

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.1.1	Modellierung technischer Systeme	4
1.1.2	Systembegriff	5
1.1.3	Simulation und Simulationsumgebung	6
1.1.4	Fahrzeugmodelle	6
1.2	Gesamtfahrzeugmodelle	10
1.2.1	Fahrzeugmodelle und Anwendungsgebiete	12
1.2.2	Kommerzielle Fahrzeugsimulationssysteme	12
1.3	Inhaltsübersicht	16
1.4	Internetseite zum Buch	16
	Literatur	17
2	Mathematische und kinematische Grundlagen	19
2.1	Vektoren	19
2.1.1	Elementare Rechenregeln für Vektoren	19
2.1.2	Physikalische Vektoren	20
2.2	Koordinatensysteme und Komponenten	21
2.2.1	Koordinatensysteme	21
2.2.2	Komponentenzerlegung	21
2.2.3	Zusammenhang zwischen den Komponentendarstellungen	22
2.2.4	Eigenschaften der Transformationsmatrix	24
2.3	Lineare Vektorfunktionen und Tensoren 2. Stufe	24
2.4	Freie Bewegung des starren Körpers	26
2.4.1	Allgemeine Bewegung des starren Körpers	26
2.4.2	Relativbewegung	30
2.4.3	Wichtige Bezugssysteme	32
2.5	Drehbewegungen	33
2.5.1	Räumliche Drehung und Winkelgeschwindigkeit in allgemeiner Form	33

2.5.2	Parametrisierung von Drehbewegungen	34
2.5.3	Drehzeiger und Drehtensor	36
2.5.4	Drehzeiger und Winkelgeschwindigkeit	38
2.5.5	KARDAN-Winkel	38
	Literatur	42
3	Kinematik von Mehrkörpersystemen	43
3.1	Struktur kinematischer Ketten	43
3.1.1	Topologische Modellierung	43
3.1.2	Kinematische Modellierungen	45
3.2	Gelenke in kinematischen Ketten	46
3.2.1	Gelenke in räumlichen kinematischen Ketten	47
3.2.2	Gelenke in ebenen kinematischen Ketten	49
3.2.3	Gelenke in sphärischen kinematischen Ketten	49
3.2.4	Klassifizierung von Gelenken	50
3.3	Freiheitsgrade und verallgemeinerte Koordinaten	51
3.3.1	Freiheitsgrade kinematischer Ketten	51
3.3.2	Beispiele aus der Fahrwerkskinematik	53
3.3.3	Verallgemeinerte Koordinaten	54
3.4	Grundprinzipien des Zusammenbaus kinematischer Ketten	55
3.4.1	Sparse-Methoden – Absolutkoordinaten-Formulierung	58
3.4.2	Vector-Loop-Methoden – Gelenkkoordinaten-Formulierung	59
3.4.3	Topologische Methoden – Minimalkoordinaten-Formulierung	61
3.5	Kinematik des Gesamtsystems	62
3.5.1	Grundidee	62
3.5.2	Blockschaltbilder und kinematische Netze	63
3.5.3	Relativkinematik des räumlichen Gelenkvierecks	65
3.5.4	Relative Kinematik, absolute Kinematik und globale Kinematik	67
3.5.5	Beispiel: Doppelquerlenkerradaufhängung	69
	Literatur	71
4	Bewegungsgleichungen komplexer Mehrkörpersysteme	73
4.1	Fundamentalgleichung der Dynamik für Punktmassen	74
4.2	Das JOURDAINSche Prinzip	75
4.3	LAGRANGEsche Gleichungen erster Art für Punktmassen	75
4.4	LAGRANGEsche Gleichungen zweiter Art für starre Körper	77
4.5	Das d’ALEMBERTsche Prinzip für starre Körper und Bewegungsgleichungen in Minimalkoordinaten	78
4.6	Computergestütztes Aufstellen der Bewegungsgleichungen für Mehrkörpersysteme mit kinematischen Schleifen	80
4.6.1	Kinematische Differentiale der Absolutkinematik der Körper	81
4.6.2	Bewegungsgleichungen	83
4.6.3	Beispiel: Dynamik einer räumlichen Mehrkörperschleife	85
	Literatur	92

