

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Das mechatronische Kraftfahrzeug.....</b>	<b>1</b>
1.1	Zur Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen und Fahrodynamik-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>2</b>	<b>Modelle zur Beschreibung des Fahrzeugverhaltens .....</b>	<b>27</b>
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>3</b>	<b>Modellierung, Analyse und Simulation der Fahrzeugquerdynamik.....</b>	<b>47</b>
3.1	Modellbildung des lineares Einspurmodell .....	47
3.1.1	Kinetik.....	48
3.1.2	Kinematik .....	51

3.1.3	Querschleif 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	Entwurfziel: Aktives Fahrwerk für ein geländegängiges Nutzfahrzeug .....	118
6.2.1	Prinzip der aktiven Federung .....	119
6.2.2	Flügelzellenaktuatorik .....	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

## **B Fahr-dynamische Brems- und Quer-dynamikregelungen**

<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	Bremsung auf trockenem Asphalt.....	150
7.3.1.2	Bremsung auf nassem Asphalt.....	152
7.3.1.3	Bremsung auf Schnee.....	153
7.3.1.4	Bremsung auf poliertem 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

## C Regelung der Vertikaldynamik

<b>11 Semiaktive Stoßdämpfer und aktive Radaufhängungen</b> .....	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
<b>12 Elektronisch geregelte Luftfedersysteme</b> .....	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

## D Fahrer-Assistenzsysteme

<b>13 Automatisches Spurfahren auf Autobahnen</b> .....	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
<b>14 Parkassistent</b> .....	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

## E Fahr-dynamischer Systemverbund

<b>15 Systemvernetzung und Funktionseigenentwicklung im Fahrwerk – Neue Herausforderung für Hersteller und Zulieferer</b> .....	323
15.1 Fahrwerksysteme – Ein Überblick .....	324
15.2 Funktionale Architekturen der Fahrwerksvernetzung .....	335
15.3 Geschäftsmodelle für Funktionseigenentwicklung beim OEM .....	339
15.4 Zusammenfassung .....	343
<b>16 Vernetzung von Längs-, Quer- und Vertikaldynamik-Regelung</b> .....	345
16.1 Querregelkreis und Fahrer .....	347
16.2 Wechselwirkung Längs- und Querdynamik .....	350
16.3 Wechselwirkung Quer- und Wankdynamik .....	352
16.4 Fahr-dynamischer Systemverbund .....	355
16.5 Entwicklungsmethodik für einen fahr-dynamischen Systemverbund .....	360
16.6 Zusammenfassung und Ausblick .....	362
<b>17 Entwicklungsumgebung mit echtzeitfähigen Gesamtfahrzeugmodellen für sicherheitsrelevante Fahrerassistenzsysteme</b> .....	365
17.1 Besondere Betrachtung des Fahrers im Regelkreis .....	365
17.2 Laboraufbau und HIL-Simulationsmodell .....	367
17.3 Stabilisierung des Fahrzeugs durch Gierraten-Regelung mit aktivem Lenkeingriff .....	370
17.4 Beispiel Ausweichassistent .....	373
17.5 Zusammenfassung und Ausblick .....	374

## F Überwachung, Diagnose und Fehlertoleranz mechatronischer Systeme

<b>18 Modellgestützte Überwachung und Fehlerdiagnose für Kraftfahrzeuge</b> .....	377
18.1 Wissensbasierte Fehlererkennung und Fehlerdiagnose .....	379
18.2 Modellgestützte Methoden zur Fehlererkennung .....	380
18.2.1 Mathematische Prozessmodelle und Fehlermodellierung .....	382
18.2.2 Fehlererkennung mit Parameterschätzmethoden .....	385
18.2.3 Fehlererkennung mit Paritätsgleichungen .....	386
18.2.4 Fehlererkennung mit Beobachtern .....	387
18.2.5 Fehlererkennung mit Signalmodellen .....	388
18.2.6 Vergleich der verschiedenen Methoden .....	389
18.2.7 Kombination verschiedener Methoden zur Fehlererkennung .....	390
18.2.8 Symptomerkennung .....	391
18.3 Methoden zur Fehlerdiagnose .....	394
18.3.1 Arten der Merkmale und Symptome .....	394
18.3.2 Einheitliche Darstellung der Symptome .....	395
18.3.3 Klassifikationsverfahren .....	395
18.3.4 Inferenzverfahren .....	396

---

18.4	Elektromechanische Aktoren .....	399
18.4.1	Elektrische Drosselklappe .....	399
18.4.2	Elektromagnet (Magnetventil).....	400
18.5	Modellgestützte Fehlerdiagnose am Fahrwerk .....	401
18.5.1	Fehlerdiagnose an Radaufhängungen .....	401
18.5.2	Aktive Radaufhängung .....	403
18.6	Schlussfolgerungen.....	403
<b>19</b>	<b>Fehlererkennung und -diagnose für Fahrdynamiksensoren mit querdynamischen Modellen .....</b>	<b>407</b>
19.1	Symptomgenerierung in der unteren Ebene.....	409
19.1.1	Geometrische Modelle.....	409
19.1.2	Geometrische Modelle mit Raddrehzahldifferenz .....	409
19.1.3	Geometrische Modelle mit Vorderradeinschlag .....	412
19.1.4	Paritätsgleichungen.....	413
19.1.5	Fehlererkennung der ABS Radgeschwindigkeitssignale .....	414
19.2	Diagnosesystem in der mittleren Ebene.....	416
19.2.1	Einsatz von Fuzzy-Logik zur Diagnose.....	416
19.3	Experimentelle Ergebnisse der Fehlererkennung und -diagnose .....	419
19.4	Rekonfiguration in der oberen Ebene .....	428
19.5	Zusammenfassung .....	429
<b>20</b>	<b>Diagnose und Sensor-Fehlertoleranz aktiver Fahrwerke.....</b>	<b>431</b>
20.1	Diagnose und Sensor-Fehlertoleranz für eine elektrohydraulische Radaufhängung .....	431
20.1.1	Modellbildung der elektrohydraulischen Radaufhängung.....	432
20.1.2	Parameterschätzung .....	434
20.1.3	Modellierung mit semi-physikalischen Modellen .....	435
20.1.4	System zur Diagnose und Sensor-Fehlertoleranz .....	437
20.1.5	Erkennung und Diagnose von Sensorfehlern.....	438
20.1.6	Prozessfehlererkennung.....	439
20.1.7	Sensorfehler-Toleranz .....	440
20.2	Diagnose und Sensor-Fehlertoleranz für einen aktiven Stabilisator .....	441
20.2.1	Modellbildung des aktiven Stabilisators.....	443
20.2.2	Parameterschätzung .....	444
20.2.3	Modellierung mit semi-physikalischen Modellen .....	445
20.2.4	Erkennung und Diagnose von Sensorfehlern.....	448
20.3	Zusammenfassung .....	450
	<b>Sachwortverzeichnis.....</b>	<b>453</b>

