

Schriftenreihe des Lehrstuhls Kraftfahrzeugtechnik

Herausgeber Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop

Band 16

Axel Bindauf

Methodik zur Identifikation fahrkomfortrelevanter Reifeneigenschaften



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN





Schriftenreihe des Lehrstuhls

Kraftfahrzeugtechnik

Herausgeber Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop

Band 16

ISSN 2509-694X





METHODIK ZUR IDENTIFIKATION FAHRKOMFORTRELEVANTER REIFENEIGENSCHAFTEN

Axel Bindauf

Geboren am: 2. März 1983 in Naumburg/ Saale

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR INGENIEUR (DR.-ING.)

Erstgutachter

Prof. Dr.-Ing Günther Prokop

Zweitgutachter

Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay

Eingereicht am: 14.02.2020

Verteidigt am: 13.01.2021



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2021

Zugl.: (TU) Dresden, Univ., Diss., 2021

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2021

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, 2021

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-7368-8

eISBN 978-3-7369-6368-9



DANKSAGUNG

Diese Arbeit ist im Rahmen verschiedener Projekte während meiner Zeit am Lehrstuhl Kraftfahrzeugtechnik entstanden. Für die Übernahme der Betreuung, sein Engagement bei der Projektakquise und seinen Glauben an meine Arbeit danke ich Herrn Prof. Prokop. Er verstand es, mich zu motivieren, wenn ich nicht weiterkam und hatte immer ein offenes Ohr. Jan Kubenz als meinem langjährigen Kollegen möchte ich für viele Gespräche sowie für die gemeinsame Zeit herzlich danken. Insbesondere an meine weiteren ehemaligen Kollegen Robert Sünder, Sebastiaan van Putten, Pavel Sarkisov, Marcus Mai, Axel Gerhard und Christian Angrick möchte ich einen Dank für den fachlichen Austausch sowie die gegenseitige Unterstützung rund um den Lehrbetrieb und die gemeinsame Zeit am Lehrstuhl richten.

Ein großes Dankeschön geht ebenfalls an die technischen Kollegen des IAD. Erik Deunert, Hans Unger, Thomas Kramer und Peter Schöne haben mich im Laufe der Jahre stets schnell, zuverlässig und unkompliziert bei der Teilefertigung, Montagearbeiten und vielen Beschaffungen unterstützt. Dirk Schlimper hat sich kompetent um die Planung und Durchführung von Reifenmessungen gekümmert und dabei keine Mühen gescheut, Sonderwünsche umzusetzen. Stefan Eckert habe ich als sehr kompetenten Ansprechpartner rund um das Thema Messtechnik kennengelernt. Er hat maßgeblich den Prüfstandbetrieb von technischer Seite unterstützt und -modifikationen ermöglicht. Meine Untersuchungen am Agrartechnischen Reifenprüfstand wurden durch Hartmut Döll ermöglicht, der von der Zweckentfremdung seines Prüfstandes für Untersuchungen an PKW-Reifen begeistert war. Wir hatten zahlreiche angenehme Gespräche, die mir neue Denkansätze brachten. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des rollenden Rades sind ebenfalls mit Hilfe des Lehrstuhls und Christian Korn entstanden, der sich dafür nach Feierabend viel Zeit genommen hat.

Seitens AUDI haben mich Peter Knauer und Stefan Einsle im Rahmen mehrerer Projekte unterstützt, die mir in Summe diese Dissertation ermöglichten. Zahlreiche Reifen, aber auch die Achse und Simulationsmodelle des verwendeten Audi A6 wurden bereitgestellt. In vielen Gesprächen haben wir über das Thema und Ziel der Arbeit philosophiert und insbesondere Stefan hat mir dabei das eine oder andere Mal geholfen, das Ziel nicht aus den Augen zu verlieren. Darüber hinaus sorgten sie durch einen gewissen Projektdruck für die nötige Fokussierung auf das Ziel bei mir.

Der allergrößte Dank geht an meine Frau Steffi. Sie hat akzeptiert, wenn ich mal wieder länger auf Arbeit war. Sie hat mir den Rücken freigehalten, damit ich Abende und Wochenenden meiner Arbeit widmen konnte.

