

Wissenschaftliche Reihe  
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

RESEARCH

Jürgen-Oliver Pitz

# Vorausschauender Motion-Cueing- Algorithmus für den Stuttgarter Fahrsimulator



---

# **Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart**

## **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.

**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

---

Jürgen-Oliver Pitz

Vorausschauender  
Motion-Cueing-  
Algorithmus  
für den Stuttgarter  
Fahrsimulator

 Springer Vieweg

Jürgen-Oliver Pitz  
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2016

D93

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart  
ISBN 978-3-658-17032-5 ISBN 978-3-658-17033-2 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-658-17033-2

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

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) der Universität Stuttgart und dem Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS).

Besonders danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss für das Ermöglichen dieser Dissertation und seine Förderung der Arbeit. Prof. Dr.-Ing. Klaus Dietmayer danke ich für die Übernahme des Mitberichtes.

Meinen Kolleginnen und Kollegen der beiden Institute IVK und FKFS danke ich für das angenehme Arbeitsklima und die hervorragende Zusammenarbeit, besonders Herrn Dr.-Ing. Gerd Baumann, Leiter des Bereiches Kraftfahrzeugmechatronik und Software, für das Schaffen von Freiräumen und seine Unterstützung.

Des Weiteren bedanke ich mich bei meinen Kollegen, die ebenfalls am Fahr-simulator tätig sind und waren, für die zahlreichen fachlichen oder weniger fachlichen Gespräche. Ohne deren Einsatz wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie bedanken. Vor allem danke ich meiner Lebensgefährtin Isabel Dolderer für den ständigen Rückhalt und die grenzenlose Geduld während der Erstellung dieser Arbeit.

Jürgen-Oliver Pitz

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	V
Nomenklatur.....	XI
Abbildungsverzeichnis.....	XV
Tabellenverzeichnis .....	XIX
Kurzfassung .....	XXI
Abstract.....	XXIII

## **1 Einleitung .....** **1**

1.1 Motivation.....	3
1.2 Aufbau der Arbeit .....	4

## **2 Stand der Technik und Grundlagen .....** **7**

2.1 Fahrsimulatoren .....	7
2.1.1 Entwicklung dynamischer Simulatoren .....	7
2.1.2 Bauformen und Beispiele.....	9
2.1.3 Der Stuttgarter Fahrsimulator .....	11
2.2 Fahrzeugsimulation.....	13
2.2.1 Einsatz im Simulator .....	14
2.2.2 Simulation in Echtzeit.....	15
2.3 Bewegungswahrnehmung .....	16
2.3.1 Das Gleichgewichtsorgan .....	18
2.3.2 Simulatorkrankheit.....	20
2.3.3 Wahrnehmungsschwellen .....	21

2.4	Grundlagen des Motion Cueing .....	22
2.4.1	Begriffserklärung „Motion Cue“ .....	22
2.4.2	Einteilung der Motion Cues .....	22
2.4.3	Fehlende und falsche Motion Cues .....	23
2.4.4	Washout .....	24
2.4.5	Tilt Coordination .....	24
2.5	Regelungstechnische Grundlagen .....	25
2.5.1	Betrachtungen im Frequenzbereich .....	25
2.5.2	Filter .....	27
2.6	Koordinatensysteme .....	30
2.7	Klassische Motion-Cueing-Algorithmen .....	34
2.7.1	Der Classical-Washout-Algorithmus .....	34
2.7.2	Weitere klassische Algorithmen .....	37
2.7.3	Weiterführende Ansätze .....	39
<b>3</b>	<b>Zielvorgaben und Anforderungen an die Bewegungssimulation .....</b>	<b>41</b>
3.1	Anwendungsfälle .....	41
3.1.1	Bewertung von Fahrzeugverhalten und Fahrzeugentwicklung .....	42
3.1.2	Bewertung von Fahrerverhalten und Interaktion .....	43
3.2	Einteilung der Zielvorgaben zur Lösung von Zielkonflikten .....	44
<b>4</b>	<b>Analyse und Optimierung der Bewegungsplattform .....</b>	<b>47</b>
4.1	Optimierung der Systemdynamik .....	47
4.1.1	Verfahren zur Bestimmung des Übertragungsverhaltens .....	48