5	Kinematik und Dynamik des Fahrzeugaufbaus	95
5.1	Fahrzeugfestes Referenzsystem	95
5.2	Kinematische Analyse des Fahrgestells	98
5.2.1	Einbindung der Radaufhängungskinematik	98
5.2.2	Bewegungsgleichungen	100
	Literatur	101
6	Modellierung und Analyse von Radaufhängungen	103
6.1	Funktion von Radaufhängungssystemen	103
6.2	Typen von Radaufhängungen	105
6.2.1	Starrachsen	106
6.2.2	Verbundlenkerachsen	107
6.2.3	Längslenkerachsen	107
6.2.4	Schräglänkerachsen	108
6.2.5	Doppelquerlenkerachsen	110
6.2.6	Radaufhängungen nach dem McPherson-Prinzip	111
6.2.7	Mehrlenkerachsen	112
6.3	Kenngrößen von Radaufhängungen	114
6.4	Eindimensionale Viertelfahrzeugmodelle	117
6.5	Räumliches Modell einer McPherson-Radaufhängung	121
6.5.1	Kinematische Analyse	122
6.5.2	Explizite Lösung	126
6.6	Räumliches Modell einer Fünfpunkthinterradaufhängung	131
6.6.1	Kinematische Analyse	132
6.6.2	Implizite Lösung	134
6.6.3	Simulationsergebnisse des räumlichen Viertelfahrzeugmodells	138
	Literatur	143
7	Modellierung des Rad-Straße-Kontaktes	145
7.1	Aufbau des Reifens	146
7.2	Grundsätzliche Beschreibung der Kraftwirkung zwischen Rad und Straße	147
7.3	Stationäre Reifenkontaktkräfte	147
7.3.1	Reifen unter Vertikallast	149
7.3.2	Rollwiderstand	150
7.3.3	Reifen unter Umfangskraft	151
7.3.4	Reifen unter Seitenkraft	162
7.3.5	Einfluss des Radsturzes auf die Reifenseitenkraft	165
7.3.6	Einfluss der Radlast auf die Radkräfte in der Lauffläche	166
7.3.7	Grundsätzliche Struktur der Radkräfte	166
7.3.8	Überlagerung von Umfangs- und Seitenkräften	166
7.4	Reifenmodelle	168
7.4.1	Die Kontaktpunkt-Geometrie	171

7.4.2	Die Kontaktgeschwindigkeiten	175
7.4.3	Berechnung der Schlupfgrößen	177
7.4.4	Magic Formula-Modelle (Pacejka 2006)	177
7.4.5	Magic Formula-Modelle für überlagerten Umfangs- und Querschlupf	179
7.4.6	HSRI-Reifenmodell	181
7.5	Instationäres Reifenverhalten	183
	Literatur	184
8	Modellierung des Antriebsstranges	187
8.1	Antriebskonzepte	187
8.2	Modellbildung	187
8.2.1	Bewegungen des Motorblocks	189
8.2.2	Modell des Antriebsstranges	189
8.2.3	Motorlager	191
8.2.4	Modellierung der Gleichlaufgelenke	195
8.3	Modell des Motors	198
8.4	Relativkinematik des Antriebsstranges	199
8.5	Absolutkinematik des Antriebsstranges	202
8.6	Bewegungsgleichungen	202
8.7	Diskussion von Simulationsergebnissen	204
	Literatur	205
9	Kraftkomponenten	207
9.1	Kräfte und Momente in Mehrkörpersystemen	207
9.1.1	Reaktionskräfte	209
9.1.2	Eingeprägte Kräfte	210
9.2	Betriebsbremse	210
9.3	Luftkräfte	212
9.4	Feder- und Dämpferkomponenten	214
9.4.1	Federelemente	214
9.4.2	Dämpferelemente	215
9.4.3	Parallel geschaltete Kraftelemente	216
9.4.4	In Reihe geschaltete Kraftelemente	216
9.5	Stabilisatoren	217
9.5.1	Passive Stabilisatoren	217
9.5.2	Aktive Stabilisatoren	220
9.6	Gummi-Verbund-Elemente	221
	Literatur	223
10	Einspurmodelle	225
10.1	Lineares Einspurmodell	225
10.1.1	Bewegungsgleichungen des linearen Einspurmodells	226

