

Wissenschaftliche Reihe  
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

RESEARCH

Willibald Brems

# Querdynamische Eigenschaftsbewertung in einem Fahrsimulator



 Springer Vieweg

The Springer Vieweg logo consists of a stylized chess knight icon to the left of the text 'Springer Vieweg'.

---

# **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

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/13535>

---

Willibald Brems

# Querdynamische Eigenschaftsbewertung in einem Fahrsimulator

 Springer Vieweg

Willibald Brems  
Stuttgart, Deutschland

Dissertation, Universität Stuttgart, 2018

D93

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart  
ISBN 978-3-658-22786-9 ISBN 978-3-658-22787-6 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-22787-6>

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, ein Teil von Springer Nature 2018

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 ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

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

# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen der Kooperation HIN (Hochschulinstitut Neckarsulm) am Lehrstuhl Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart in enger Zusammenarbeit mit der Abteilung Eigenschaften Fahrwerkkonzepte der AUDI AG.

Mein Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Jochen Wiedemann für die wohl-dosierte und unkomplizierte Betreuung, auch über die Distanz zwischen Ingolstadt und Stuttgart hinweg. Für die Übernahme des Mitberichts bedanke ich mich bei Prof. Thomas Maier, für den Prüfungsvorsitz bei Prof. Oliver Riedel.

Ein herzliches Dankeschön geht an alle Kollegen in Ingolstadt für die großartige Zusammenarbeit. Namentlich seien hier erwähnt Wolfram Remlinger, Martin Richter, Armin Ruscheinsky, Hannes Karrer und natürlich die Truppe aus dem schlaun Büro: Richard Uhlmann, Hendrik Abel, Kilian Dettlaff, Christopher Braunholz und Kai Bongert. Es war eine tolle Zeit mit euch. Bei Andreas Wagner bedanke ich mich für das entgegengebrachte Vertrauen und die Ermöglichung dieser Arbeit.

Zum Gelingen der Arbeit haben auch die Kollegen vom Lehrstuhl, insbesondere Jens Neubeck, Werner Krantz und Minh-Tri Nguyen beigetragen. Danke für die Unterstützung.

And then there is CRUDEN. It was a pleasure working with you. Many thanks to Maarten, Nico, Edwin, Jelle, Martijn and the rest of team Amsterdam.

Zuletzt bedanke ich mich auch bei meiner Familie, meinen Freunden und meiner Anna. Danke für Rücksichtnahme, Ablenkung, Ermunterung und Anerkennung. All die kleinen Dinge machen es viel leichter und können nicht genug honoriert werden.

Willibald Brems

# Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	V
Abbildungsverzeichnis.....	XI
Tabellenverzeichnis .....	XV
Abkürzungen und Formelzeichen .....	XVII
Zusammenfassung.....	XXI
Abstract .....	XXV
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Aufbau der Arbeit .....	2
<b>2 Stand der Technik und Grundlagen .....</b>	<b>5</b>
2.1 Subjektive Querdynamikbeurteilung .....	5
2.2 Fahrsimulatoren .....	9
2.3 Verwendeter Fahrsimulator .....	15
2.4 Motion Cueing .....	19
<b>3 Querdynamikbewertung im Fahrsimulator .....</b>	<b>27</b>
3.1 Erweiterter Fahrer-Fahrzeug-Umwelt-Regelkreis .....	27
3.2 Identifikation, Bewertung und Verbesserung der Simulatordynamik.....	30
3.2.1 Dynamische Analyse des verwendeten Simulators und Bewertung der Ergebnisse.....	30
3.2.2 Minimierung der wahrnehmbaren Latenzen und Synchronisierung der Simulator-Subsysteme .....	35

