
Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.1.1	Modellierung technischer Systeme	3
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	11
1.2.2	Kommerzielle Fahrzeugsimulationssysteme	12
1.3	Inhaltsübersicht	15
1.4	Internetseite zum Buch	16
	Literatur	16
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	23
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	31
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	35
2.5.4	Drehzeiger und Winkelgeschwindigkeit	37
2.5.5	Kardan-Winkel	37
	Literatur	41
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	47
3.2.1	Gelenke in räumlichen kinematischen Ketten	47
3.2.2	Gelenke in ebenen kinematischen Ketten	48
3.2.3	Gelenke in sphärischen kinematischen Ketten	50
3.2.4	Klassifizierung von Gelenken	50
3.3	Freiheitsgrade und verallgemeinerte Koordinaten	52
3.3.1	Freiheitsgrade kinematischer Ketten	52
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	57
3.4.2	Vector-Loop-Methoden – Gelenkkoordinaten-Formulierung	58
3.4.3	Topologische Methoden – Minimalkoordinaten-Formulierung ..	60
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	73
4.2	Das JOURDAINSche Prinzip	75
4.3	LAGRANGESche Gleichungen erster Art für Punktmassen	75
4.4	LAGRANGESche Gleichungen zweiter Art für starre Körper	76
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	80
4.6.2	Bewegungsgleichungen	83
4.6.3	Beispiel: Dynamik einer räumlichen Mehrkörperschleife	84
	Literatur	92

5	Kinematik und Dynamik des Fahrzeugaufbaus	93
5.1	Fahrzeugfestes Referenzsystem	93
5.2	Kinematische Analyse des Fahrgestells	96
5.2.1	Einbindung der Radaufhängungskinematik	96
5.2.2	Bewegungsgleichungen	98
	Literatur	99
6	Modellierung und Analyse von Radaufhängungen	101
6.1	Funktion von Radaufhängungssystemen	101
6.2	Typen von Radaufhängungen	103
6.2.1	Starrachsen	104
6.2.2	Verbundlenkerachsen	105
6.2.3	Längslenkerachsen	106
6.2.4	Schräglänkerachsen	107
6.2.5	Doppelquerlenkerachsen	109
6.2.6	Radaufhängungen nach dem McPherson-Prinzip	110
6.2.7	Mehrlenkerachsen	112
6.3	Kenngrößen von Radaufhängungen	113
6.4	Eindimensionale Viertelfahrzeugmodelle	116
6.5	Räumliches Modell einer McPherson-Radaufhängung	119
6.5.1	Kinematische Analyse	119
6.5.2	Explizite Lösung	123
6.6	Räumliches Modell einer Fünfpunkthinterradaufhängung	128
6.6.1	Kinematische Analyse	129
6.6.2	Implizite Lösung	132
6.6.3	Simulationsergebnisse des räumlichen Viertelfahrzeugmodells	136
	Literatur	141
7	Modellierung des Rad-Straße-Kontaktes	143
7.1	Aufbau des Reifens	144
7.2	Grundsätzliche Beschreibung der Kraftwirkung zwischen Rad und Straße	145
7.3	Stationäre Reifenkontaktkräfte	145
7.3.1	Reifen unter Vertikallast	147
7.3.2	Rollwiderstand	148
7.3.3	Reifen unter Umfangskraft	149
7.3.4	Reifen unter Seitenkraft	161
7.3.5	Einfluss des Radsturzes auf die Reifenseitenkraft	163
7.3.6	Einfluss der Radlast auf die Radkräfte in der Lauffläche	164
7.3.7	Grundsätzliche Struktur der Radkräfte	165
7.3.8	Überlagerung von Umfangs- und Seitenkräften	165
7.4	Reifenmodelle	168
7.4.1	Die Kontaktpunkt-Geometrie	169
7.4.2	Die Kontaktgeschwindigkeiten	174

7.4.3	Berechnung der Schlupfgrößen	175
7.4.4	Magic Formula-Modelle (Pacejka 2006).	176
7.4.5	Magic Formula-Modelle für überlagerten Umfangs- und Querschlupf.	179
7.4.6	HSRI-Reifenmodell	179
7.5	Instationäres Reifenverhalten	182
	Literatur	183
8	Modellierung des Antriebsstranges	185
8.1	Antriebskonzepte.	185
8.2	Modellbildung	186
8.2.1	Bewegungen des Motorblocks	186
8.2.2	Modell des Antriebsstranges	187
8.2.3	Motorlager.	189
8.2.4	Modellierung der Gleichlaufgelenke	193
8.3	Modell des Motors.	196
8.4	Relativkinematik des Antriebsstranges	197
8.5	Absolutkinematik des Antriebsstranges.	200
8.6	Bewegungsgleichungen.	200
8.7	Diskussion von Simulationsergebnissen	201
	Literatur	202
9	Kraftkomponenten	205
9.1	Kräfte und Momente in Mehrkörpersystemen	205
9.1.1	Reaktionskräfte.	207
9.1.2	Eingeprägte Kräfte	208
9.2	Betriebsbremse.	208
9.3	Luftkräfte	210
9.4	Feder- und Dämpferkomponenten.	212
9.4.1	Federelemente.	212
9.4.2	Dämpferelemente.	213
9.4.3	Parallel geschaltete Kraftelemente	214
9.4.4	In Reihe geschaltete Kraftelemente	214
9.5	Stabilisatoren	215
9.5.1	Passive Stabilisatoren.	215
9.5.2	Aktive Stabilisatoren	218
9.6	Gummi-Verbund-Elemente	219
	Literatur	221
10	Einspurmodell	223
10.1	Lineares Einspurmodell	223
10.1.1	Bewegungsgleichungen des linearen Einspurmodells	224
10.1.2	Stationäres Lenkverhalten und Kreisfahrt	229
10.1.3	Instationäres Lenkverhalten – Fahrstabilität	232