Axel Bindauf





KURZFASSUNG

Beim Fahrkomfort handelt es sich um ein wesentliches Qualitätsmerkmal von Kraftfahrzeugen. Neben Anregungen durch das Antriebsaggregat und den Antriebsstrang stellt der Reifen ein wichtiges Übertragungsglied für Schwingungen dar. Er rollt in einem weiten Geschwindigkeitsbereich über die Straßenoberfläche sowie Einzelhindernisse. Dabei passt er sich elastisch an den Untergrund an und überträgt das Höhenprofil der Straße in Form von Kräften an das Fahrwerk. Die Berücksichtigung des Reifens bei der Auslegung des Fahrkomforts ist demzufolge im Entwicklungsprozess erforderlich.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden charakteristische Reifeneigenschaften ermittelt und Methoden zur deren Analyse vorgestellt. Der Einfluss dieser Eigenschaften auf den Fahrkomfort wird anhand von Prüf- und Simulationsmethoden identifiziert. Im Vergleich zu realen Reifenmessungen wird die abstrakte Beschreibung des Reifens mittels charakteristischer Eigenschaften als ein wesentliches Werkzeug für die frühe Phase des Entwicklungsprozesses genutzt. Dadurch lassen sich Zielwerte definieren, welche vom Produkt erfüllt werden müssen.

Neben der Ermittlung von Steifigkeitseigenschaften des Reifens werden Schlagleistenmessungen an einem Außentrommelreifenprüfstand als Methodik zur Reifenbewertung genutzt. Unterschiedliche Reifenschwingungen werden in verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen angeregt. Abhängig davon werden spezielle Kenngrößen ermittelt. An einem neuen Rad-Achs-Prüfstand wird der Einfluss der Kennwerte auf den Fahrkomfort auf Basis der Schnittkräfte der Achse zur Karosserie analysiert. Dies erfolgt anhand der gleichen Schlagleistenüberfahrten wie am Reifenprüfstand. Weitere Untersuchungen widmen sich der Bedeutung der Trommelkrümmung für die Reifenkennwerte und die Übertragbarkeit dieser auf die flache Straße.

Ein einfaches Reifenmodell dient zur virtuellen Abbildung der Reifeneigenschaften in Simulationsmodellen. Reifenmessungen am Außentrommelprüfstand stellen die Basis zur Reifenmodellparametrierung dar. Simulationsergebnisse am virtuellen Rad-Achs-Prüfstand liefern Ergebnisse zur Abbildbarkeit des Reifeneinflusses in der Simulation mit dem Reifenmodell.

Zur Quantifizierung des Reifeneinflusses auf den Fahrkomfort werden die Reifeneigenschaften mit verschiedenen Schnittkräften zwischen Achse und Karosserie in Bezug gesetzt. Darüber hinaus unterstützen Betrachtungen an einfachen Modellen den Bewertungsprozess.

Auf Grundlage der Ergebnisse werden Reifeneigenschaften bezüglich ihrer Relevanz für den Fahrkomfort bewertet und deren Verwendung im Entwicklungsprozess diskutiert.





ABSTRACT

Ride comfort is a significant quality characteristic of vehicles. Beside excitations by the power unit and the powertrain, the tires are an important transfer element for oscillations. They roll over various road profiles and obstacles across a wide speed range. In doing so, the tire adapts elastically to the ground and converts the height profile of the road into forces on the suspension. Therefore, the consideration of the tire is important for the design of ride comfort during the development process.

In the context of the current thesis, characteristic tire properties are determined and methods for their analysis are introduced. The influence of the tire properties on a vehicle's ride comfort will be identified based on test and simulation methods. In comparison to real tire measurements, the abstract description of the tire by characteristic values is used as an important tool for the early stages of development. Thus, target values can be defined that the final product has to satisfy.

In addition to the measurement of tire stiffness properties, cleat crossings on an outer drum tire test rig are used as a methodology for the tire assessment. Various tire oscillations are excited at different velocities. Depending on these oscillations, specific parameters are determined. The influence of the tire properties on a vehicle's ride comfort will be analysed on a new wheel-axle test rig, based on the cutting forces between the suspension and the vehicle's body. For this, the same cleat crossings as on the tire test rig are used. Further investigations deal with the significance of the drum curvature for the characteristic tire values and their transferability on flat road surfaces.

Accompanying these tests, a simple tire model is used for the virtual reproduction of the tire properties in simulation models. Tire measurements on an outer drum tire test rig constitute the basis for the tire model's parameterisation. Simulations on a virtual wheel-axle test rig provide the results to support the virtual reproduction of the tire's influence with the tire model.

For the quantification of the tire's influence on a vehicle's ride comfort, tire properties are correlated with various cutting forces between the suspension and vehicle body. In addition, analyses on simple models support the evaluation process.

