

Wissenschaftliche Reihe
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

RESEARCH

Paul Heimann

Ein Beitrag zur Modellierung des Reifenverhaltens bei geringen Geschwindigkeiten



 Springer Vieweg

The Springer Vieweg logo features a stylized chess knight (horse) facing left, positioned above the text 'Springer Vieweg' in a serif font.

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

Reihe herausgegeben von

M. Bargende, Stuttgart, Deutschland

H.-C. Reuss, Stuttgart, Deutschland

J. Wiedemann, Stuttgart, Deutschland

Das Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) an der Universität Stuttgart erforscht, entwickelt, appliziert und erprobt, in enger Zusammenarbeit mit der Industrie, Elemente bzw. Technologien aus dem Bereich moderner Fahrzeugkonzepte. Das Institut gliedert sich in die drei Bereiche Kraftfahrwesen, Fahrzeugantriebe und Kraftfahrzeug-Mechatronik. Aufgabe dieser Bereiche ist die Ausarbeitung des Themengebietes im Prüfstandsbetrieb, in Theorie und Simulation.

Schwerpunkte des Kraftfahrwesens sind hierbei die Aerodynamik, Akustik (NVH), Fahrdynamik und Fahrermodellierung, Leichtbau, Sicherheit, Kraftübertragung sowie Energie und Thermomanagement – auch in Verbindung mit hybriden und batterieelektrischen Fahrzeugkonzepten.

Der Bereich Fahrzeugantriebe widmet sich den Themen Brennverfahrensentwicklung einschließlich Regelungs- und Steuerungskonzeptionen bei zugleich minimierten Emissionen, komplexe Abgasnachbehandlung, Aufladesysteme und -strategien, Hybridsysteme und Betriebsstrategien sowie mechanisch-akustischen Fragestellungen.

Themen der Kraftfahrzeug-Mechatronik sind die Antriebsstrangregelung/Hybride, Elektromobilität, Bordnetz und Energiemanagement, Funktions- und Softwareentwicklung sowie Test und Diagnose.

Die Erfüllung dieser Aufgaben wird prüfstandsseitig neben vielem anderen unterstützt durch 19 Motorenprüfstände, zwei Rollenprüfstände, einen 1:1-Fahrsimulator, einen Antriebsstrangprüfstand, einen Thermowindkanal sowie einen 1:1-Aeroakustikwindkanal.

Die wissenschaftliche Reihe „Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart“ präsentiert über die am Institut entstandenen Promotionen die hervorragenden Arbeitsergebnisse der Forschungstätigkeiten am IVK.

Reihe herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende
Lehrstuhl Fahrzeugantriebe,
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann
Lehrstuhl Kraftfahrwesen,
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss
Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik,
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Paul Heimann

Ein Beitrag zur
Modellierung des
Reifenverhaltens
bei geringen
Geschwindigkeiten

Paul Heimann
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2017

D93

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart
ISBN 978-3-658-19599-1 ISBN 978-3-658-19600-4 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-19600-4>

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit und die Übernahme des Hauptberichtes. Herrn Prof. Böttinger danke ich für die freundliche Übernahme des Mitberichtes und sein Interesse an der Arbeit.

Herrn Dipl.-Math. Jens Neubeck, Leiter des Bereiches Fahrzeugtechnik und Fahrdynamik, sowie Herrn Dr.-Ing. Werner Krantz danke ich für die Unterstützung bei der Festlegung des Dissertationsthemas, die Anregungen bei der Ausarbeitung und die Durchsicht der Arbeit. In diesem Zusammenhang möchte ich auch Herrn Dipl.-Ing. Sven Knecht für seine Unterstützung danken.

Für die Hilfe bei der Durchführung der messtechnischen Untersuchungen bedanke ich mich bei Herrn Wolfgang Mayer und Herrn Andreas Fuchs. Ferner danke ich Herrn Sergej Stoppel, der mich in seiner langjährigen Tätigkeit als wissenschaftliche Hilfskraft am IVK in hohem Maße bei der Inbetriebnahme der messtechnischen Einrichtungen und der Auswertung der Messdaten unterstützt hat.

