

Rolf Isermann (Hrsg.)

# **Fahrdynamik-Regelung**

**Modellbildung,  
Fahrerassistenzsysteme,  
Mechatronik**

Mit 340 Abbildungen und 28 Tabellen

**ATZ/MTZ-Fachbuch**



# Inhaltsverzeichnis

<b>Das mechatronische Kraftfahrzeug</b> .....	1
1.1 Zur Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen und Fahrtdynamik-Regelungen.....	1
1.2 Mechatronische Systeme.....	3
1.2.1 Integrierte mechatronische Systeme.....	5
1.2.2 Funktionen mechatronischer Systeme.....	7
1.2.2.1 Mechanischer Grundaufbau.....	7
1.2.2.2 Funktionsaufteilung Mechanik - Elektronik.....	8
1.2.2.3 Betriebseigenschaften.....	9
1.2.2.4 Neue Funktionen.....	9
1.2.2.5 Sonstige Entwicklungen.....	10
1.2.3 Integrationsformen von Prozess und Elektronik.....	10
1.2.4 Entwurfsmethodik für mechatronische Systeme.....	13
1.2.5 Rechnergestützter Entwurf von mechatronischen Systemen.....	15
1.3 Mechatronische Komponenten im Kraftfahrzeug - eine kurze Übersicht . . .	17
1.3.1 Mechatronische Radaufhängungen.....	18
1.3.2 Mechatronische Bremssysteme.....	20
1.3.3 Mechatronische Lenksysteme.....	22
<b>A Modellbildung und Simulation</b>	
<b>Modelle zur Beschreibung des Fahrzeugverhaltens</b> .....	27
2.1 Modellierung technischer Systeme.....	27
2.2 Definition von Koordinatensystemen und Winkeln.....	29
2.3 Ausprägungen von Fahrzeugmodellen.....	31
2.4 Gesamtfahrzeugmodelle.....	33
2.5 Modellierung von Antriebsstrang und Bremse.....	34
2.6 Reifenmodelle.....	35
2.6.1 Reifenmodell nach Burckhardt.....	37
2.6.2 Reifenmodell nach Pacejka.....	40
2.6.3 Lineares Reifenmodell.....	40
2.6.4 Dynamik des Kraftaufbaus.....	41
2.7 Dynamikgleichungen des Zweispurmodells.....	42
2.8 Zusammenfassung.....	45
<b>Modellierung, Analyse und Simulation der Fahrzeugquerdynamik</b> .....	47
3.1 Modellbildung des lineares Einspurmodell.....	47
3.1.1 Kinetik.....	48
3.1.2 Kinematik.....	51

3.1.3	Querschleupf und Querkräfte.....	54
3.1.4	Bewegungsgleichungen.....	58
3.2	Analyse des linearen Einspurmodells.....	63
3.2.1	Übertragungsfunktionen.....	63
<b>4</b>	<b>Objektorientierte Modellbildung des fahrdynamischen Verhaltens mit MODELICA.....</b>	<b>71</b>
4.1	Modular-hierarchische Strukturierung.....	72
4.1.1	Verknüpfungen.....	73
4.1.2	Modellaggregation.....	73
4.1.3	Objektdiagramme.....	73
4.2	Grundzüge objektorientierter Modellierung physikalischer Systeme mit MODELICA.....	74
4.2.1	Objekte und Klassen.....	75
4.2.2	Schnittstellen und Verknüpfungen.....	76
4.2.3	Kapselung.....	77
4.2.4	Hierarchie.....	77
4.3	Physikalische Modellbildung am Beispiel des Kraftfahrzeugs.....	78
4.3.1	Fahrwerk.....	80
4.3.2	Reifen/Räder.....	82
4.3.3	Antrieb und Bremssystem.....	84
4.3.4	Bewertung der Modellierung mit MODELICA.....	85
4.4	Modellparametrierung und -Validierung.....	86
4.5	Zusammenfassung und Ausblick.....	88
<b>5</b>	<b>Anwendungsorientierte Übersicht kommerzieller Fahrzeug-Simulations-Systeme.....</b>	<b>93</b>
5.1	Mehrkörper-Simulation (MKS).....	93
5.1.1	Übergang vom MKS-Modell zum systemdynamischen Modell.....	96
5.2	Systemdynamische Fahrzeugmodelle.....	97
5.3	Modellbasierter Entwicklungsprozess.....	102
5.4	Software-in-the-Loop-Simulation.....	104
5.4.1	Anwendungsbeispiel: IDS <sup>plus</sup> Fahrwerk im Opel Astra.....	105
5.4.2	SiL-Simulation des ICC-Systems.....	106
5.5	Hardware-in-the-Loop-Simulation.....	108
5.6	Testautomatisierung.....	112
<b>6</b>	<b>Domänenübergreifende Modellbildung eines aktiv gefederten Nutzfahrzeugs CAMeL-View TestRig.....</b>	<b>117</b>
6.1	Versuchsträger: Ein passiv gefedertes Nutzfahrzeug auf UNIMOG-Basis ...	117
6.2	Entwurfsziel: Aktives Fahrwerk für ein geländegängiges Nutzfahrzeug.....	118
6.2.1	Prinzip der aktiven Federung.....	119
6.2.2	Flügelzellenaktorik.....	119
6.2.3	Informationsverarbeitung und Sensorik.....	120

