



Meike Ottensmeier (Autor)
**Motion Cueing und Motion Control für einen
selbstfahrenden Fahrsimulator**

Schriftenreihe des Lehrstuhls Kraftfahrzeugtechnik

Herausgeber Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop

Band 26



Meike Ottensmeier

*Motion Cueing und
Motion Control* für
einen selbstfahrenden
Fahrsimulator



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8981>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

Abkürzungsverzeichnis	i
Formelzeichen- und Symbolverzeichnis	v
1. Einleitung	1
1.1. Motivation und Zielsetzung der Arbeit	3
1.2. Strukturierung der Arbeit	4
2. Stand der Technik	7
2.1. Fahr simulatoren	9
2.1.1. Grundlagen der Fahr simulation	9
2.1.2. Klassifizierung von Fahr simulatoren	10
2.1.3. Entwicklung dynamischer Fahr simulatoren	11
2.1.4. Selbst fahrende Fahr simulatoren	13
2.1.5. Zusammenfassung	15
2.2. Integrierte Fahr dynamik regelung	17
2.2.1. Grundlagen der integrierten Fahr dynamik regelung	17
2.2.2. Klassifizierung der integrierten Fahr dynamik regelung	19
2.2.3. Ansätze der <i>Control Allocation</i>	19
2.2.4. Ansätze der kaskadierten Regelung der Horizontaldynamik	21
2.2.5. Zusammenfassung	21
2.3. Radbasierte, mobile Roboter	22
2.3.1. Grundlagen radbasierter, mobiler Roboter	22
2.3.2. Bewegungs- und Bahnplanung	24
2.3.3. Trajektorienfolgeregelung	25
2.3.4. Zusammenfassung	26
2.4. Identifizierung der Forschungslücken und Forschungsfragen	27
2.4.1. Diskussion zu Fahr simulatoren	27
2.4.2. Diskussion zur integrierten Fahr dynamik regelung	27
2.4.3. Diskussion zu radbasierten, selbst fahrenden Robotern	28
2.4.4. Formulierung und Einordnung der Forschungsfragen	28
3. Thematische und methodische Grundlagen	31
3.1. Grundlagen der menschlichen Wahrnehmung	33
3.1.1. Grundlegende Wahrnehmungssysteme	33
3.1.2. Wahrnehmungsschwellen	34
3.2. Modellierung der Vestibularorgane	36
3.2.1. Modellierung der Bogengänge	36
3.2.2. Modellierung der Otolithen	36
3.3. Grundlagen des <i>Motion Cueing</i>	37
3.3.1. Grundbegriffe der <i>Cues</i>	37
3.3.2. Formen der Kinetose	38
3.3.3. Grundlegende Techniken des <i>Motion Cueing</i>	38
3.4. <i>Motion Cueing</i> Algorithmen	40
3.4.1. <i>Classical Washout</i> Algorithmus	41
3.4.2. Frequenzlücke der Beschleunigungsgenerierung	42

