

Inhaltverzeichnis

Vorwort.....	V
Inhaltverzeichnis.....	VII
Nomenklatur und Bezeichnungen	1
1 Einleitung	7
1.1 Aufgabenstellung	7
1.1.1 Modellierung technischer Systeme	10
1.1.2 Systembegriff.....	11
1.1.3 Simulation und Simulationsumgebung	12
1.1.4 Fahrzeugmodelle.....	13
1.2 Gesamtfahrzeugmodelle	17
1.2.1 Fahrzeugmodelle und Anwendungsgebiete	19
1.2.2 Kommerzielle Fahrzeugsimulationssysteme.....	21
1.3 Inhaltsübersicht.....	23
1.4 Web-Seite zum Buch	24
2 Mathematische und kinematische Grundlagen	25
2.1 Vektoren.....	25
2.1.1 Elementare Rechenregeln für Vektoren.....	25
2.1.2 „Physikalische“ Vektoren	26
2.2 Koordinatensysteme und Komponenten	27
2.2.1 Koordinatensysteme.....	27
2.2.2 Komponentenzerlegung	28
2.2.3 Zusammenhang zwischen Komponentendarstellungen	29
2.2.4 Eigenschaften der Transformationsmatrix	30
2.3 Lineare Vektorfunktionen und Tensoren 2. Stufe.....	31
2.3.1 Beispiele für Tensoren 2. Stufe.....	31
2.4 Freie Bewegung des starren Körpers	33
2.4.1 Allgemeine Bewegung des starren Körpers.....	33
2.4.2 Relativbewegung	37
2.4.3 Wichtige Bezugssysteme	39
2.5 Drehbewegungen	41

VIII Inhaltverzeichnis

2.5.1	Räumliche Drehung und Winkelgeschwindigkeit	41
2.5.2	Parametrisierung von Drehbewegungen	42
2.5.3	Drehzeiger und Drehtensor	43
2.5.4	Drehzeiger und Winkelgeschwindigkeit.....	45
2.5.5	KARDAN-Winkel	46
3	Kinematik von Mehrkörpersystemen.....	51
3.1	Struktur kinematischer Ketten	51
3.1.1	Topologische Modellierung.....	52
3.2	Gelenke in kinematischen Ketten	55
3.2.1	Gelenke in räumlichen kinematischen Ketten	55
3.2.2	Gelenke in ebenen kinematischen Ketten	57
3.2.3	Gelenke in sphärischen kinematischen Ketten	58
3.2.4	Klassifizierung von Gelenken.....	58
3.3	Freiheitsgrade und verallgemeinerte Koordinaten.....	60
3.3.1	Freiheitsgrade kinematischer Ketten.....	60
3.3.2	Beispiele aus der Fahrwerkskinematik	61
3.3.3	Verallgemeinerte Koordinaten.....	62
3.4	Grundprinzipien des Zusammenbaus kinematischer Ketten.....	64
3.4.1	„Sparse“-Methoden.....	66
3.4.2	„Vector-Loop“-Methoden.....	68
3.4.3	Topologische Methoden	69
3.5	Kinematik des Gesamtsystems	72
3.5.1	Grundidee	72
3.5.2	Blockschaltbilder und kinematische Netze	73
3.5.3	Relativkinematik des räumlichen Gelenkvierecks.....	75
3.5.4	Relative, absolute und globale Kinematik	77
4	Bewegungsgleichungen komplexer Mehrkörpersysteme.....	83
4.1	Fundamentalgleichung der Dynamik für Punktmasse.....	83
4.2	Das JOURDAINSche Prinzip.....	85
4.3	LAGRANGEsche Gleichungen erster Art für Punktmasse	85
4.4	LAGRANGEsche Gleichungen zweiter Art für starre Körper ..	87
4.5	Das d'ALEMBERTsche Prinzip	88
4.6	Computergestütztes Aufstellen der Bewegungsgleichungen....	91
4.6.1	Kinematische Differentiale der Absolutkinematik	91
4.6.2	Bewegungsgleichungen	94
4.6.3	Dynamik einer räumlichen Mehrkörperschleife	96
5	Kinematik und Dynamik des Fahrzeugaufbaus	105
5.1	Fahrzeugfestes Referenzsystem	105
5.2	Kinematische Analyse des Fahrgestells.....	108

