre Kurvenfahrt	31
2.2.3. Schnelle und instationäre Kurvenfahrt	32
2.3. Modellierungsansätze in der Fahrzeugdynamik	33
2.3.1. Reifenmodelle	33
2.3.2. Gesamtfahrzeugmodelle	35
2.4. Existierende Prüffelder zur Beschreibung von Systemeigenschaften	36
2.4.1. Übersicht und Eigenschaften der Prüffelder für Reifen	36
2.4.2. Prüffelder für Radführungen	39
2.4.3. Gesamtfahrzeugprüfstände	39
2.5. Diskussion	39
2.6. Zusammenfassung	40
3. Hybride Identifikationsmethode für Reifencharakteristika	43
3.1. Definition von zu untersuchenden Gesamtfahrzeugkenngrößen	45
3.2. Definition von Reifenbetriebsbedingungen im Gesamtfahrzeugversuch	48
3.2.1. Bestimmung der Radstellung	50
3.2.2. Bestimmung von Kräften und Momenten	51
3.2.3. Bestimmung der Reifentemperatur	53
3.2.4. Ableitung von Betriebsbedingungen	53
3.3. Klassifikation von Reifencharakteristika	56
3.3.1. Definition und Eigenschaften von Strukturgrößen	57
3.3.2. Definition und Eigenschaften von Reibgrößen	57
3.4. Gesamtübersicht der Methode	58
3.5. Diskussion der Identifikation von Reifencharakteristika direkt am Fahrzeug	59
3.5.1. Aspekte bezogen auf die Reifenkonditionierung	59
3.5.2. Aspekte bezogen auf die Vollständigkeit der Eigenschaftsidentifikation	60
3.5.3. Prozessuale Aspekte	60
3.5.4. Auswahl des meist geeigneten Ansatzes	61
3.6. Zusammenfassung	61



4. Beschreibung von Strukturgrößen	63
4.1. Beschreibung der Kraftübertragung von Reifen im Haftzustand	66
4.1.1. Die Umfangschlupfsteifigkeit	66
4.1.2. Die Schräglaufsteifigkeit und Rückstellsteifigkeit	69
4.2. Beschreibung der instationären Kraftübertragung	76
4.2.1. Transientes longitudinales Verhalten und longitudinale Einlauflänge	77
4.2.2. Transientes laterales Verhalten und laterale Einlauflänge	82
4.3. Prüfmethode für Strukturgrößen	84
4.3.1. Prozedur zur Reifenkonditionierung	84
4.3.2. Methode zur Identifikation von longitudinalen Strukturgrößen	86
4.3.3. Methode zur Identifikation von lateralen Strukturgrößen	86
4.3.4. Auswahl eines geeigneten Prüfstandes für Strukturgrößen	91
4.4. Präzision der Prüfmethode für Strukturgrößen	93
4.5. Experimentelle Analyse von Sensitivitäten und Randbedingungen	93
4.5.1. Einfluss der Abrollgeschwindigkeit auf Strukturgrößen	93
4.5.2. Einfluss der Reifentemperatur auf Strukturgrößen	96
4.5.3. Einfluss des Reifeninnendrucks auf Strukturgrößen	97
4.5.4. Einfluss der Felgenmaulweite auf Strukturgrößen	99
4.5.5. Einfluss des Sturzwinkels auf Strukturgrößen	99
4.6. Diskussion	101
4.7. Zusammenfassung	103
5. Beschreibung von Reibgrößen	105
5.1. Isotrope Beschreibung der Elastomerreibung	107
5.1.1. Beschreibung der Abhängigkeit von der Reifentemperatur	108
5.1.2. Beschreibung der Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit	109
5.1.3. Reibungsgesetz	109
5.2. Beschreibung der Kraftübertragung im partiellen Haft- und Gleitbereich	110
5.2.1. Der longitudinale Grenzbereich und bezogene Reibungskoeffizient	111
5.2.2. Der laterale Grenzbereich und bezogene Reibungskoeffizient	116
5.3. Prüfmethode für Reibgrößen	118
5.3.1. Methode zur Identifikation von longitudinalen Reibgrößen	119
5.3.2. Methode zur Identifikation von lateralen Reibgrößen	120
5.3.3. Auswahl eines geeigneten Prüfstandes für Reibgrößen	120
5.4. Präzision der Prüfmethode für Reibgrößen	122
5.5. Experimentelle Analyse von Sensitivitäten und Randbedingungen	124
5.5.1. Beobachtete Stick-Slip-Schwingungen	125
5.5.2. Einfluss der Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche auf Reibgrößen	126
5.5.3. Einfluss von Zwischenmedien auf Reibgrößen	129
5.6. Diskussion	135
5.7. Zusammenfassung	136
6. Eigenschaftsynthese mittels mechanisch-analytischer Modellierung	139
6.1. Modellaufbau und Parameterraum	141
6.2. Parameteridentifikation des mechanisch-analytischen Modells	142
6.2.1. Approximation der Dimension der makroskopischen Kontaktfläche	144
6.2.2. Identifikation von strukturbezogenen Parametern	145
6.2.3. Identifikation von reibungsbezogenen Parametern	147
6.3. Gegenüberstellung synthetisierter Ergebnisse	149
6.3.1. Virtuelle Messdaten und Parameteridentifikation	152
6.4. Diskussion	152
6.5. Zusammenfassung	155

7. Validierung der Methode am Gesamtfahrzeug	157
7.1. Gesamtfahrzeugmodellierung und Parameteridentifikation	160
7.1.1. Validierung des Gesamtfahrzeugmodells	162
7.2. Gegenüberstellung von gemessenen und gerechneten Fahrzeugkenngößen	162
7.2.1. Auswertung und Konfidenzintervall von Fahrzeugmessungen	162
7.3. Validierung von longitudinalen Kenngrößen	164
7.4. Validierung von stationären lateralen Kenngrößen	167
7.4.1. Maximale Lateralbeschleunigung	167
7.4.2. Lenkradwinkelgradient im Linearbereich	167
7.4.3. Lenkradwinkelgradient im Grenzbereich	170
7.4.4. Schwimmwinkelgradient im Linearbereich	170
7.4.5. Schwimmwinkelgradient im Grenzbereich	170
7.5. Validierung von instationären lateralen Kenngrößen	170
7.5.1. Validierung der Eigenfrequenz der Giergeschwindigkeit	172
7.5.2. Validierung der Verstärkung der Giergeschwindigkeit	172
7.6. Diskussion	174
7.7. Zusammenfassung	175
8. Schlussbetrachtung	177
8.1. Handlungsempfehlungen	181
Literaturverzeichnis	183
A. Transientes Verhalten bei dynamischer Vertikalkraftanregung	207
B. Weitere Darstellungen der Schubspannung in der Kontaktfläche bei lateraler Beanspruchung	211
C. Darstellung des bezogenen lateralen Reibungskoeffizienten	215





NOTATION