6.3	Entwurfsprozess: Modellbasierter Entwurf mechatronischer Systeme.....	121
6.3.1	Modellphase.....	121
6.3.2	Prüfstandsphase.....	122
6.3.3	Prototypenphase.....	123
6.4	Entwurfsumgebung: CAMEL-View TestRig - ein durchgängiges Werkzeug für den Entwurf mechatronischer Systeme. . .	123
6.4.1	Objektorientierte Modellbildung mechatronischer Systeme mit CAMEL-View.....	124
6.4.2	Vom physikalisch-topologischen zum mathematischen Modell. . . . .	127
6.4.3	CAMEL-View TestRig-Prüfstands- und -Prototypenhardware. . . . .	129
6.5	Entwurfsprozess: Modell-, Prüfstands- und Prototypenphase.....	131
6.5.1	Modellphase: Modellbildung des aktiv gefederten Nutzfahrzeugs. . .	131
6.5.2	Validierung des Fahrzeugmodells.....	132
6.5.3	Modellbildung von Aktorik, Sensorik und Informationsverarbeitung	132
6.5.4	Simulationsuntersuchungen am virtuellen Prototypen.....	133
6.5.5	Prüfstandsphase: Komponententest.....	134
6.5.6	Prototypenphase: Einsatz im Fahrversuch.....	135
6.6	Zusammenfassung und Ausblick.....	136
<i>f.</i>	<b>B Fahrdynamische Brems- und Querdynamikregelungen</b>	
<b>7</b>	<b>Bremsregelungen für mechatronische Bremsen.....</b>	<b>137</b>
7.1	Konventionelles Antiblockiersystem.....	139
7.2	Grundzüge des Antiblockiersystems mit neuem Ansatz.....	141
7.2.1	Aufbau des Regelsystems.....	141
7.2.2	Versuchsfahrzeug.....	143
7.2.3	Elektrohydraulische Bremse (EHB).....	144
7.3	Funktionen des Antiblockiersystems mit neuem Ansatz.....	146
7.3.1	Radschlupfregelung.....	146
7.3.1.1	Bremung auf trockenem Asphalt.....	150
7.3.1.2	Bremung auf nassem Asphalt.....	152
7.3.1.3	Bremung auf Schnee.....	153
7.3.1.4	Bremung aufpoliertem Eis.....	154
7.3.2	Ermittlung der Fahrzeuggeschwindigkeit.....	155
7.3.3	Ermittlung des optimalen Bremsschlupfs und Bremsschlupfvorgabe	159
7.4	Vergleich von ABS mit konventionellem bzw. neuem Ansatz.....	163
7.4.1	Konventionelles Antiblockiersystem.....	164
7.4.2	Antiblockiersystem mit neuem Ansatz.....	165
7.5	Zusammenfassung.....	167
<b>8</b>	<b>Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP).....</b>	<b>169</b>
8.1	Regelkonzept des ESP.....	171
8.2	Komponenten des ESP.....	174
8.3	Anforderungen an das ESP.....	174

