
Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Übersicht über die dynamischen Probleme	1
1.2	Aufteilung in Einzelprobleme	3
1.3	Gliederung des Buches	4

Teil I Reifen und Aerodynamik

2	Reifen	9
2.1	Reifeneigenschaften in Umfangsrichtung	10
2.1.1	Radwiderstand	11
2.1.1.1	Rollwiderstand	11
2.1.1.2	Schwallwiderstand	16
2.1.1.3	Lagerreibung, Restbremsmoment	16
2.1.1.4	Weitere Radwiderstände	18
2.1.1.5	Gesamter Radwiderstand	19
2.1.2	Kraftschluss in Umfangsrichtung, Schlupf	19
2.1.2.1	Größe von Haftbeiwerten μ_h	23
2.1.2.2	Zum Verständnis der μ -S-Kurve	27
2.2	Reifeneigenschaften in vertikaler Richtung	28
2.2.1	Druckverteilung im Latsch	29
2.2.2	Reifenfederung und -dämpfung	30
2.2.2.1	Reifenfederkonstante, -subtangente	31
2.2.2.2	Reifendämpfung	32
2.3	Reifeneigenschaften in Seitenrichtung	32
2.3.1	Seitenkraft, Rückstellmoment, Schräglaufwinkel	32
2.3.1.1	Zum Verständnis der Schräglaufcharakteristiken	38
2.3.1.2	Seitenkraftbeiwert (cornering stiffness)	40
2.3.2	Einfluss des Sturzes	42
2.3.3	Schwenkmoment im Stand	43
2.3.4	Einfluss der Umfangskraft auf die Reifenkennlinien	46

	2.3.5	Reifenmodelle	49
	2.3.6	Einlaufverhalten des Reifens	52
3		Aerodynamik des Kraftfahrzeuges	55
	3.1	Luftkräfte und -momente	55
	3.1.1	Anströmgeschwindigkeit und -winkel, Luftdichte	56
	3.1.2	Querspanntfläche	59
	3.2	Luftwiderstand, Luftwiderstandsbeiwerte c_x bzw. c_w	60
	3.3	Auftrieb, Spoiler	64
	3.4	Seitliche Luftbelastungen, Druckmittelpunkt	66
Teil II Antrieb und Bremsung			
4		Einleitung	73
5		Fahrwiderstände, Leistungsbedarf	75
	5.1	Grundgleichung für den Antrieb, Zugkraft	75
	5.2	Radwiderstand des Fahrzeuges	78
	5.3	Steigungswiderstand	79
	5.4	Beschleunigungswiderstand	79
	5.5	Gesamtwiderstand, Moment an den Antriebsrädern	83
	5.6	Leistung an den Antriebsrädern	85
	5.6.1	Radleistung bei Vernachlässigung des Schlupfes	85
	5.6.2	Radleistung bei Berücksichtigung des Schlupfes	86
	5.6.3	Gebräuchliche Umrechnungen	87
6		Leistungsangebot, Kennfelder von Kraftfahrzeugantrieben	89
	6.1	Grundsätzliches zum Kennfeld, ideales Lieferkennfeld	90
	6.2	Kennungen von Antriebsmaschinen (Fahrzeugmotoren)	93
	6.2.1	Dampfmaschine	93
	6.2.2	Elektrische Antriebe	94
	6.2.2.1	Oberleitungsbus	96
	6.2.2.2	Batteriebetriebene Elektroautos	96
	6.2.2.3	Wiederaufladbare Traktions-Batterien	97
	6.2.2.4	Brennstoffzelle	98
	6.2.3	Verbrennungsmotor	99
	6.2.3.1	Kraftstoffe	103
	6.2.4	Hybrid-Antriebe	104
	6.2.5	Gasturbine	106