---

4.1.2	Einzelne Freiheitsgrade .....	55
4.1.3	Mechanisch gekoppelte Freiheitsgrade .....	58
4.1.4	Erzieltes Übertragungsverhalten .....	62
4.2	Optimierung des Bewegungsraumes.....	69
<b>5</b>	<b>Vorausschauender Motion-Cueing-Algorithmus .....</b>	<b>73</b>
5.1	Verfügbare Daten und Potenziale durch deren Nutzung.....	73
5.1.1	Fahrzeugzustand und Fahrereingaben.....	75
5.1.2	Position und Lage des Fahrzeuges in seiner direkten Umgebung.....	76
5.1.3	Aktuelle und zukünftige Streckenattribute.....	76
5.1.4	Verwendete Eingänge für den Motion-Cueing- Algorithmus .....	78
5.2	Struktur des prädiktiven Algorithmus.....	79
5.3	Elemente zur Bewegungssimulation .....	81
5.3.1	Gieren.....	82
5.3.2	Längsdynamik.....	84
5.3.3	Querdynamik.....	92
5.3.4	Roll-, Nick- und Vertikalbewegungen .....	95
5.4	Vorausschau und Situationsanalyse .....	96
5.5	Randbedingungen .....	98
5.5.1	Vorausschauhorizont.....	98
5.5.2	Streckenerstellung.....	99
5.5.3	Parametrierung.....	100
5.6	Struktur des gesamten Algorithmus zur Simulatorsteuerung.....	101

- 6 Analyse des vorausschauenden Motion-Cueing-Algorithmus ..... 103**
  - 6.1 Studienlayout ..... 104
    - 6.1.1 Probandenauswahl ..... 104
    - 6.1.2 Fahraufgabe..... 106
    - 6.1.3 Streckenbeschaffenheit ..... 108
    - 6.1.4 Befragung und Datenerhebung ..... 110
  - 6.2 Referenzalgorithmus ..... 111
  - 6.3 Auswertung und Ergebnisse ..... 113
    - 6.3.1 Objektive Kriterien ..... 114
    - 6.3.2 Subjektive Kriterien ..... 123
  - 6.4 Bewertung der Analyse..... 126
  
- 7 Zusammenfassung und Ausblick ..... 129**
  
- Literaturverzeichnis..... 133**
  
- Anhang ..... 149**

# Nomenklatur

## Abkürzungen

CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
DLR	<i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.</i>
FF	<i>Feed Forward (Vorsteuerung bzw. Vorfilter)</i>
FKFS	<i>Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart</i>
HMI	<i>Human-Machine Interface</i>
HP	<i>Hochpassfilter</i>
IMU	<i>Inertial-Measurement-Unit</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IVK	<i>Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart</i>
LKW	<i>Lastkraftwagen</i>
MCA	<i>Motion-Cueing-Algorithmus</i>
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PKW	<i>Personenkraftwagen</i>
SSQ	<i>Simulator Sickness Questionnaire</i>
TP	<i>Tiefpassfilter</i>
VTI	<i>Swedish National Road and Transport Research Institute</i>

## Formelzeichen

$a(t)$	<i>Beschleunigung /<math>(m/s^2)</math></i>
$\bar{a}$	<i>Mittelwert der Beschleunigung /<math>(m/s^2)</math></i>
$D$	<i>Dämpfungsmaß</i>
$D(s)$	<i>Position/Weg im Bildbereich</i>
$d(t)$	<i>Position/Weg /m</i>
$\bar{d}$	<i>Differenzenmittelwert</i>
$e$	<i>Fehler</i>
$F(s)$	<i>Signal im Bildbereich</i>