Abschließend möchte ich allen Mitarbeitern und Kollegen der Institute IVK und FKFS, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, danken. Besonders hervorheben möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Andreas Singer und Herrn Dr.-Ing. Andreas Wiesebrock, die wertvolle Anregungen bei der Bearbeitung des Themenfeldes geliefert haben.

Paul Heimann

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Abkürzungsverzeichnis	IX
Zusammenfassung	XVII
Abstract	XXI
1 Einführung und Zielsetzung	1
2 Grundlagen der Reifenmodellierung	5
2.1 Modellkomponenten	5
2.2 Problematik der Zustandsbeschreibung	9
3 Stand der Forschung	13
4 Analyse der Vorgänge im Reifenlatsch anhand des Bürstenmodells	21
4.1 Physikalische Modellbildung	21
4.1.1 Mathematische Beschreibung	22
4.1.2 Diskretisierung des Modells	27
4.2 Analyse des Modellverhaltens	29
4.2.1 Verhalten bei Sprunganregung	38
4.2.2 Verhalten bei Sinusanregung	45
4.2.3 Verhalten bei freier Schwingung	55

5	Neuartiges Reifenmodell für die Fahrdynamiksimulation	63
5.1	Modell für die Zustandsbeschreibung.....	65
5.2	Seitenwandmodell.....	83
5.3	Kraftmodell.....	98
6	Anwendung des entwickelten Reifenmodells	105
6.1	Fahrzeugmodell	106
6.2	Parameteridentifikation.....	108
6.3	Simulationsmanöver	119
6.4	Simulationsergebnisse.....	121
7	Schlussfolgerung und Ausblick	127
	Literaturverzeichnis.....	131
	Anhang	139

Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	m	Amplitude der Sinusschwingung
$ A $	Ns/m	Amplitudenverstärkung
A_e	-	Zustandsmatrix des Ersatzmodells
α	rad	Schräglaufwinkel
α'	rad	Dynamischer Schräglaufwinkel
B_{MF}	-	Parameter des Reifenmodells Magic Formula
β	m/s	Korrekturfaktor für die Schlupfberechnung nach Lee
C_{Fx}	-	Grenzwert des Umfangskraftbeiwertes im Reifenmodell Magic Formula
C_{MF}	-	Parameter des Reifenmodells Magic Formula
c	N/m	Federsteifigkeit des Ersatzmodells
c_B	N/m	Steifigkeit eines Borstenelements
c_L	N/m ²	Latschsteifigkeit
c_S	N/m	Seitenwandsteifigkeit
c_λ	N/-	Schlupfsteifigkeit
$c_{\lambda'}$	N/-	Schlupfsteifigkeit des dynamischen Schlupfes
$c_{\bar{\lambda}}$	N/-	Schlupfsteifigkeit im Arbeitspunkt $\bar{\lambda}$
$c_{\bar{\lambda}_A}$	N/-	Schlupfsteifigkeit im Arbeitspunkt $\bar{\lambda}_A$

$c_{\bar{\lambda}_B}$	N/-	Schlupfsteifigkeit im Arbeitspunkt $\bar{\lambda}_B$
D	-	Lehrsches Dämpfungsmaß
D_{MF}	-	Parameter des Reifenmodells Magic Formula
d	Ns/m	Dämpfungskonstante des Ersatzmodells
d^*	-	Dämpfung
δ	-	Abklingkonstante
E	-	Einheitsmatrix
E_{ab}	J	Energie, die abgeführt wird
E_B	J	Energie, die in einer Borste gespeichert ist
E_{MF}	-	Parameter des Reifenmodells Magic Formula
E_S	J	Energie, die dem System durch einen Impuls zugeführt wird
F	N	Kraft
F'	N	Zustand des Ersatzsystems
$F_{A,0}$	N	Achsenabschnitt der linearisierten Antriebskraft bei $\bar{\lambda}_A = 0$
F_B	N	Bremskraft
$F_{B,0}$	N	Achsenabschnitt der linearisierten Bremskraft bei $\bar{\lambda}_B = 0$
F_N	N	Normalkraft
F_{norm}	N	Normierte Umfangskraft
F_U	N	Umfangskraft
$F_{U,A}$	N	Umfangskraft aus Antriebsschlupf