3.5. Zusammenfassung	43
4. Anforderungsanalyse und Restriktionen	45
4.1. Allgemeine Anforderungen aus der Fahrsimulation	47
4.1.1. Analyse und Definition grundlegender Fahrprofile	47
4.1.2. Fahrerwahrnehmung	49
4.2. Systemspezifikationen und Betriebsbedingungen	50
4.2.1. Allgemeine Systemspezifikationen	50
4.2.2. Analyse der Betriebsbedingungen	51
4.3. Gesamtstruktur der Ansteuerung	52
4.4. Zusammenfassung	53
5. Modellbildung von Gesamt- und Teilsystemen	55
5.1. Kinematik des Simulators	57
5.1.1. Inverse Kinematik des Hexapods	57
5.1.2. Kinematik des Gesamtsystems in zehn Fhg	59
5.2. Modellierung des Reifens	61
5.2.1. Stationäre Längs- und Querkraft des HSRI-Reifenmodells	61
5.2.2. Dynamische Längs- und Querkräfte	63
5.2.3. Kennlinien-Generierung zur Parametrierung	63
5.3. Bewegungsplattform als nichtlineares Zweispurmodell	66
5.3.1. Rad-Fahrzeug-Kopplung	66
5.3.2. Horizontale Aufbaudynamik	68
5.3.3. Dynamische Radlasten	70
5.4. Verifizierung der Modellierungen	72
5.4.1. MKS-Modell des Simulators	72
5.4.2. Zweispurmodell mit reiner Längsdynamik - Manöver 1	73
5.4.3. Zweispurmodell mit zusätzlicher Querdynamik - Manöver 2	75
5.4.4. Zweispurmodell mit reiner Rotation - Manöver 3	77
5.4.5. Fazit	78
5.5. Zusammenfassung	79
6. Entwicklung des <i>Motion Cueing</i> Algorithmus	81
6.1. Gesamtstruktur des <i>Motion Cueing</i> Algorithmus	83
6.2. Vorverarbeitung	84
6.3. MCA-Anteil des Hexapods	85
6.3.1. Teil-inverse serielle Kinematik	86
6.3.2. Translatorischer <i>Washout</i>	87
6.3.3. Rotatorischer <i>Washout</i>	89
6.3.4. <i>Tilt Coordination</i>	90
6.4. MCA-Anteil des Giergelenks	93
6.5. MCA-Anteil der Bewegungsplattform	96
6.5.1. Führungsfilter	97
6.5.2. <i>Washout</i> -Regelung	98
6.5.3. Rotationskonzept	102
6.5.4. Singularitäten-Vermeidung	104

6.5.5. Sicherheitskonzept	109
6.6. Zusammenfassung	111
7. Entwicklung der Motion Control	113
7.1. Motion Control des Hexapod-Giersystems	115
7.1.1. Inverse Kinematik des Hexapods	115
7.1.2. Trajektoriengenerator des Hexapods	116
7.1.3. Giergelenk	118
7.2. Motion Control der Bewegungsplattform - Gesamtstruktur	118
7.3. Generierung der Bezugsgrößen	119
7.3.1. Vorsteuerung	120
7.3.2. Referenztrajektoriengenerator	120
7.4. Control Allocation	122
7.4.1. Skalierung der Radkraftpotentiale	122
7.4.2. Begrenzung der Aufbaukräfte	123
7.4.3. Optimale Grundverteilung der Radkräfte	124
7.4.4. Neukonfiguration der Kraftverteilung	125
7.5. Einzelradregelung	126
7.5.1. Exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung	127
7.5.2. Lenkungs-Sonderregelung	133
7.5.3. Umschaltung der Lenkungsregelung	133
7.6. Kompensationsregelung	134
7.7. Zusammenfassung	137
8. Parametrierung und Validierung der Ansteuerung	139
8.1. Voruntersuchung und Parametrierung des Motion Cueing Algorithmus	141
8.1.1. Fokus Hexapod und Fahrerwahrnehmung im teildynamischen Betrieb	141
8.1.2. Fokus Bewegungsplattform	145
8.1.3. Fokus Giergelenk	151
8.1.4. Fokus Hexapod und Fahrerwahrnehmung im hochdynamischen Betrieb	153
8.1.5. Fazit	154
8.2. Voruntersuchung und Parametrierung der Motion Control	154
8.2.1. Vorsteuerung	155
8.2.2. Control Allocation	157
8.2.3. Einzelradregelung	159
8.2.4. Kompensationsregelung	162
8.2.5. Fazit	165
8.3. Untersuchung der Gesamtansteuerung am MKS-Modell	165
8.3.1. Teildynamischer Betrieb des MKS-Modells	166
8.3.2. Hochdynamischer Betrieb des MKS-Modells	170
8.3.3. Fazit	176
8.4. Diskussion der Forschungsfragen	177
9. Zusammenfassung und Ausblick	179
9.1. Zusammenfassung	181
9.2. Empfehlungen für weiterführende Arbeiten	183