Based on the results, tire properties are discussed with reference to their relevance for a vehicle's ride comfort and to their use in the development process.





INHALTSVERZEICHNIS

Danksagung	III
Kurzfassung	V
Abstract.....	VII
Inhaltsverzeichnis.....	IX
Formelzeichenverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis.....	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Methodische Entwicklungsprozesse.....	1
1.2 Wissenschaftlicher Hintergrund	5
1.3 Motivation	6
1.4 Methodik	7
2 Gesamtfahrzeugkomfort	11
2.1 Analyse und Bewertung	13
2.2 Achseigenschaften	14
2.3 Reifeneinfluss.....	15
2.4 Fazit	16
3 Grundlagen zu PKW-Reifen	17
3.1 Reifenaufbau	17
3.2 Einteilung von Reifeneigenschaften.....	18
3.3 Reifeneigenschaften für Fahrkomfort.....	19
3.4 Reifenmodelle	20
3.4.1 Einteilung von Reifenmodellen	20
3.4.2 Short Wavelength Intermediate Frequency Tyre model – SWIFT	22



3.4.3	Flexible Ring Tire Model – FTire.....	25
3.4.4	Fazit	26
3.5	Bestimmung von Reifeneigenschaften	27
3.5.1	Reifenprüfstand der TU Dresden	30
3.5.2	Hydropulsprüfstand	31
3.5.3	Agrartechnischer Prüfstand	32
3.6	Fazit	33
4	Reifeneigenschaften und deren Abbildung in Reifenmodellen.....	35
4.1	Statische Vertikalsteifigkeit	35
4.2	Kontaktfläche.....	39
4.3	Mechanisches Schluckvermögen.....	41
4.4	Statische Vertikalsteifigkeit des rollenden Rades	45
4.5	Übertragbarkeit der Ergebnisse zwischen flachem und gekrümmtem Untergrund ..	46
4.6	Vertikale Gürtelschwingung.....	48
4.7	Statische Längs- und Quersteifigkeit.....	51
4.8	Gekoppelte Längs-Torsionsschwingung.....	51
4.9	Dynamische Vertikalsteifigkeit	54
5	Komfortrelevanz ausgewählter Reifeneigenschaften.....	61
5.1	Rad-Achs-Prüfstand.....	62
5.2	Reifenauswahl und Versuchsplanung.....	63
5.3	Definition geeigneter Bewertungskriterien	67
5.3.1	Bewertung des Schluckvermögens und der statischen Vertikalsteifigkeit ...	68
5.3.2	Bewertung der vertikalen Reifengürtelschwingung.....	68
5.3.3	Bewertung der gekoppelten Längs-Torsionsschwingung.....	69
5.4	Methodik der Analysen	70
5.5	Einfluss der Reifenkennwerte im Versuch	72
5.5.1	Einfluss des Schluckvermögens und der statischen Vertikalsteifigkeit	72
5.5.2	Einfluss der vertikalen Starrgürtelmode	76
5.5.3	Einfluss der gekoppelten Längs-Torsionsmode	83
5.6	Abbildung komfortrelevanter Reifenkennwerte im Simulationsmodell	89
5.6.1	Einfluss des Schluckvermögens und der statischen Vertikalsteifigkeit im Simulationsmodell	92
5.6.2	Einfluss der vertikalen Starrgürtelmode im Simulationsmodell	95
5.6.3	Einfluss der gekoppelten Längs-Torsionsmode im Simulationsmodell.....	98



5.7 Variation des Schluckvermögens im Simulationsmodell	102
5.8 Einfluss der Vertikalmode am einfachen Modell	108
5.9 Modellvorstellung Längsrichtung	112
6 Zusammenfassung und Ausblick.....	115
Literaturverzeichnis	XIX
Abbildungsverzeichnis.....	XXV
Formelverzeichnis	XXXI
Tabellenverzeichnis.....	XXXIII
A1	XXXV
A2	XXXVII
A3	XXXIX
A4	XLI
A5	XLIII





