

Dipl.-Ing. Karl-Josef Rieger, Munderkingen

# **Echtzeitsimulation komplexer Fahrzeugmodelle mit Hardware-Reglerkomponenten**

Reihe **12**: Verkehrstechnik/  
Fahrzeugtechnik

Nr. **307**

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>VERZEICHNIS WICHTIGER FORMELZEICHEN .....</b>	<b>VIII</b>
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation der Arbeit .....	1
1.2 Anforderungen an die Fahrzeugfederung .....	4
1.3 Klassifikation verschiedener Aufbaufederungssysteme .....	5
1.3.1 Passive, semi–passive und semi–aktive Federungen .....	5
1.3.2 Voll–aktive und langsam–aktive Federung .....	8
1.3.3 Wankregelsysteme .....	12
1.3.4 Aktive Federungen mit Vorausschau .....	12
1.4 Stand der Technik .....	13
1.4.1 Theorie aktiver Federungen .....	13
1.4.2 Technische Realisierungen aktiver Federungen .....	16
1.4.3 Realisierungen von Hardware–in–the–Loop (HiL) Versuchen ....	19
1.4.4 Verteilte Simulation mechatronischer Systeme .....	21
1.5 Ziel und Inhalt der Arbeit .....	22
<b>2 MODELLIERUNG UND ECHTZEITSIMULATION VON FAHRZEUGEN MIT AKTIVER FEDERUNG .....</b>	<b>24</b>
2.1 Bewegungsgleichungen von Mehrkörpersystemen .....	24
2.1.1 Aufbau von Mehrkörpersystemen .....	24
2.1.2 Beschreibung der Kinematik .....	25
2.1.3 Impuls– und Drallsatz .....	27
2.1.4 Reduktion der Bewegungsgleichungen .....	29
2.2 Modellierung von Fahrzeugen .....	30
2.3 Fahrbahnmodellierung .....	32
2.4 Beurteilung des Fahrzeugverhaltens .....	36
2.4.1 Fahrkomfort .....	36
2.4.2 Fahrsicherheit .....	40
2.4.3 Einfederung .....	41

2.4.4 Gewichtung der Kriterien Fahrkomfort, Fahrsicherheit und Einfederung .....	41
2.5 Echtzeitsimulation .....	42
2.6 Hardware-in-the-Loop Simulation .....	44
<b>3 FAHRZEUGREGELUNG MIT IDEALEN AKTOREN .....</b>	<b>47</b>
3.1 LQR-Entwurf für ein Viertelfahrzeug mit kraftgeregeltem Aktor .....	49
3.2 Optimale Ausgangsrückführung für ein Viertelfahrzeug mit kraftgeregeltem Aktor .....	53
3.3 Entwurf einer Federungsstrategie für ein voll-aktives Viertelfahrzeug mit lagegeregeltem Aktor .....	53
3.4 Vergleich von Federungsstrategien an einfachen Fahrzeugmodellen .....	58
3.4.1 Viertelfahrzeug mit aktiver Federung .....	58
3.4.2 Halbfahrzeug mit aktiver Federung .....	63
<b>4 MATHEMATISCHE BESCHREIBUNG HYDRAULISCHER AKTOREN .....</b>	<b>68</b>
4.1 Modellierung von Mehrkörpersystemen mit hydraulischen Aktoren .....	68
4.2 Hydraulische Differentialzylinder-Aktoren .....	73
4.2.1 Modellbildung von Differentialzylinder-Aktoren .....	73
4.2.2 Nichtlineare Effekte an Differentialzylinder-Aktoren .....	77
4.2.3 Linearisierung der Modellgleichungen .....	79
4.3 Parameteridentifikation hydraulischer Aktoren .....	82
4.3.1 Parameter des Servoventils .....	83
4.3.2 Messung des Reibkraftverlaufes .....	84
4.3.3 Bestimmung der Leckölkoeffizienten .....	86
4.3.4 Parameteridentifikation mit der Kovarianzmethode .....	89
<b>5 REGELUNG VON AKTOREN UND FAHRZEUG .....</b>	<b>94</b>
5.1 Aktorregelung mit Krafrückführung .....	94
5.1.1 Bestimmung des kritischen Arbeitspunktes .....	94
5.1.2 P-Reglerentwurf am stillstehenden Aktor .....	97
5.1.3 PID-Reglerentwurf am stillstehenden Aktor .....	98
5.1.4 Verbesserung des Störverhaltens von Differentialzylinder-Aktoren .	102
5.1.5 Einsatz kraftgeregelter Aktoren im Fahrzeugmodell .....	106

5.2	Hardware-in-the-Loop Reglerentwurf .....	109
5.2.1	Optimale Einstellung der Aktorregelung mit Krafrückführung .....	109
5.2.2	Übertragbarkeit des HiL-Reglerentwurfs auf das Fahrzeug .....	113
5.3	Aktorregelung mit Lagerückführung .....	114
5.3.1	P-Reglerentwurf .....	114
5.3.2	PI-Reglerentwurf .....	116
5.3.3	Einsatz lage geregelter Aktoren im Fahrzeug .....	119
5.4	Vergleich der Aktorregelungskonzepte beim Einsatz im Fahrzeug .....	122
<b>6</b>	<b>HIL-SIMULATION EINES HALBFAHRZEUGMODELLS UND VERIFIKATION DER REGLERAUSLEGUNG .....</b>	<b>125</b>
6.1	Echtzeitsimulation komplexer Fahrzeugmodelle .....	125
6.1.1	Echtzeitsimulation von Fahrzeugen mit idealen Aktoren .....	126
6.1.2	Echtzeitsimulation von Fahrzeugen mit Aktormodellen .....	128
6.2	Verifikation der Hardware-in-the-Loop Simulation .....	132
6.3	Auswirkung der Aktorregelung mit Krafrückführung auf das Fahrzeugverhalten 136	
6.4	Vergleich von HiL-Simulation und Simulation mit Aktormodell .....	143
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>145</b>
	<b>ANHANG: GRUNDZÜGE DER OPTIMIERUNG VON MEHRKÖRPERSYSTEMEN .....</b>	<b>149</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>163</b>