8.4	Struktur des ESP-Reglers.....	176
8.4.1	Fahrdynamikregler.....	177
8.4.1.1	Beobachter.....	177
8.4.1.2	Sollwerte.....	181
8.4.1.3	Fahrzeugregler.....	185
8.4.2	Bremsschlupfregler.....	192
8.4.3	Antriebsschlupfregler.....	197
8.5	Überwachung des ESP-Systems.....	202
8.5.1	Anforderungen an die Sicherheit.....	203
8.5.2	Auswirkungen von Komponentenausfällen.....	204
8.5.3	Basiselemente des ESP-Sicherheitskonzepts.....	205
8.5.3.1	Fehlervermeidung.....	206
8.5.3.2	Systemüberwachung und Fehlerentdeckung.....	206
8.5.3.2.1	Basisüberwachung.....	206
8.5.3.2.2	Eigensicherheit, Selbsttests und aktive Tests.....	206
8.5.3.2.3	Modellgestützte Sensorüberwachung.....	207
8.5.3.2.4	Maßnahmen im Fall eines Fehlerverdachts.....	209
8.5.3.2.5	Begrenzung der Auswirkungen unentdeckter Fehler.....	210
8.5.3.3	Maßnahmen im Fall entdeckter Fehler.....	210
8.5.4	Wiedergutprüfung nach Systemabschaltung.....	211
<b>9</b>	<b>Mechatronische Lenksysteme: Modellbildung und Funktionalität des Active Front Steering.....</b>	<b>213</b>
9.1	Systemüberblick des Active Front Steering.....	213
9.2	Lenkassistentenfunktionen des Active Front Steering.....	214
9.3	Systemkomponenten des Active Front Steering.....	218
9.4	Mathematische Modellbildung, Parameterschätzung und Validierung.....	221
9.5	Grundzüge des technischen Sicherheitskonzeptes.....	231
9.6	Modellbasierte Überwachungsmaßnahmen.....	232
9.7	Zusammenfassung.....	235
<b>10</b>	<b>Integrierte Querdynamikregelung mit ESP, AFS und aktiven Fahrwerksystemen.....</b>	<b>237</b>
10.1	Überblick über aktive Systeme zur Beeinflussung der Fahrzeugquerbewegung.....	238
10.1.1	ESP.....	238
10.1.2	Aktive Vorderachslenkung AFS.....	240
10.1.3	Aktive Fahrwerksysteme.....	242
10.1.4	Der Reifen als Übertragungsglied.....	243
10.2	Bewertung von Querdynamikeingriffen anhand des Giermoments.....	244
10.3	Funktions- und Regelungsstruktur von VDM.....	246
10.4	Anwendung im Fahrversuch.....	248
10.5	Schlussfolgerung.....	250

**Regelung der Vertikaldynamik**

**H Semiaktivi<sup>1</sup> Stoßdämpfer und aktive Radaufhängungen** .....253

- 11.1 Übersicht aktiver Stoßdämpfer und aktiver Radaufhängungen ..... 253
- 11.2 CDC-System und Weiterentwicklung zur Mechatronik ..... 254
- 11.3 Funktionsvernetzung am Beispiel CDC und ARS..... 259
- 11.4 Zusammenfassung..... 264

**12 Elektronisch geregelte Luftfedersysteme**..... 265

- 12.1 Luftfedersysteme..... 265
- 12.2 Einsatzfelder von Luftfedersystemen..... 268
- 12.3 Bauformen der Luftfedern und Luftfederdämpfereinheiten ..... 268
- 12.4 Luftversorgung..... 272
- 12.5 Luftfederdämpfungssystem..... 276
- 12.6 Steuergerät und Regelung..... 280
- 12.7 Zusammenfassung..... 282

**Fahrer-Assistenzsysteme**

**13 Automatisches Spurfahren auf Autobahnen**..... 285

- 13.1 Systemüberblick..... 286
  - 13.1.1 Systemfunktion..... 286
  - 13.1.2 Funktionaler Systemaufbau und Verarbeitungsablauf..... 286
  - 13.1.3 Systemkomponenten..... 288
  - 13.1.4 Fahrzeugintegration und Mensch-Maschine-Schnittstelle ..... 290
- 13.2 Fahrzeugquerführung..... 291
  - 13.2.1 Reglerstruktur..... 291
  - 13.2.2 Stabilitätsuntersuchungen..... 296
  - 13.2.3 Kennlinien und Sprungantworten..... 298
  - 13.2.4 Praktisches Reglerverhalten..... 301
- 13.3 Leistungsbewertung des ALD-Systems..... 301

**14 Parkassistent**..... 307

- 14.1 Systemkonzept..... 308
- 14.2 Positionsbestimmung..... 310
- 14.3 Bahnplanung..... 312
- 14.4 Bahnregelung..... 314
- 14.5 Mensch-Maschine-Schnittstelle..... 317
- 14.6 Experimentelle Ergebnisse..... 319
- 14.7 Zusammenfassung..... 321