3.3	Virtuelle Umwelt .....	42
3.3.1	Szenariomodellierung .....	42
3.3.2	Fahrbahnmodellierung .....	44
3.4	Virtuelles Fahrzeug.....	47
<b>4</b>	<b>Motion-Cueing-Algorithmen zur Querdyamikbewertung.....</b>	<b>51</b>
4.1	Dynamischer Arbeitsraum des verwendeten Simulators .....	51
4.2	Querdyamisches Skalierungs-Cueing .....	59
4.2.1	Bestimmung des Skalierungsfaktors für die Querbeschleunigung.....	59
4.2.2	Skalierungsfaktoren für Gieren und Wanken.....	63
4.3	Streckenbasiertes Vorpositionierungs-Cueing .....	66
4.3.1	Berechnung der Streckenkoordinaten aus den globalen Koordinaten.....	71
4.3.2	Definition der Look-Up-Tabellen für die Vorpositionierung .....	73
4.3.3	Offline Tuning und Abschätzung fehlender Cues.....	76
4.3.4	Berechnung von PVA-Signalen aus der Vorpositionierung .....	79
4.3.5	Vergleich des Vorpositionierungs-Cueings mit einem Classical-Washout-Algorithmus .....	81
4.3.6	Erweiterungen des Grundalgorithmus.....	89
<b>5</b>	<b>Anwendung des optimierten Fahrsimulators .....</b>	<b>93</b>
5.1	Bewertung von Reifeneigenschaften im Fahrsimulator .....	93
5.1.1	Einfluss der Schräglaufsteifigkeit auf die Querdyamikbewertung.....	94
5.1.2	Versuchsvorbereitung und Teilnehmer .....	97
5.1.3	Versuchsablauf.....	97
5.1.4	Ergebnisse .....	100



5.1.5	Diskussion der Ergebnisse .....	102
5.2	Achsentwicklung in der Konzeptphase.....	107
<b>6</b>	<b>Fazit und Ausblick.....</b>	<b>113</b>
	Literaturverzeichnis .....	115

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 2.1:</b>	Geschlossener Regelkreis aus Fahrer, Fahrzeug und Umwelt.....	6
<b>Abbildung 2.2:</b>	Einfacher Fahrsimulator mit Bildschirmen und Stuttgarter Fahrsimulator am IVK/FKFS.....	10
<b>Abbildung 2.3:</b>	Simulator mit Sitz als Mockup und Fahrsimulator mit Vollfahrzeug als Mockup .....	13
<b>Abbildung 2.4:</b>	Der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Fahrsimulator .....	16
<b>Abbildung 2.5:</b>	Schema des Classical-Washout-Algorithmus .....	20
<b>Abbildung 3.1:</b>	Um den Fahrsimulator erweiterter Fahrer-Fahrzeug-Umwelt-Regelkreis .....	28
<b>Abbildung 3.2:</b>	Schematische Darstellung des Simulators für die dynamische Systemanalyse.....	31
<b>Abbildung 3.3:</b>	Anregungssignal zur Bestimmung des Übertragungsverhaltens des Lenkungsaktuators.....	32
<b>Abbildung 3.4:</b>	Gemessenes Übertragungsverhalten des Force-Feedback Lenkrads .....	33
<b>Abbildung 3.5:</b>	Gemessenes Übertragungsverhalten des verwendeten Hexapods für alle sechs Freiheitsgrade ....	34
<b>Abbildung 3.6:</b>	Einfluss der Hexapodbewegung auf das Sichtfeld auf der Leinwand .....	37
<b>Abbildung 3.7:</b>	Prädiktionsmechanismen für das Hexapod-Tracking und zur Synchronisierung .....	38
<b>Abbildung 3.8:</b>	Schematische Darstellung der Prädiktionsmechanismen zum Erreichen minimaler Latenz.....	40
<b>Abbildung 3.9:</b>	Auf dem Lenkrad montierten Laserpointer zur Verifizierung der Latenzkompensation.....	41
<b>Abbildung 3.10:</b>	Autobahnsszenarien mit unterschiedlicher Bepflanzung am Straßenrand.....	44

