

Minh-Tri Nguyen

# Subjektive Wahrnehmung und Bewertung fahrbahninduzierter Gier- und Wankbewegungen im virtuellen Fahrversuch



Springer Vieweg

---

# **Wissenschaftliche Reihe**

# **Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart**

**Reihe herausgegeben von**

Michael Bargende, Stuttgart, Deutschland

Hans-Christian Reuss, Stuttgart, Deutschland

Jochen 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>

---

Minh-Tri Nguyen

# Subjektive Wahrnehmung und Bewertung fahrbahninduzierter Gier- und Wankbewegungen im virtuellen Fahrversuch

Minh-Tri Nguyen  
IVK, Fakultät 7  
Lehrstuhl für Kraftfahrwesen  
Universität Stuttgart  
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2020

D93

ISSN 2567-0042                    ISSN 2567-0352 (electronic)  
Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart  
ISBN 978-3-658-30220-7        ISBN 978-3-658-30221-4 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-30221-4>

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2020  
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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.  
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.

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**

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann für die Möglichkeit zur Bearbeitung des Themas sowie für die Betreuung und Durchsicht der Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Maier danke ich für die freundliche Übernahme des Mitberichts.

Auch möchte ich Herrn Dr.-Ing. Jens Neubeck meinen Dank aussprechen für die tolle Zeit am Lehrstuhl und die damit verbundenen Aufgaben, Verantwortungen und gesammelten Erfahrungen.

Besonders danken möchte ich Herrn Dr.-Ing. Werner Krantz, der mich während dieser Zeit stets unterstützt hat. In all diesen Jahren habe ich von seinen fachlichen Fähigkeiten profitieren können. Die lehrreiche und zugleich inspirierende Zusammenarbeit hat mich in vielerlei Hinsicht nachhaltig geprägt.

Ebenfalls möchte ich meinen Kolleginnen und Kollegen sowie Studentinnen und Studenten danken, die mich tatkräftig und vielfältig unterstützt haben. Ihr Einsatz bei der Vorbereitung sowie der Begleitung der Simulatorstudien und der Fahrversuche haben maßgeblich zum Gelingen beigetragen.

Mit Vergnügen werde ich mich an die Zeit mit all jenen erinnern, die mich auf diesem Weg begleitet haben. Für die unvergesslichen Momente bin ich von ganzem Herzen dankbar.

Ein ganz lieber Dank für den liebevollen Rückhalt gilt meiner Familie, der diese Arbeit gewidmet ist.

Minh-Tri Nguyen

# Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	V
Abbildungsverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis .....	XIII
Abkürzungsverzeichnis.....	XV
Symbole .....	XVII
Zusammenfassung.....	XXI
Abstract .....	XXV
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik .....</b>	<b>5</b>
2.1 Menschliche Wahrnehmung im Fahrsimulator .....	5
2.2 Fahreigenschaftsbewertung im virtuellen Fahrversuch.....	14
<b>3 Modellierung und Implementierung des virtuellen Fahrversuchs.....</b>	<b>21</b>
3.1 Modellierung des Fahrzeugmodells .....	22
3.2 Modellierung der aktiven Fahrdynamikregelsysteme .....	23
3.2.1 Konzept der Längs- und Querdynamikregelung .....	25
3.2.2 Konzept der aktiven Wankstabilisierung .....	32
3.2.3 Bestimmung der PID-Reglerparameter.....	45
3.3 Modellierung der fahrbahninduzierten Fahrzeugreaktion.....	49
3.3.1 Stochastische Modellierung der Fahrbahnoberfläche .....	50
3.3.2 Modellierung der Fahrzeugreaktion durch virtuelle Anregung.....	54

<b>4 Untersuchung der gekoppelten Gier- und Wankbewegung .....</b>	<b>59</b>
4.1 Wahrnehmungsschwellen der Gier- und Wankbewegung .....	60
4.1.1 Versuchsdurchführung .....	60
4.1.2 Auswertung der Wahrnehmungsschwellen .....	63
4.2 Bewertung der Gier- und Wankbewegung durch virtuelle Anregung .....	70
4.2.1 Variation des Amplitudenverhältnisses und der Phasenverschiebung .....	71
4.2.2 Versuchsdurchführung .....	74
4.2.3 Subjektive Bewertung der Anregungen .....	76
4.3 Optimierung der Gier- und Wankbewegung .....	86
4.3.1 Versuchsdurchführung .....	88
4.3.2 Auswertung und Diskussion .....	89
<b>5 Schlussfolgerung und Ausblick .....</b>	<b>93</b>
Literaturverzeichnis .....	95
Anhang .....	99
A1. Fragebogen zu den Wahrnehmungsschwellen der Gier- und Wankbewegung .....	99
A2. Fragebogen zur Bewertung der Gier- und Wankbewegung durch virtuelle Anregung .....	101

