

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>i</b>
<b>Formelzeichen- und Symbolverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation und Zielsetzung der Arbeit . . . . .	3
1.2. Strukturierung der Arbeit . . . . .	4
<b>2. Stand der Technik</b>	<b>7</b>
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
<b>3. Thematische und methodische Grundlagen</b>	<b>31</b>
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
<b>4. Anforderungsanalyse und Restriktionen</b>	<b>45</b>
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
<b>5. Modellbildung von Gesamt- und Teilsystemen</b>	<b>55</b>
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
<b>6. Entwicklung des <i>Motion Cueing</i> Algorithmus</b>	<b>81</b>
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
<b>7. Entwicklung der Motion Control . . . . .</b>	<b>113</b>
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
<b>8. Parametrierung und Validierung der Ansteuerung . . . . .</b>	<b>139</b>
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
<b>9. Zusammenfassung und Ausblick . . . . .</b>	<b>179</b>
9.1. Zusammenfassung . . . . .	181
9.2. Empfehlungen für weiterführende Arbeiten . . . . .	183