<b>Abbildung 3.11:</b>	Bodenwellen nur durch Helligkeitsunterschiede in der Asphalt-Textur dargestellt .....	46
<b>Abbildung 4.1:</b>	Dynamischer Arbeitsraum und mit einem Serienfahrzeug erreichbare Querbeschleunigungen.....	52
<b>Abbildung 4.2:</b>	Anteilig als Querbeschleunigung und Normalbeschleunigung wahrgenommene Erdbeschleunigung .....	55
<b>Abbildung 4.3:</b>	Darstellung von Querdynamik als Kombination von translatorischer Querbewegung und Tilt-Bewegung.....	57
<b>Abbildung 4.4:</b>	Fahrzeugbewegung im Vergleich zur Manöverbreite für einen doppelten ISO-Spurwechsel .....	60
<b>Abbildung 4.5:</b>	Dynamischer Arbeitsraum im Vergleich zum Bewegungsraum auf einer 6,5 m breiten Straße .....	61
<b>Abbildung 4.6:</b>	Dynamischer Arbeitsraum im Vergleich zum Bewegungsraum auf einer 3-spurigen Autobahn.....	63
<b>Abbildung 4.7:</b>	Skalierungsfaktoren für Gieren und Wanken zur Bewertung des Fahrverhaltens identifiziert .....	65
<b>Abbildung 4.8:</b>	Gierwinkel eines Fahrzeugs im Vergleich zum Richtungswinkel der Strecke .....	67
<b>Abbildung 4.9:</b>	Schema des streckenbasierten Vorpositionierungs-Cueings für den Freiheitsgrad Gieren .....	70
<b>Abbildung 4.10:</b>	Teststrecke für die Beispielanwendung des streckenbasierten Vorpositionierungs-Cueings.....	71
<b>Abbildung 4.11:</b>	Straßenabschnitt mit globalem und lokalem koordinatensystem .....	72
<b>Abbildung 4.12:</b>	Vorpositionierung und erwartete Arbeitsraumnutzung des Hexapods für den Gierfreiheitsgrad.....	75
<b>Abbildung 4.13:</b>	Vergleich von zwei Vorpositionierungsfunktionen mit dem Richtungswinkel der Strecke .....	77
<b>Abbildung 4.14:</b>	Abschätzung von fehlenden Cues für zwei Vorpositionierungsfunktionen .....	78
<b>Abbildung 4.15:</b>	Gierwinkel von Fahrzeug und Bewegungsplattform mit zwei Motion-Cueing-Algorithmen .....	83

---

<b>Abbildung 4.16:</b>	Gierbeschleunigung des Fahrzeugs und der zwei Motion-Cueing-Algorithmen in einer Beispielkurve .....	85
<b>Abbildung 4.17:</b>	Detailvergleich der Gierbeschleunigung.....	86
<b>Abbildung 4.18:</b>	Vergleich der Vertikalposition des Fahrzeugs und des neuen Vorpositionierungs-Cueings.....	87
<b>Abbildung 4.19:</b>	Vergleich der PVA-Signale von Fahrzeug und zwei Motion-Cueing-Algorithmen für eine Bodenwelle .....	89
<b>Abbildung 4.20:</b>	Darstellung des um den dynamischen Skalierungsfaktor erweiterten Vorpositionierungs-Cueings.....	90
<b>Abbildung 4.21:</b>	Erweiterung des Vorpositionierungs-Cueings für stark überhöhte Kurven.....	91
<b>Abbildung 5.1:</b>	Einfluss der Schräglaufsteifigkeit auf den normierten Seitenkraftverlauf für drei Reifen.....	95
<b>Abbildung 5.2:</b>	Spreizung der Gierreaktion auf Lenkwinkleingabe in Abhängigkeit von der Schräglaufsteifigkeit .....	96
<b>Abbildung 5.3:</b>	Verschachtelte Staircase der Schräglaufsteifigkeiten mit dynamischer Referenz .....	99
<b>Abbildung 5.4:</b>	Modellierung der kumulativen Normalverteilung für einen Probanden.....	101
<b>Abbildung 5.5:</b>	Schwellwerte und Biaswerte der psychometrischen Funktionen für alle Teilnehmer der Studie .....	102
<b>Abbildung 5.6:</b>	Verbundenkerachse und Mehrlenkerachse .....	108

# Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 2.1:</b>	Translatorischer und rotatorischer Arbeitsraum des verwendeten Hexapods .....	17
<b>Tabelle 4.1:</b>	Skalierungsfaktoren für Querbewegung, Gieren und Wanken .....	64
<b>Tabelle 4.2:</b>	Filterkoeffizienten und Normalisierungsfaktoren für den verwendeten Savitzky-Golay-Filter .....	80
<b>Tabelle 4.3:</b>	Parameter des verwendeten Classical-Washout-Algorithmus für Gieren und Huben .....	82

# Abkürzungen und Formelzeichen

## Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$a$	$\text{m/s}^2$	Beschleunigung
$a_0$	$\text{m/s}^2$	Referenzbeschleunigung
$a_{nenn}$	$\text{m/s}^2$	Nennbeschleunigung
$a_y$	$\text{m/s}^2$	Querbeschleunigung
$a_{y,hex}$	$\text{m/s}^2$	maximale translatorische Querbeschleunigung
$a_{y,max}$	$\text{m/s}^2$	maximale Querbeschleunigung
$a_{y,tilt}$	$\text{m/s}^2$	maximale Querbeschleunigung durch Tilt
$a_z$	$\text{m/s}^2$	Normalbeschleunigung
$b$	m	Fahrbahnbreite
$c$	-	Filterkoeffizient
$c_\alpha$	$\text{N}^\circ$	Schräglaufsteifigkeit
$f$	1/s	Frequenz
$g$	$\text{m/s}^2$	Erdbeschleunigung
$H$	-	Übertragungsfunktion im Bildbereich
$h_b$	m	Höhenunterschied zwischen linkem und rechten Fahrbahnrand
$h_{basis}$	m	Basis-Vorpositionierungshöhe
$h_{gesamt}$	m	Gesamt-Vorpositionierungshöhe
$h_v$	m	fahrspurabhängige Vertikalposition
$i$	-	Laufvariable
$j$	-	Laufvariable
$k$	-	Filterordnung
$l$	-	Laufvariable
$m$	-	Fensterbreite
$n$	-	Normalisierungsfaktor
$p$	m	Position
$p_0$	m	Referenzposition
$p_{nenn}$	m	Nennverfahrweg
$p_p$	m	prädierte Position
$p_{y,max}$	m	maximaler Querweg

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$s$	1/s	Laplacevariable
$t$	s	Zeit
$t_p$	s	Prädiktionshorizont
$u$	m	1. Koordinate eines Fahrbahnkoordinatensystems
$v$	m/s	Geschwindigkeit
$v$	m	2. Koordinate eines Fahrbahnkoordinatensystems
$v_0$	m/s	Referenzgeschwindigkeit
$v_{nenn}$	m/s	Nenngeschwindigkeit
$w$	-	Welligkeit
$X$	-	Filtereingangsdaten
$x$	m	1. Achse eines kartesischen Koordinatensystems
$Y$	-	Savitzky-Golay-Filter
$y$	m	2. Achse eines kartesischen Koordinatensystems
$z$	m	3. Achse eines kartesischen Koordinatensystems
$\alpha$	°	Schräglaufwinkel
$\mu$	-	Mittelwert
$\Phi_d$	m <sup>3</sup>	spektrale Leistungsdichte
$\varphi$	°	1. Winkel in einem kartesischen Koordinatensystem
$\varphi$	°	Phasenwinkel
$\dot{\varphi}$	°/s	Winkelgeschwindigkeit im Koordinatensystem
$\dot{\varphi}_{sens}$	°/s	Wahrnehmungsschwelle für Drehraten
$\ddot{\varphi}_{sens}$	°/s <sup>2</sup>	Wahrnehmungsschwelle für Drehbeschleunigungen
$\psi$	°	3. Winkel in einem kartesischen Koordinatensystem
$\rho$	°	Querneigungswinkel der Straße
$\sigma$	-	Standardabweichung
$\theta$	°	2. Winkel in einem kartesischen Koordinatensystem
$\Omega$	1/m	wegabhängige Kreisfrequenz
$\Omega_0$	1/m	wegabhängige Bezugskreisfrequenz
$\omega$	1/s	Kreisfrequenz
$\omega_0$	1/s	Eckfrequenz