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1.1:</b>	Stuttgarter Fahrsimulator .....	3
<b>Abbildung 1.2:</b>	Bewegungssystem des Simulators .....	3
<b>Abbildung 2.1:</b>	Sichtfeld bei Geradeausfahrt auf einer zweispurigen Autobahn im Fahrsimulator [6].....	8
<b>Abbildung 2.2:</b>	Subjektivbewertungen mit dem Fahrsimulator in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses [23].....	14
<b>Abbildung 2.3:</b>	Grundlegende Fahrzeugbewegungen [28] .....	16
<b>Abbildung 3.1:</b>	Versuchsfahrzeug der oberen Mittelklasse .....	21
<b>Abbildung 3.2:</b>	Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis mit der Einbindung der aktiven Fahrdynamiksysteme für den virtuellen Fahrversuch des digitalen Prototyps im Fahrsimulator. ....	24
<b>Abbildung 3.3:</b>	Konzept der Torque-Vectoring Querdynamikregelung des fahrbahninduzierten Gierens durch Subtraktion der fahrerinduzierten Gierbewegung eines Einspurmodells.....	26
<b>Abbildung 3.4:</b>	Amplituden- und Phasengang zwischen Gierrate und Lenkradwinkel .....	29
<b>Abbildung 3.5:</b>	Konzept der Wankstabilisierung zur Regelung des fahrbahninduzierten Wankens.....	36
<b>Abbildung 3.6:</b>	Amplituden- und Phasengang zwischen Wankwinkel und Lenkradwinkel .....	38
<b>Abbildung 3.7:</b>	Straßenwankwinkel $\varphi_{st}$ .....	39
<b>Abbildung 3.8:</b>	Amplituden- und Phasengang zwischen Wankwinkel und Straßenwankwinkel bei einem RMS-Wert von $\varphi_{st}, RMS = 0,5^\circ$ .....	41
<b>Abbildung 3.9:</b>	Übertragungsverhalten und Kohärenz des Wankwinkels in Abhängigkeit des Straßenwankwinkels .....	43

<b>Abbildung 3.10:</b>	Übertragungsverhalten und Kohärenz der Wankrate in Abhängigkeit des Straßenwankwinkels .....	44
<b>Abbildung 3.11:</b>	Übertragungsverhalten und Kohärenz der Wankbeschleunigung in Abhängigkeit des Straßenwankwinkels .....	44
<b>Abbildung 3.12:</b>	Reglerparameter der PID-Gierratenregelung (oben) und der PID-Wankgeschwindigkeitsregelung (unten) ...	46
<b>Abbildung 3.13:</b>	Berechnung des Straßenwankwinkels $\varphi_{st}$ aus dem Fahrzeugwankwinkel $\varphi_{IMU}$ und dem relativen Wankwinkel zur Fahrbahn $\varphi_{Laser}$ .....	50
<b>Abbildung 3.14:</b>	Spektrale Leistungsdichten der stochastischen Straßenhöhe (oben) und des Straßenwankwinkels (unten) zur Erzeugung maskierender Fahrzeuggbewegungen .....	52
<b>Abbildung 3.15:</b>	Berechnung der Straßenhöhe der linken und rechten Spur durch die gemittelte Fahrzeugspur $s$ und der synthetisierten Straßenhöhe $zst$ .....	53
<b>Abbildung 3.16:</b>	Schematischer Fahrbahnabschnitt einer Synthesierung nach Vorgabe der spektralen Leistungsdichte von Straßenhöhe und Straßenwankwinkel.....	54
<b>Abbildung 3.17:</b>	Gemessene Wank- und Gierbeschleunigung des Fahrzeugaufbaus beim Befahren der Querfuge.....	55
<b>Abbildung 3.18:</b>	Simulierte Wank- und Gierbeschleunigung des Fahrzeugaufbaus durch virtuelle Wank- und Giermomente im CG angeregt .....	57
<b>Abbildung 4.1:</b>	Herangehensweise zur Untersuchung der gekoppelten Gier- und Wankbewegung im Fahrsimulator .....	59
<b>Abbildung 4.2:</b>	Zwei Gierbeschleunigungsimpulse mit unterschiedlicher Skalierung maskiert durch die stochastische Straßenanregung .....	63
<b>Abbildung 4.3:</b>	Bereich des Vertikalbeschleunigungsverlaufs zur Berechnung des RMS-Werts $az, RMS$ .....	64