10.1.2	Stationäres Lenkverhalten und Kreisfahrt	231
10.1.3	Instationäres Lenkverhalten - Fahrstabilität	234
10.2	Nichtlineares Einspurmodell	235
10.2.1	Kinematik und Kinetik des nichtlinearen Einspurmodells	235
10.2.2	Reifenkräfte	238
10.2.3	Antriebs- und Bremsmomente	241
10.2.4	Bewegungsgleichungen	243
10.2.5	Zustandsgleichungen	244
10.3	Lineares Wankmodell	245
10.3.1	Bewegungsgleichung für das Wanken des Aufbaus in der Kurve	246
10.3.2	Dynamische Radlasten	250
10.3.3	Beeinflussung des Eigenlenkverhaltens durch Stabilisatoren	252
	Literatur	254
11	Zweispurmodelle	255
11.1	Räumliches Zweispurmodell ohne Radaufhängungskinematik	255
11.1.1	Impuls- und Drallsätze des einfachen räumlichen Zweispurmodells	258
11.1.2	Feder- und Dämpferkräfte des räumlichen Zweispurmodells	260
11.1.3	Impuls- und Drallsätze der Räder	262
11.1.4	Rad-Strasse-Kontakt	262
11.1.5	Antriebsstrang	265
11.1.6	Bremssystem	267
11.1.7	Bewegungsgleichungen	267
11.2	Ein einfaches Zweispurmodell mit kinematischen Radaufhängungen	268
11.2.1	Freiheitsgrade des Zweispurmodells mit kinematischen Radaufhängungen	268
11.2.2	Kinematik des Fahrzeugaufbaus	271
11.2.3	Allgemeine Kinematik der Radaufhängungen	273
11.2.4	Radaufhängung mit Schräglenkern	277
11.2.5	Kinematik der Räder bei der Schräglenkeraufhängung	282
11.2.6	Radkräfte und -momente	285
11.2.7	Aufbaufedern und -dämpfer	285
11.2.8	Windkräfte	286
11.2.9	Lenkung	286
11.2.10	Stabilisator	287
11.2.11	Eingeprägte Kräfte und Momente	288
11.2.12	NEWTON-EULERSche Gleichungen	289
11.2.13	Bewegungs- und Zustandsgleichungen	292
11.3	Ein einfaches Fahrermodell	293
11.3.1	Reglerkonzept	293

11.4	Parametrierung	296
	Literatur	296
12	Räumliche Gesamtfahrzeugmodelle	297
12.1	Modellierung eines Gesamtfahrzeugs	297
12.1.1	Kinematik eines heckgetriebenen Gesamtfahrzeugmodells	298
12.1.2	Kinematik von front- und allradgetriebenen Gesamtfahrzeugmodellen	307
12.1.3	Dynamik des Gesamtfahrzeugmodells	317
12.2	Simulation von Kraftfahrzeugen	323
12.2.1	Aufbau und Konzept von FASIM_C++	323
12.2.2	Modulare Struktur eines Fahrzeugmodells	326
12.2.3	Aufstellen der Bewegungsgleichungen	331
12.2.4	Numerische Integration	338
12.2.5	Behandlung von Ereignissen	341
	Literatur	342
13	Modell eines typischen komplexen Gesamtfahrzeugs	345
13.1	Modellierung des Gesamtfahrzeugs	345
13.2	Modellverifikation und -validierung	348
13.3	Parametrisiertes Fahrzeugmodell	357
13.3.1	Definition des Referenzmodells	357
13.3.2	Vergleich der parametrisierten Modelle mit den validierten Modellen	362
	Literatur	365
14	Ausgewählte Anwendungen	367
14.1	Simulation von Testmanövern	367
14.1.1	Simulation eines Lenkwinkelsprungs (ISO 7401)	367
14.1.2	Simulation einer stationären Kreisfahrt	370
14.1.3	Simulation eines doppelten Spurwechsels	370
14.2	Simulation von Fahrzeugüberschlägen	374
14.2.1	Virtuelles Testgelände	378
14.2.2	Simulationsergebnisse	382
14.3	Regelung der Wankdynamik durch aktive Stabilisatoren	394
14.3.1	Passive Stabilisatoren	394
14.3.2	Steifigkeitsverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse	395
14.3.3	Regelung der Wankdynamik durch aktive Stabilisatoren	398
14.3.4	Reglerentwurf	398
14.3.5	Führungs- und Störverhalten	401
14.3.6	Wankmomentenverteilung mit Fuzzy-Logik	401
14.3.7	Wirkprinzip	401
14.3.8	Potential einer Wankmomentenverteilung	403

14.4	Fahrsimulatoren	405
14.4.1	Einsatzgebiete und Realisierungen von Fahrsimulatoren	406
14.4.2	Der Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt	409
14.4.3	Aufbau von Fahrsimulatoren	411
14.4.4	Simulationsmodelle und Schnittstellen	411
14.4.5	Bewegungssysteme	414
14.4.6	Durchführung von Versuchen mit Fahrsimulatoren	416
14.4.7	Erfassung von Messwerten bei Simulatorversuchen	418
14.4.8	Realisierung einfacher Fahrsimulatoren	418
	Literatur	428
	Über die Autoren	431
	Stichwortverzeichnis	433