$f$	<i>Frequenz / (1/s)</i>
$f(t)$	<i>Signal im Zeitbereich</i>
$G(s)$	<i>Übertragungsfunktion im Bildbereich</i>
$g(t)$	<i>Übertragungsfunktion im Zeitbereich</i>
$i$	<i>Index</i>
$k$	<i>Verstärkungsfaktor</i>
$L$	<i>Allgemeine Koordinatentransformation</i>
$N$	<i>Anzahl der Messwerte</i>
$N_{\text{Prob.}}$	<i>Anzahl der Probanden</i>
$P_1, P_2$	<i>Parameter</i>
$R$	<i>Kurvenradius /m</i>
$r$	<i>Korrelationskoeffizient</i>
$r_{TC}$	<i>Verhältnis der Anteile der Beschleunigung, welche durch die Tilt Coordination dargestellt werden, zur Gesamtbeschleunigung</i>
$rmsd$	<i>Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung</i>
$S$	<i>Streckenattribut</i>
$s$	<i>Laplace-Variable</i>
$S_{\text{Strecke}}$	<i>Streckenordinate /m</i>
$S_d$	<i>Standardabweichung</i>
$T$	<i>Messzeit /s</i>
$T_1, T_2$	<i>Filterkonstanten</i>
$t$	<i>Zeit /s</i>
$t_{\text{Test}}$	<i>Prüfgröße t-Test</i>
$U(s)$	<i>Eingangssignal/Führungsgröße im Bildbereich</i>
$u(t)$	<i>Eingangssignal/Führungsgröße im Zeitbereich</i>
$v(t)$	<i>Geschwindigkeit / (m/s)</i>
$x, y, z$	<i>Wegkoordinaten /m</i>
$\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$	<i>Geschwindigkeiten im Koordinatensystem / (m/s)</i>
$\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$	<i>Beschleunigungen im Koordinatensystem / (m/s<sup>2</sup>)</i>
$Y(s)$	<i>Ausgangssignal im Bildbereich</i>
$y(t)$	<i>Ausgangssignal im Zeitbereich</i>

$\alpha$	Signifikanzniveau
$\underline{\beta}$	Orientierung des Hexapods (Vektor) /([rad rad rad] <sup>T</sup> )
$\tau$	Zeitliche Verschiebung /s
$\varphi, \theta, \psi$	Orientierung/Winkel im Koordinatensystem /rad
$\dot{\varphi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$	Drehraten im Koordinatensystem /(rad/s)
$\ddot{\varphi}, \ddot{\theta}, \ddot{\psi}$	Drehbeschleunigungen im Koordinatensystem /(rad/s <sup>2</sup> )
$\omega_0$	Grenzfrequenz /(rad/s)

## Indizes

Bew.raum	Signal zum Abbremsen der Bewegungsplattform, um den Bewegungsraum einzuhalten
Fahrer	Fahrerkopf
Frzg.	Fahrzeug
FF	Feed Forward (Vorsteuerung bzw. Vorfilter)
filt	Gefilterte Größen
Hex.	Hexapod
Interp.	Interpolierte Größen
ist	Ist-Signal (Ausgangs- oder Messgröße)
Rest	Übriger Signalanteil zur weiteren Verwendung
Sim.	Simulator
soll	Soll-Signal (Eingangsgröße)
Spur	Position des Fahrzeuges bezogen zur Mitte der Fahrspur
stat.	Stationäre Größen
Straße	Straße/Strecke
tilt	Signalanteil der Tilt Coordination
Vorpos.	Vorpositionierung (Soll-Position)
Washout	Signal zum Zurückfahren der Bewegungsplattform in die Ausgangsposition
XY	Schlittensystem
I	Inertialkoordinaten