FORMELZEICHENVERZEICHNIS

$z, \dot{z}, \ddot{z}$	Bewegungskordinate z und zeitliche Ableitungen
a	Halbe Länge Reifenlatsch
a_{θ}, EL	Ellipsenhalmesser in x
b	Halbe Breite Reifenlatsch
b_{θ}, EH	Ellipsenhalmesser in z
c	Steifigkeit allgemein
C	Steifigkeitsmatrix
c, EO	Ellipsenexponent
C_{belt}	Steifigkeit zwischen Reifengürtel und Felge
C_{long}	Steifigkeit zwischen Reifengürtel und Felge aus SWIFT Modellparameter f_{long}
C_{dyn}	Dynamische Steifigkeit
$C_{Friction}$	Steifigkeit eines Reibelementes in FTire
C_{Radial}	Radiale Steifigkeit in FTire
C_{res}	Reststeifigkeit
C_{vert}	Vertikalsteifigkeit
$C_{vert,stat}$	Statische Vertikalsteifigkeit
C_{windup}	Torsionssteifigkeit zwischen Reifengürtel und Felge
$C_{z,btm}$	Reifensteifigkeit bei Felgenkontakt
C_{z0}	Vertikalsteifigkeit bei einer Bezugsradlast
d_{dyn}	Dämpfung eines dynamischen Elementes in FTire
D_{long}	Dämpfungsmaß translatorische Gürtelmode, Modellparameter
d_{Radial}	Radiale Dämpfung in FTire
$E1y$	1. Biegemode in y -Richtung
e_i^2	Unerklärte Variation
f	Frequenz
$\hat{F}$	Maximalwert einer Kraft
F_0	Mittelwert einer Kraft
$F_{Friction}$	Kraft eines Reibelementes in FTire
f_{long}	Frequenz translatorische Gürtelmode, Modellparameter
$f_{long} F_x$	Frequenz Längs-Torsionsmode aus der Längskraft ermittelt
$F_{max,min}$	Kraftamplitude max, min
F_{rim}	Reifenkraft auf Felge
F_{road}	Reifenkraft auf Straße
f_{SWIFT}	Effektive Frequenz ungedämpfte translatorische Gürtelmode, SWIFT Reifenmodell
$f_{SWIFT,D}$	Effektive Frequenz gedämpfte translatorische Gürtelmode, SWIFT Reifenmodell
$f_{vert} F_z$	Frequenz der Vertikalmode aus der Vertikalkraft ermittelt
F_x	Längskraft



$F_x(k)$	Längskraft abh. vom Längsschlupf
F_z	Radlast, Vertikalkraft
F_{z0}	Bezugsradlast
h	Anregungsamplitude
h_{cleat}	Höher einer Schlagleiste
$INDEX_{30,90}$	Bezug zur Geschwindigkeit
k	Dämpfungskonstante
K	Dämpfungsmatrix
K_{belt}	Dämpfungskonstante zwischen Reifengürtel und Felge
K_{long}	Dämpfungskonstante zwischen Reifengürtel u. Felge aus Modellparameter D_{long}
K_{windup}	Torsionsdämpfungskonstante zwischen Reifengürtel und Felge
K_{μ}, K_K	Längsschlupfteifigkeit
$l_{s, ES}$	Ellipsenabstand in x
M	Masse
M	Massenmatrix
m_{belt}	Masse des Schwingenden Reifengürtels
m_c	Masse Kontaktelement
p_i	Reifenfülldruck
PtP	Peak-to-Peak Wert
q_i	Reifenmodellparameter SWIFT
R_0	Unbelasteter Reifenradius
R^2	Bestimmtheitsmaß
$\tilde{r}_e$	Effektiver Rollradius bei Hindernisüberfahrt
R_l	Belasteter Reifenradius
R_{rim}	Felgenradius
r_{stat}	Statischer Reifenradius
R_y	Rotation in y-Richtung
R_z	Rotation in z-Richtung
S	Matrix der Störgrößen
$s_{Strasse}$	Wegkoordinate Straße
t	Zeit
TES	Tire Enveloping Stiffness
T_x	Translation in x-Richtung
T_y	Translation in y-Richtung
T_z	Translation in z-Richtung
v	Geschwindigkeit allgemein
v_x	Längsgeschwindigkeit
$w(X)$	effektive Höhe abh. von der x-Koordinate
x	Längsrichtung
X_i, X_f	x-Koordinate vordere Ellipse, Laufkoordinate
X_G	x-Koordinate Reifengürtel
X_r	x-Koordinate hintere Ellipse
$x_{sx,c}$	Gleitgeschwindigkeit Kontaktelement
y	Querrichtung
z	Vertikalrichtung
$z1$	Absolute Höhe vorderer Ellipsenmittelpunkt
$z2$	Absolute Höhe hinterer Ellipsenmittelpunkt
z_e	Abstand Ellipsenmittelpunkt zum Kontaktpunkt in z
Z_i	z-Koordinate vordere Ellipse
Z_G	z-Koordinate Reifengürtel