6.3	Kennungswandler, Zusammenarbeit mit Verbrennungsmotoren	106
6.3.1	Forderungen an das Übersetzungsverhältnis	107
6.3.2	Drehzahlwandler, allgemein	110
6.3.3	Mechanische (Reibungs-) Kupplung	111
6.3.4	Hydrodynamischer Drehzahlwandler (Föttinger-Kupplung) .	111
6.3.5	Drehmomenten-Drehzahl-Wandler, allgemein	114
6.3.6	Zusammenarbeit Verbrennungsmotor und Stufengetriebe . .	115
6.3.7	Automatisierte Schaltgetriebe	117
6.3.8	Doppelkupplungsgetriebe (DCT)	119
6.3.9	Stufenloses Getriebe (CVT)	124
6.3.10	Automatikgetriebe (AT): Zusammenarbeit Verbrennungs- motor und Trilok-Wandler	124
6.4	Brauchbarkeit der Antriebsmaschinen für den Kraftfahrzeugbetrieb . .	127
6.4.1	Vergleich der Volllastkennlinien	127
6.4.2	Massenvergleich, verschiedene Energiespeichersysteme, Reichweite	129
6.4.3	Bemerkungen zu Schadstoffemissionen, Brennstoffzelle	132
7	Fahrleistungen und Kraftstoffverbrauch	137
7.1	Fahrzustandsschaubilder	137
7.2	Höchstgeschwindigkeit in der Ebene, kleinste Übersetzung	140
7.3	Steigfähigkeit bei konstanter Fahrgeschwindigkeit	144
7.3.1	Steigfähigkeit im höchsten Gang, Motor- und Fahrzeug- elastizität	144
7.3.2	Größte Steigfähigkeit, größte Übersetzung, Spreizung	148
7.4	Gefällefahrt	150
7.5	Beschleunigungsfähigkeit in der Ebene	151
7.5.1	Geschwindigkeiten, Wege, Zeiten	152
7.5.2	Einflüsse auf die Beschleunigungsfähigkeit	155
7.5.3	Übersetzung der Zwischengänge	159
7.5.4	Zugkraftunterbrechung	162
7.6	Kraftstoffverbrauch und CO ₂ -Ausstoß	163
7.6.1	Wesentliche Einflüsse auf den Kraftstoffverbrauch	164
7.6.2	Kraftstoffverbrauch bei veränderlichem Motorwirkungsgrad .	167
7.6.3	Verbrauchsgünstige Übersetzung des Kennungswandlers . . .	175
7.6.4	Übersetzung für den Spargang	176
7.6.5	Verbesserung des Motorkennfeldes	178
7.6.6	CO ₂ -Ausstoß	178

8	Fahrgrenzen	183
8.1	Bewegungsgleichungen eines zweiachsigen Fahrzeuges	183
8.2	Kraftschluss an Vorder- und Hinterachse	185
8.3	Kraftschluss bei Vorder- bzw. Hinterachsantrieb	188
8.3.1	Unbeschleunigte Fahrt in der Ebene	191
8.3.2	Steigungsfahrt (unbeschleunigt)	192
8.3.3	Beschleunigte Fahrt (in der Ebene)	194
8.4	Traktionshilfen für den Fahrer, Schlupfregelung, Differenzialsperre ..	196
8.5	Allradantrieb	198
8.5.1	Ideale Momentenaufteilung	198
8.5.2	Reale Momentenaufteilung	201
8.6	Steigungsfahrt von Kraftfahrzeugzügen und Dreiachsern	205
8.6.1	Kraftfahrzeugzüge	205
8.6.2	Dreiachsfahrzeuge	207
9	Bremmung	211
9.1	Umwandlung der Bewegungsenergie in Wärme	212
9.2	Bremsvorgang, Bremswege	215
9.2.1	Bremsvorgang, Reaktionsdauer	215
9.2.2	Anhalteweg, Bremsweg	217
9.2.3	Notbremung, normale Abbremsung	219
9.2.4	Abstände bei Kolonnenfahrt	219
9.3	Abbremsung, maximale Verzögerungen, Gütegrad	222
9.3.1	Definition von Abbremsung, Bremskräfte	222
9.3.2	Bereich der erzielbaren Abbremsung	222
9.3.3	Haftwertausnutzung, Gütegrad, Bremswegverlängerung	224
9.4	Kraftschluss und Abbremsung an einem zweiachsigen Fahrzeug	226
9.5	Stabilität, Lenkfähigkeit, Dosierbarkeit am Bremspedal	230
9.6	Bremskraftverteilung	233
9.6.1	Ideale Bremskraftverteilung	233
9.6.2	Darstellung $B_H = f(B_V)$	234
9.7	Anforderungen an Bremsanlagen, gesetzliche Vorschriften	235
9.8	Blockierverhinderer	237
9.8.1	Elektronische Bremskraftverteilung (EBV)	243
9.9	Blockierendes Rad	244
9.9.1	Lösung im Bereich $0 \leq S \leq S_c$	247
9.9.2	Lösung im Bereich $S_c \leq S \leq 1$	248
9.9.3	Für den Blockiervorgang wichtige Größen	249
9.10	Feste, abgeknickte und beladungsabhängige Bremskraftverteilung ...	250
9.10.1	Feste Bremskraftverteilung	250
9.10.2	Abgeknickte Bremskraftverteilung	252