5.2.1	Einbindung der Radaufhängungs-Kinematik.....	109
5.2.2	Bewegungsgleichungen	111
6	Modellierung und Analyse von Radaufhängungen	113
6.1	Funktion von Radaufhängungssystemen	113
6.2	Typen von Radaufhängungen	115
6.2.1	Starrachsen	116
6.2.2	Verbundlenkerachsen.....	118
6.2.3	Längslenkerachsen.....	119
6.2.4	Schräglenkerachsen	120
6.2.5	Doppelquerlenkerachsen.....	122
6.2.6	Radaufhängungen nach dem McPherson-Prinzip	123
6.2.7	Mehrlenkerachsen	125
6.3	Kenngrößen von Radaufhängungen.....	127
6.4	Eindimensionale Viertelfahrzeugmodelle.....	130
6.5	Räumliches Modell einer McPherson-Radaufhängung	133
6.5.1	Kinematische Analyse	134
6.5.2	Explizite Lösung	138
6.6	Räumliches Modell einer Fünfpunkt-Hinterradaufhängung	144
6.6.1	Kinematische Analyse	145
6.6.2	Implizite Lösung	148
6.6.3	Simulationsergebnisse des räumlichen Viertelfahrzeugmodells	152
7	Modellierung des Rad-Straße-Kontaktes	159
7.1	Aufbau des Reifens.....	160
7.2	Kraftwirkung zwischen Rad und Straße	161
7.3	Stationäre Reifenkontaktkräfte	162
7.3.1	Reifen unter Vertikallast	163
7.3.2	Rollwiderstand	164
7.3.3	Reifen unter Umfangskraft	165
7.3.4	Reifen unter Seitenkraft	179
7.3.5	Einfluss des Radsturzes auf die Reifenseitenkraft	182
7.3.6	Einfluss der Radlast auf die Radkräfte in der Lauffläche	183
7.3.7	Grundsätzliche Struktur der Radkräfte	183
7.3.8	Überlagerung von Umfangs- und Seitenkräften	184
7.4	Reifenmodelle.....	187
7.4.1	Die Kontaktpunkt-Geometrie.....	188
7.4.2	Kontakt-Geschwindigkeiten	193
7.4.3	Berechnung der Schlupfgrößen.....	195
7.4.4	Magic Formula Modelle	195
7.4.5	Magic Formula Modelle für überlagerten Schlupf	198

X Inhaltverzeichnis

7.4.6	HSRI-Reifenmodell	199
7.5	Instationäres Reifenverhalten	202
8	Modellierung des Antriebsstranges	205
8.1	Antriebskonzepte	205
8.2	Modellbildung.....	206
8.2.1	Bewegungen des Motorblocks.....	207
8.2.2	Modell des Antriebsstranges.....	208
8.2.3	Motorlager	209
8.2.4	Modellierung der Gleichlaufgelenke	215
8.3	Modell des Motors.....	217
8.4	Relativkinematik des Antriebsstranges.....	219
8.5	Absolutkinematik des Antriebsstranges.....	221
8.6	Bewegungsgleichungen	222
8.7	Diskussion von Simulationsergebnissen.....	223
9	Kraftkomponenten	225
9.1	Kräfte und Momente in Mehrkörpersystemen	226
9.1.1	Reaktionskräfte	227
9.1.2	Eingeprägte Kräfte	228
9.2	Betriebsbremse	229
9.3	Luftkräfte	230
9.4	Feder- und Dämpferkomponenten	232
9.4.1	Federelemente	232
9.4.2	Dämpferelemente.....	234
9.4.3	Parallel geschaltete Kraftelemente.....	235
9.4.4	In Reihe geschaltete Kraftelemente	235
9.5	Stabilisatoren	236
9.5.1	Passive Stabilisatoren	236
9.5.2	Aktive Stabilisatoren.....	239
9.6	Gummi-Verbund-Elemente	241
10	Einspurmodelle	243
10.1	Lineares Einspurmodell	243
10.1.1	Bewegungsgleichungen des linearen Einspurmodells	244
10.1.2	Stationäres Lenkverhalten und Kreisfahrt	249
10.1.3	Instationäres Lenkverhalten - Fahrstabilität.....	253
10.2	Nichtlineares Einspurmodell.....	254
10.2.1	Kinetik des nichtlinearen Einspurmodells	255
10.2.2	Reifenkräfte	258
10.2.3	Antriebs- und Bremsmomente	261
10.2.4	Bewegungsgleichungen	263