<b>Abbildung 4.4:</b>	Wahrnehmungsschwelle der Gierbewegung in Abhängigkeit der stochastischen Fahrbahnanregung.....	65
<b>Abbildung 4.5:</b>	Wahrnehmungsschwelle der Wankbewegung in Abhängigkeit der stochastischen Straenanregung.....	65
<b>Abbildung 4.6:</b>	Wankimpulse in Abhängigkeit der stationären Querbeschleunigung bei einer stochastischen Straenanregung von 25 % .....	68
<b>Abbildung 4.7:</b>	Zwei Fahrzeugreaktionen hervorgerufen durch die Variation des Amplitudenverhältnisses der Anregung um $\pm 30\%$ relativ zur Basisanregung .....	72
<b>Abbildung 4.8:</b>	Zwei Fahrzeugreaktionen hervorgerufen durch die Phasenverschiebung zwischen der Gier- und Wankmomentanregung um $\pm 100\text{ ms}$ .....	73
<b>Abbildung 4.9:</b>	Subjektivbewertung und Standardabweichung der Probanden bezüglich der Impulsvarianten ( <i>nimp</i> : Anzahl der Impulse) des Amplitudenverhältnisses.....	77
<b>Abbildung 4.10:</b>	Korrelation zwischen der Impulsbewertung der Amplitudenvariation und des objektiven Kriteriums $OC_{amp}$ .....	81
<b>Abbildung 4.11:</b>	Subjektivbewertung und Standardabweichung der Probanden bezüglich der Impulsvarianten der Phasenverschiebung .....	83
<b>Abbildung 4.12:</b>	Korrelation zwischen der Impulsbewertung der Phasenverschiebung und des objektiven Kriteriums $OC_{delay}$ .....	85
<b>Abbildung 4.13:</b>	RMS-Werte der Fahrzeugaufbaureaktionen und gemittelter RMS-Gesamtwert der vier getesteten Reglerkonfigurationen .....	90

# Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 2.1:</b>	Zuordnung der Fahrinformationen und Sinneskanäle des Menschen beim Fahren [1] [2] [3] [4] [5].....	6
<b>Tabelle 2.2:</b>	Übersicht verschiedener Wahrnehmungsschwellen für translatorische und rotatorische Beschleunigungen .....	11
<b>Tabelle 3.1:</b>	Parametrisierung des erweiterten Einspurmodells zur Bestimmung der fahrerinduzierten Gierbewegung .....	28
<b>Tabelle 3.2:</b>	Parametrisierung des erweiterten Einspurmodells zur Bestimmung der fahrerinduzierten Wankbewegung.....	37
<b>Tabelle 3.3:</b>	Übersicht der Pareto-Minima (fett) und Pareto-Maxima (unterstrichen) sowie der optimierten Parametersätze $K_p$ -, $K_i$ -, und $K_d$ für die Gier- und Wankregelung .....	48
<b>Tabelle 3.4:</b>	Optimierten Reglerparameter der Gierraten- und Wankgeschwindigkeitsregelung .....	49
<b>Tabelle 4.1:</b>	Versuchsparameter für die Ermittlung der Wahrnehmungsschwellen .....	61
<b>Tabelle 4.2:</b>	Übersicht der Anregungsvarianten zur Untersuchung der Gier-Wank-Kopplung im Fahrsimulator.....	74
<b>Tabelle 4.3:</b>	Überblick der Reglerkonfigurationen .....	87
<b>Tabelle 4.4:</b>	Subjektive Bewertung der Reglerkonfigurationen.....	89

# Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	Analysis of variance, englischer Begriff für eine Methode der Varianzanalyse
CG	Center of gravity, englischer Begriff für den Fahrzeugschwerpunkt
DGL	Differentialgleichung
ESTM	Enhanced single track model, englischer Begriff für das erweiterte Einspurmodell
FFT	Fast Fourier Transformation
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart
Fzg	Kraftfahrzeug
GGW	Gleichgewicht im Zusammenhang mit dem Gleichgewichtsorgan bzw. Vestibularorgan
HA	Hinterachse
hl	hinten links
hr	hinten rechts
IMU	Inertial measurement unit, englischer Begriff für inertiale Messeinheit
IVK	Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen
KNC	Kinematic and compliance, englischer Begriff für Kinematik und Elastokinematik
li	links
LTI	Linear time-invariant system, englischer Begriff für ein lineares zeitinvariantes System
MF	Reifenmodell nach H. B. Pacejka
MSE	Mittlere quadratische Abweichung, Mean Square Error, englischer Begriff für die mittlere quadratische Abweichung
PID	Regler bestehend aus einem Proportional-, Integral und Differentialanteil
PSD	Power Spectral Density, englischer Begriff für die spektrale Leistungsdichte
PT1	Übertragungsglied mit proportionalem Verhalten 1. Ordnung