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 2.1:</b>	Außen- und Innenansicht des Stuttgarter Fahrsimulators.....	11
<b>Abbildung 2.2:</b>	Wirkkette der menschlichen Informationsverarbeitung.....	16
<b>Abbildung 2.3:</b>	Sensorische Systeme zur Wahrnehmung und Verarbeitung .....	17
<b>Abbildung 2.4:</b>	Übersicht über das Hör- und Gleichgewichtsorgan .....	18
<b>Abbildung 2.5:</b>	Sensierung von linearen Bewegungen .....	19
<b>Abbildung 2.6:</b>	Sensierung von rotatorischen Bewegungen .....	20
<b>Abbildung 2.7:</b>	Blockschaltbild eines linearen Übertragungsgliedes.....	26
<b>Abbildung 2.8:</b>	Hochpassfilter mit zweimaliger Integration.....	29
<b>Abbildung 2.9:</b>	Koordinatensysteme im Fahrzeug.....	31
<b>Abbildung 2.10:</b>	Koordinatensystem des Schlittensystems .....	32
<b>Abbildung 2.11:</b>	Koordinatensystem des Hexapods .....	33
<b>Abbildung 2.12:</b>	Struktur des Classical-Washout-Algorithmus.....	35
<b>Abbildung 3.1:</b>	Zielkonflikt aus der Anforderungsanalyse .....	46
<b>Abbildung 4.1:</b>	Wirkketten bei realer und simulierter Fahrt .....	47
<b>Abbildung 4.2:</b>	Kommunikation zwischen den Simulationsrechnern und Elemente der Software des Bewegungssystems.....	49
<b>Abbildung 4.3:</b>	Messtechnische Erfassung des Übertragungsverhaltens .....	51
<b>Abbildung 4.4:</b>	Signal zur Ansteuerung eines rotatorischen Freiheitsgrades .....	53
<b>Abbildung 4.5:</b>	Detailansicht des Signales zur Ansteuerung eines rotatorischen Freiheitsgrades .....	53
<b>Abbildung 4.6:</b>	Bodediagramm der lateralen Hexapodbewegung .....	56

<b>Abbildung 4.7:</b>	Bodediagramm der rotatorischen Hexapodbewegungen .....	57
<b>Abbildung 4.8:</b>	Kopplung der lateralen Freiheitsgrade .....	59
<b>Abbildung 4.9:</b>	Gesamtmodell Schlittensystem .....	61
<b>Abbildung 4.10:</b>	Bodediagramm der gemessenen und simulierten Schlittenbewegungen .....	61
<b>Abbildung 4.11:</b>	Bodediagramm der longitudinalen Hexapodbewegung.....	62
<b>Abbildung 4.12:</b>	Bodediagramm der optimierten lateralen Hexapodbewegung.....	63
<b>Abbildung 4.13:</b>	Bodediagramm der kombinierten longitudinalen Simulatorbewegung .....	63
<b>Abbildung 4.14:</b>	Bodediagramm der kombinierten lateralen Simulatorbewegung .....	64
<b>Abbildung 4.15:</b>	Bodediagramm der vertikalen Hexapodbewegung .....	64
<b>Abbildung 4.16:</b>	Bodediagramm der optimierten Rollbewegung des Hexapods.....	65
<b>Abbildung 4.17:</b>	Bodediagramm der optimierten Nickbewegung des Hexapods.....	65
<b>Abbildung 4.18:</b>	Bodediagramm der Gierbewegung des Hexapods .....	66
<b>Abbildung 4.19:</b>	Bodediagramm der kombinierten lateralen Simulatorbewegung .....	67
<b>Abbildung 4.20:</b>	Bodediagramm der Rollrate des Hexapods.....	67
<b>Abbildung 4.21:</b>	Bodediagramm der Gierrate des Hexapods.....	68
<b>Abbildung 4.22:</b>	Drehung des Hexapods zur Tilt Coordination.....	70
<b>Abbildung 5.1:</b>	Attribute entlang eines beispielhaften Steckenverlaufes .....	77
<b>Abbildung 5.2:</b>	Struktur und Signalflüsse des Algorithmus.....	81
<b>Abbildung 5.3:</b>	PD-Regler zur Kontrolle des Bewegungssystems.....	86