9.10.3	Beladungsabhängige Bremskraftverteilung	252
9.10.4	Einfluss veränderlicher Fahrgeschwindigkeit	257
9.11	Fußkraft, Bremsassistent	259
9.11.1	Pedalkraft in Abhängigkeit von Verzögerung und Pedalweg . .	260
9.11.2	Bremsassistent	262
9.12	Ausfall von Bremsanlagen	263
9.12.1	Ausfall eines Kreises	264
9.12.2	Bremskraftverstärker-Ausfall	269
9.13	Abbremsung von Kraftfahrzeugzügen	269
9.13.1	Lkw und Mehrachsanhänger	269
9.13.2	Pkw und Einachsanhänger	271
9.13.3	Sattelkraftfahrzeug	273
9.14	Elektrische Bremse, Retarder	275
9.14.1	Bremsen im Triebstrang	275
9.14.2	Bremsen am Rad	277
9.15	Rückgewinnung der Bremsenergie	278
Zusammenfassung von Teil II		285

Teil III Schwingungen

10	Einleitung	291
10.1	Schwingungsersatzsysteme	295
10.1.1	Vereinfachte Schwingungsersatzsysteme	296
11	Einführung, Schwingungsanregung, regellose Schwingungen	301
11.1	Einmassensystem	301
11.1.1	Eigenschwingungen	302
11.1.2	Erregerschwingungen	305
11.2	Fahrzeugtechnische Anwendungen	308
11.2.1	Vergleich hydraulische Dämpfung, Gummi- und Luftdämpfung	309
11.2.2	Verschiedene Anregungen	311
11.2.2.1	Erregerschwingungen durch Unebenheiten	311
11.2.2.2	Erregerschwingungen durch Motoranregung	315
11.2.2.3	Erregerschwingungen durch Rad-Reifenanregungen	315
11.2.3	„Ungefederte“ Kraftfahrzeuge	319
11.2.4	Schwingungseigenschaften von Sitzen	322
11.3	Sinusförmige Anregung	324
11.3.1	Harmonische Anregungen	324
11.3.2	Periodische Anregungen	328

11.4	Stochastische Unebenheiten, statistische Kennzahlen, Spektrale Dichten	334
11.4.1	Stochastische Unebenheiten	334
11.4.2	Statistische Kennzahlen	335
11.4.3	Spektrale Dichten	338
11.5	Spektrale Dichte der Fahrbahnebenen	340
11.5.1	Messergebnisse von $\Phi_h(\Omega)$	341
11.5.2	Anschauliche Deutungen für $\Phi_h(\Omega)$	343
11.5.3	Einzelhindernisse	345
12	Beurteilungsmaßstäbe und ihre Berechnung	349
12.1	Radlastschwankung, Fahrsicherheit, Straßenbeanspruchung	350
12.1.1	Fahrsicherheit	351
12.1.2	Straßenbeanspruchung	353
12.1.3	Radlaststoßfaktor	354
12.2	Federwege	355
12.2.1	Sitzfederweg	355
12.2.2	Radfederweg	356
12.3	Beurteilung der Schwingungseinwirkung auf Fahrzeuginsassen	357
12.3.1	Ganzkörperschwingungen	359
12.3.2	Beurteilung der Schwingungen bei mehreren Einleitungsstellen	360
12.3.2.1	Sinusförmige/Periodische Anregung	361
12.3.2.2	Stochastische Anregung	363
12.3.2.3	Mehrfache Anregungen	365
12.3.3	Beurteilung beim Überfahren von Einzelhindernissen	365
13	Kraftfahrzeug, Unebenheits-Einpunktanregung	369
13.1	Bewegungsgleichungen, bezogene Größen	370
13.2	Stochastische Schwingungen, Vergrößerungsfunktionen, Beurteilungsmaßstäbe	371
13.2.1	Radlastschwankung, Fahrsicherheit	375
13.2.2	Aufbaubeschleunigung, Bewertete Schwingstärke für Hände und Füße	377
13.2.3	Sitzbeschleunigung, Bewertete Schwingstärke auf dem Sitz	377
13.2.4	Dynamische Federwege	378
13.3	Einfluss von Unebenheit und Fahrgeschwindigkeit	379
13.3.1	Betrachtung der maximalen Fahrgeschwindigkeit bezüglich Fahrsicherheit	380
13.4	Überfahren von Einzelhindernissen	381
13.5	Einfluss der Aufbaueigenfrequenz	384