10.2	Nichtlineares Einspurmodell	233
10.2.1	Kinematik und Kinetik des nichtlinearen Einspurmodells ...	233
10.2.2	Reifenkräfte	236
10.2.3	Antriebs- und Bremsmomente	239
10.2.4	Bewegungsgleichungen	241
10.2.5	Zustandsgleichungen	242
10.3	Lineares Wankmodell	243
10.3.1	Bewegungsgleichung für das Wanken des Aufbaus in der Kurve	245
10.3.2	Dynamische Radlasten	248
10.3.3	Beeinflussung des Eigenlenkverhaltens durch Stabilisatoren ...	250
	Literatur	252
11	Zweispurmodelle	253
11.1	Räumliches Zweispurmodell ohne Radaufhängungskinematik	253
11.1.1	Impuls- und Drallsätze des einfachen räumlichen Zweispurmodells	255
11.1.2	Feder- und Dämpferkräfte des räumlichen Zweispurmodells	258
11.1.3	Impuls- und Drallsätze der Räder	260
11.1.4	Rad-Strasse-Kontakt	260
11.1.5	Antriebsstrang	262
11.1.6	Bremssystem	264
11.1.7	Bewegungsgleichungen	265
11.2	Ein einfaches Zweispurmodell mit kinematischen Radaufhängungen	266
11.2.1	Freiheitsgrade des Zweispurmodells mit kinematischen Radaufhängungen	266
11.2.2	Kinematik des Fahrzeugaufbaus	269
11.2.3	Allgemeine Kinematik der Radaufhängungen	271
11.2.4	Radaufhängung mit Schräglenkern	275
11.2.5	Kinematik der Räder bei der Schräglenkeraufhängung	280
11.2.6	Radkräfte und -momente	282
11.2.7	Aufbaufedern und -dämpfer	283
11.2.8	Windkräfte	284
11.2.9	Lenkung	284
11.2.10	Stabilisator	285
11.2.11	Eingeprägte Kräfte und Momente	286
11.2.12	NEWTON-EULERSche Gleichungen	286
11.3	Ein einfaches Fahrermodell	290
11.3.1	Reglerkonzept	291
11.4	Parametrierung	293
	Literatur	294

12 Räumliche Gesamtfahrzeugmodelle	295
12.1 Modellierung eines Gesamtfahrzeugs	295
12.1.1 Kinematik eines heckgetriebenen Gesamtfahrzeugmodells	296
12.1.2 Kinematik von front- und allradgetriebenen Gesamtfahrzeugmodellen	306
12.1.3 Dynamik des Gesamtfahrzeugmodells	319
12.2 Simulation von Kraftfahrzeugen	320
12.2.1 Aufbau und Konzept von FASIM_C++	321
12.2.2 Modulare Struktur eines Fahrzeugmodells	324
12.2.3 Aufstellen der Bewegungsgleichungen	329
12.2.4 Numerische Integration	336
12.2.5 Behandlung von Ereignissen	339
Literatur	340
13 Modell eines typischen komplexen Gesamtfahrzeugs	343
13.1 Modellierung des Gesamtfahrzeugs	343
13.2 Modellverifikation und -validierung	346
13.2.1 Verifikation	347
13.2.2 Validierung	347
13.3 Parametrisiertes Fahrzeugmodell	355
13.3.1 Vergleich der parametrisierten Modelle mit den validierten Modellen	360
Literatur	363
14 Ausgewählte Anwendungen	365
14.1 Simulation eines Lenkwinkelsprungs (ISO 7401)	365
14.2 Simulation von Fahrzeugüberschlägen	367
14.2.1 Virtuelles Testgelände	371
14.2.2 Simulationsergebnisse	375
14.3 Regelung der Wankdynamik durch aktive Stabilisatoren	387
14.3.1 Passive Stabilisatoren	388
14.3.2 Steifigkeitsverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse	388
14.3.3 Regelung der Wankdynamik durch aktive Stabilisatoren	391
14.3.4 Reglerentwurf	392
14.3.5 Führungs- und Störverhalten	394
14.3.6 Wankmomentenverteilung mit Fuzzy-Logik	394
14.3.7 Wirkprinzip	396
14.3.8 Potential einer Wankmomentenverteilung	397
Literatur	399
Über die Autoren	401
Stichwortverzeichnis	403