$F_{U,B}$	N	Umfangskraft aus Bremsschlupf
F_W	N	Externe Widerstandskraft
F_x	N	Kraft in Längsrichtung des Bürstenmodells
ΔF	N	Kraftänderung im Latsch
ΔF_{ab}	N	Abgeführte Kraft am Latschende
ΔF_{zu}	N	Zugeführte Kraft im Latsch
f	1/s	Frequenz
f_0	1/s	Eigenfrequenz
G_{4Par}	1/m	Übertragungsfunktion des 4-Parameterkörpers
G_{Leth}	1/m	Übertragungsfunktion des Lethersichkörpers
G_{ZSD}	1/m	Übertragungsfunktion des Modells mit zusätzlicher Dämpfung
h	-	Diskretisierungsschrittweite des Euler-Verfahrens
I	-	Anzahl der Teilanregungen
i	-	Laufvariable
J_R	kgm ²	Massenträgheitsmoment des Rades
K	-	Parameter des PT1 Modells
k	-	Normierte Verschiebung
L	m	Länge des Reifenlatsches
l	m	Position im Latsch
Δl	m	Verschiebung der Borsten im Latsch
λ	-	Schlupf

λ'	-	Dynamischer Schlupf
λ_A	-	Antriebsschlupf
$\bar{\lambda}_A$	-	Arbeitspunkt des Antriebsschlupfes
λ_B	-	Bremsschlupf
$\bar{\lambda}_B$	-	Arbeitspunkt des Bremsschlupfes
λ_e	-	Eigenwerte des Ersatzmodells
M	Nm	Drehmoment
M_0	Nm	Moment zur Beibehaltung des Arbeitspunktes $\bar{\lambda}_B$
M_B	Nm	Bremsmoment
m_A	kg	Aufbaumasse
μ	-	Kraftschlussbeiwert in Umfangsraftrichtung
μ_{max}	-	Maximaler Kraftschlussbeiwert in Umfangsraftrichtung
N	-	Anzahl der Borsten im Reifenlatsch
n	-	Definierte Borstenanzahl
P	W	Leistung
P_s	W	Schlupfverlustleistung
$p_{Vx4,6}$	-	Parameter des Magic-Formula Reifenmodells
ϕ	rad	Phasenverschiebung der Sinusschwingung
r_{dyn}	m	Dynamischer Radhalbmesser
r'_{dyn}	m	Abstand Radmitte – Latschebene im rollenden Zustand
S	1/s	Laplacevariable

s	m	Latschelementauslenkung
s_L	m	Latschelementauslenkung am Latschende
s_h	-	Parameter des Reifenmodells Magic Formula
s_v	-	Parameter des Reifenmodells Magic Formula
s_z	m	Auslenkung an der Stützstelle z
Δs	m	Auslenkungsänderung
Δs_z	m	Auslenkungsänderung an der Stützstelle z
σ_{ges}	m	Gesamteinlauflänge des Modells
σ_L	m	Einlauflänge aus dem Latsch
σ_S	m	Einlauflänge aus der Seitenwand
T	s	Zeitkonstante
t	s	Zeitbasis
t_0	s	Zeitpunkt des Eintritts eines Elementes in die Latschfläche
t_i	s	Diskreter Zeitpunkt
t_L	s	Verweildauer des Elementes am Latschende
t_l	s	Verweildauer eines Elementes im Latsch
t_s	s	Dauer eines Simulationsschritts
Δt	s	Zeitschritt
τ	s	Zeitbasis für die Integration
u	m/s	Quergeschwindigkeitskomponente im Latsch
V_c	m/s	Geschwindigkeit im Magic Formula Reifenmodell