---

<b>Abbildung 5.4:</b>	Algorithmus zur Simulatorlängsführung.....	88
<b>Abbildung 5.5:</b>	Trajektorien zur Manipulation des Reglerausganges .....	90
<b>Abbildung 5.6:</b>	Verwendung der Tilt Coordination .....	90
<b>Abbildung 5.7:</b>	Bremsmanöver mit unterschiedlicher Verzögerung.....	91
<b>Abbildung 5.8:</b>	Algorithmus zur Bewegungssimulation der Fahrzeugquerbeschleunigung.....	93
<b>Abbildung 5.9:</b>	Übersicht über die gesamte Ansteuerung des Bewegungssystems .....	102
<b>Abbildung 6.1:</b>	Probandenverteilung nach Personengruppen .....	106
<b>Abbildung 6.2:</b>	Schematische Ansicht des Rundkurses .....	109
<b>Abbildung 6.3:</b>	Anhaltevorgänge mit dem Classical-Washout- Algorithmus .....	113
<b>Abbildung 6.4:</b>	Korrelationskoeffizienten der Querbeschleunigung.....	116
<b>Abbildung 6.5:</b>	Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung der Querbeschleunigung.....	118
<b>Abbildung 6.6:</b>	Vergleich der Algorithmen bei einem Bremsvorgang ..	119
<b>Abbildung 6.7:</b>	Verhältnisse der durch Rotation dargestellten Beschleunigungsanteile.....	120
<b>Abbildung 6.8:</b>	Kurvenfahrten bei 50 km/h (links) und 70 km/h (rechts) .....	122
<b>Abbildung 6.9:</b>	Kurvenfahrt bei 100 km/h (links) und Spurwechselmanöver (rechts).....	123
<b>Abbildung 6.10:</b>	Ergebnisse der Auswertung des SSQ.....	126
<b>Abbildung A.1:</b>	Interpolation im Zeitbereich.....	152
<b>Abbildung A.2:</b>	Fragebogen.....	153
<b>Abbildung A.3:</b>	Ergebnisse der Auswertung des SSQ nach demografischen Kriterien.....	154



# Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 2.1:</b>	Statische und dynamische Grenzen des Bewegungssystems .....	13
<b>Tabelle 2.2:</b>	Konvergenzverhalten von Hochpassfiltern bis zur dritten Ordnung .....	29
<b>Tabelle 4.1:</b>	Bewegungsraum bei Rotation um den Fahrerkopf.....	71
<b>Tabelle 5.1:</b>	Eingangssignale des prädiktiven Algorithmus und deren Verwendung .....	79
<b>Tabelle 6.1:</b>	Altersklassen .....	105

# Kurzfassung

Fahrsimulatoren werden zunehmend bei der Entwicklung von Fahrzeugkomponenten und Assistenzfunktionen eingesetzt. Um Rückschlüsse aus den Untersuchungen in der virtuellen Umgebung für das reale Verhalten ziehen zu können, muss dem Fahrer im Simulator ein möglichst realistischer Fahreindruck geboten werden. An die Nachbildung sämtlicher Informationen werden hohe Anforderungen gestellt. Auch die Reproduktion der Fahrzeugbewegungen und auftretenden Beschleunigungen muss möglichst realitätsnah erfolgen.

Aktuelle Assistenzfunktionen nutzen in einem zunehmenden Maß Informationen aus der Umgebung des Fahrzeuges. Dies sind neben Daten, die über Sensoren erfasst werden, auch Informationen aus digitalen Karten. Algorithmen zur Bewegungssimulation eines Fahrsimulators nutzen häufig die Fahrzeugzustände und nur einzelne Informationen aus der Umgebung. Diese Arbeit hat das Ziel, die Bewegungssimulation durch die Auswertung mehrerer Umgebungsinformationen zu verbessern. Dabei werden, analog zu Assistenzfunktionen, sowohl aktuelle, als auch Informationen über die vorausliegende Strecke verwendet. Aufgrund dieser werden zukünftige Fahrsituationen erkannt und die Simulatorsteuerung entsprechend optimiert.

Neben der Vorstellung des Algorithmus wird auf die Simulationsumgebung sowie auf die Zusammenhänge mit der Dynamik des Bewegungssystems eingegangen. Abgeleitet aus unterschiedlichen Anwendungsfeldern wird der Algorithmus in einer repräsentativen Studie anhand verschiedener Fahrsituationen validiert. Als Referenz wird der Classical-Washout-Algorithmus herangezogen.

Mit dem steigenden Automatisierungsgrad der Fahrzeugführung nehmen auch die Simulatorexperimente mit solchen Funktionen zu. Die vorliegende Arbeit liefert einen Ansatz für einen Algorithmus zur Bewegungssimulation, mit dem die Darstellung der Fahrzeugbewegungen bei solchen Untersuchungen optimiert und somit die Ergebnisse der Studien verbessert werden können.