10.2.5	Zustandsgleichungen	264
10.3	Lineares Wankmodell	266
10.3.1	Bewegungsgleichung für das Wanken des Aufbaus	268
10.3.2	Dynamische Radlasten.....	271
10.3.3	Beeinflussung des Eigenlenkverhaltens.....	273
11	Zweispurmodelle.....	277
11.1	Zweispurmodell ohne Radaufhängungskinematik.....	277
11.1.1	Impuls- und Drallsätze.....	280
11.1.2	Feder- und Dämpferkräfte.....	283
11.1.3	Impuls- und Drallsätze der Räder	284
11.1.4	Rad-Strasse-Kontakt	285
11.1.5	Antriebsstrang.....	288
11.1.6	Bremssystem.....	290
11.1.7	Bewegungsgleichungen	290
11.2	Zweispurmodell mit kinematischen Radaufhängungen	292
11.2.1	Freiheitsgrade des Zweispurmodells.....	292
11.2.2	Kinematik des Fahrzeugaufbaus	294
11.2.3	Allgemeine Kinematik der Radaufhängungen.....	297
11.2.4	Radaufhängung mit Schräglenkern.....	302
11.2.5	Kinematik der Räder bei der Schräglenkeraufhängung	308
11.2.6	Radkräfte und -momente	310
11.2.7	Aufbaufedern und -dämpfer.....	311
11.2.8	Windkräfte	312
11.2.9	Lenkung	313
11.2.10	Stabilisator	314
11.2.11	Eingeprägte Kräfte und Momente.....	314
11.2.12	NEWTON-EULERsche Gleichungen.....	315
11.2.13	Bewegungs- und Zustandsgleichungen.....	319
11.3	Ein einfaches Fahrermodell	319
11.3.1	Reglerkonzept	320
11.4	Parametrierung.....	322
12	Räumliche Gesamtfahrzeugmodelle	325
12.1	Modellierung eines Gesamtfahrzeuges	325
12.1.1	Kinematik eines heckgetriebenen Fahrzeugmodells.....	326
12.1.2	Kinematik front- und allradgetriebener Gesamtmodelle	337
12.1.3	Dynamik des Gesamtfahrzeugmodells	354
12.2	Simulation von Kraftfahrzeugen.....	355
12.2.1	Aufbau und Konzept von FASIM_C++.....	356
12.2.2	Modulare Struktur eines Fahrzeugmodells	359
12.2.3	Aufstellen der Bewegungsgleichungen.....	365

XII Inhaltverzeichnis

12.2.4 Numerische Integration.....	373
12.2.5 Behandlung von Ereignissen	376
13 Modell eines typischen komplexen Gesamtfahrzeugs	379
13.1 Modellierung des Gesamtfahrzeugs.....	379
13.2 Modellverifikation und -validierung.....	383
13.3 Parametriertes Fahrzeugmodell	393
14 Ausgewählte Anwendungen.....	403
14.1 Simulation eines Lenkwinkelsprungs (ISO 7401)	403
14.2 Simulation von Fahrzeugüberschlägen.....	406
14.2.1 Virtuelles Testgelände	410
14.2.2 Simulationsergebnisse	415
14.3 Regelung der Wankdynamik durch aktive Stabilisatoren....	428
14.3.1 Passive Stabilisatoren	429
14.3.2 Steifigkeitsverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse	430
14.3.3 Regelung der Wankdynamik durch aktive Stabilisatoren	433
14.3.4 Reglerentwurf	433
14.3.5 Führungs- und Störverhalten	437
14.3.6 Wankmomentenverteilung mit Fuzzy-Logik	437
14.3.7 Wirkprinzip.....	438
14.3.8 Potential einer Wankmomentenverteilung.....	440
Literaturverzeichnis	443
Kurzbiografien der Autoren	453
Stichwortverzeichnis	455