v	m/s	Geschwindigkeit
v_F	m/s	Fahrzeuggeschwindigkeit
v_L	m/s	Wirksame Geschwindigkeit im Latsch
v_{num}	m/s	Korrekturfaktor der Schlupfdefinition zur Gewährleistung der numerischen Stabilität
v_s	m/s	Verformungsgeschwindigkeit der Seitenwand
v_{th}	m/s	Theoretische Fahrzeuggeschwindigkeit
v_T	m/s	Transportgeschwindigkeit eines Borstenelementes
$v_{T,krit}$	m/s	Kritische Transportgeschwindigkeit eines Borstenelementes
v_x	m/s	Übergrundgeschwindigkeit in Reifenlängsrichtung
v_y	m/s	Übergrundgeschwindigkeit in Reifenquerrichtung
Δv	m/s	Differenzgeschwindigkeit
Δv_0	m/s	Sprunghöhe der Differenzgeschwindigkeit
$\Delta v'_0$	m/s	Neue Sprunghöhe der Differenzgeschwindigkeit
$\Delta \hat{v}$	m/s	Amplitude der sinusförmigen Anregung
ω	rad/s	Kreisfrequenz
ω_0	rad/s	Eigenkreisfrequenz
ω_d	rad/s	Gedämpfte Eigenkreisfrequenz
ω_K	rad/s	Kreisfrequenz, bei der das Verhalten des Systems wechselt
ω_R	rad/s	Winkelgeschwindigkeit des Rades
ω_s	ms/rad	Wegfrequenz

x	m	Länge eines Segmentes
x_s	m	Verformung der Seitenwand
y_i	-	Funktionswert zum Berechnungsschritt i
Z	-	Anzahl der Stützstellen
z	-	Nummerierung der Stützstellen

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
BM	Bürstenmodell
FEM	Finite Elemente Methode
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart
fps	Fuß pro Sekunde (engl.: feet per second)
IVK	Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen
mph	Meilen pro Stunde (engl.: miles per hour)
ODE	Gewöhnliche Differentialgleichung (eng.: ordinary differential equation)
PT1	Proportionales Übertragungsverhalten mit einer Verzögerung erster Ordnung
URM	Universeller Reibungsmesser

Zusammenfassung

Durch die Steigerung der Rechenleistung von Computern bekommen Simulationen im Bereich der Fahrzeugentwicklung einen immer wichtigeren Stellenwert. Insbesondere in der frühen Phase des Entwicklungsprozesses können sie durch die Reduzierung der Anzahl der Prototypen und Fahrversuche einen entscheidenden Beitrag zur Effizienzsteigerung leisten.

Die Modellierung des Reifenverhaltens bildet hierbei einen wesentlichen Baustein, der aufgrund seiner Komplexität oftmals anwendungsspezifischer Lösungen bedarf. Für die Simulation geringer Geschwindigkeiten ergeben sich neben der grundlegenden Forderung nach einer möglichst realitätsnahen Abbildung der zwischen Reifen und Fahrbahn wirkenden Kräfte zusätzliche Anforderungen hinsichtlich der numerischen Behandlung der Interaktion zwischen Reifen und Fahrbahn. Diese zusätzliche Anforderung resultiert aus dem Umstand, dass die gängigen Definitionen von Längsschlupf und Schräglaufwinkel für Geschwindigkeiten von null eine Singularität aufweisen.

Geringe Geschwindigkeiten treten insbesondere bei der Darstellung von Anfahrvorgängen oder Bremsungen bis zum Stillstand auf. Die Bewertung eines Parkassistenzsystems, im virtuellen Umfeld eines Fahrtrainers, ist ein praktisches Beispiel, bei dem eine realitätsnahe Abbildung der Fahrzeugreaktionen im kleinen Geschwindigkeitsbereich relevant ist.

Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der Modellierung des Reifenverhaltens bei geringen Geschwindigkeiten. Ein wesentlicher Aspekt der Herangehensweise ist die Aufteilung der Modellierungsaufgabe in zwei Teilbereiche. Zunächst erfolgt die Beschreibung des Zustandes des Reifens, der zu jedem Zeitpunkt der Simulation die Interaktion zwischen Reifen und Fahrbahn eindeutig definiert. Anschließend wird diesem Zustand eine Wirkung, in Form einer in der Kontaktfläche wirkenden Kraft, zugeordnet.

Die Untersuchungen zur Zustandsbeschreibung erfolgen anhand eines physikalischen Modellansatzes, der die Vorgänge in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn, dem Reifenlatsch, örtlich und zeitlich auflöst. Aus den kinematischen und physikalischen Zusammenhängen folgt schließlich eine