13.6	Einfluss des Aufbaudämpfungsmaßes	387
13.6.1	Optimierung von Federung und Dämpfung, Konflikt-Schaubild	390
13.6.2	Zusammenfassung	393
13.7	Einfluss der Sitzeigenfrequenz und des Sitzdämpfungsmaßes	393
13.8	Einfluss der Radmasse	396
13.9	Einfluss der Reifenfederung	398
13.10	Beladungsabhängigkeiten	400
13.10.1	Einfluss der Beladung	400
13.10.2	Anpassung der Fahrzeugdaten an die Beladung	403
13.11	Hinweise zur schwingungstechnischen Auslegung	407
13.11.1	Hinweise für die Aufbaufederung	407
13.11.2	Hinweise für die Dämpfung, weitere Grenzen für Komfort und Fahrsicherheit	411
13.11.3	Hinweise für Radmasse, Reifen, Sitz und Beladung	413
13.12	Anmerkungen zu nichtlinearen Kennungen	413
13.12.1	Linearisierung nichtlinearer Feder- und Dämpferkennungen	414
13.12.2	Nichtlineare Federkennungen	417
13.12.3	Nichtlineare Dämpferkennung	418
13.12.4	Geknickt-lineare Dämpferkennung	419
13.12.5	Reibungsdämpfung	421
13.12.6	Radabheben	426
13.13	Geregelte Fahrwerke	426
13.13.1	Anforderungen an ideal geregelte Fahrwerke bei Unebenheitsanregung	431
13.13.2	Konflikt Fahrsicherheit – Fahrkomfort, Gewinn mit aktiven Fahrwerken	433
13.13.3	Extremwerte, bester Komfort, keine Radlastschwankung	435
13.13.4	Sky-Hook-Dämpfer	437
14	Zweiachsiges Kraftfahrzeug, Unebenheits-Einspuranregung	443
14.1	Bewegungsgleichungen, komplexe Größen	444
14.2	Vergrößerungsfunktionen und Spektrale Dichten für Systeme ohne Koppelmasse	447
14.2.1	Radlastschwankung, Radfederweg	448
14.2.2	Aufbauhub- und -nickbeschleunigungen	448
14.2.3	Hubbeschleunigung am Sitz	453
14.2.4	Bewertete Schwingstärken	453
14.2.5	Sitzfederweg	455

14.3	Einfluss von Fahrgeschwindigkeit und Fahrzeuggröße	456
14.3.1	Einfluss der Fahrgeschwindigkeit	456
14.3.2	Einfluss der Fahrzeuggröße (Radstand)	458
14.3.3	Einfluss von Fahrzeuggröße und Fahrgeschwindigkeit	459
14.4	Lage der Sitze	460
14.5	Abstimmung zwischen vorderem und hinterem System	462
14.5.1	Unterschiedliche Aufbaueigenfrequenzen	463
14.5.2	Verschiedene Aufbaudämpfungen	466
14.5.3	Mittelwerte über einem Geschwindigkeitsbereich	468
14.6	Einfluss der Beladung	469
14.7	Einfluss von Koppelmasse und Radstand	470
14.7.1	Pkw mit unterschiedlichen Koppelmassen und gleichem Radstand	471
14.7.2	Busse mit unterschiedlichen Radständen und gleichem Nickträgheitsmoment	472
14.8	Hub- und Nickeigenfrequenz, Federkopplung vorn-hinten	475
14.9	Bremsnicken, Nickpol	477
14.10	Einfluss des elastisch gelagerten Antriebsaggregates (Stuckern)	481
14.10.1	Einfluss der Aggregateigenfrequenz	486
14.10.2	Einfluss der Aufhängungsdämpfung	487
14.10.3	Einfluss der Kopplung am Aggregat	487
14.10.4	Einfluss der Aggregatmasse	489
14.10.5	Einfluss der Radeigenfrequenz	490
14.11	Zusammenfassung der Ergebnisse aus diesem Kapitel	490
15	Vierrädriges Kraftfahrzeug, Unebenheits-Zweispuranregung	493
15.1	Bewegungsgleichungen des (vereinfachten) Vierradfahrzeuges	495
15.2	Auto-, Kreuzdichten und Kohärenz der Unebenheiten	498
15.2.1	Vereinfachung nach Parkhilowskij	500
15.2.2	Autospektren der Hub- und Wankanregung, Kohärenz	500
15.2.3	Wegabhängige Spektren	502
15.2.4	Messergebnisse, Näherungsformel für Kohärenz	503
15.3	Streuung bei Zweispuranregung	505
15.4	Einfluss der zusätzlichen Wankschwingungen	507
15.4.1	Vergrößerungsfunktion der Aufbauwankbeschleunigung	507
15.4.2	Bewertete Schwingstärken mit Berücksichtigung der Wank- schwingungen	511
15.4.3	Radlastschwankungen und Radfederwege	512
15.4.4	Geschwindigkeitseinfluss	512
15.4.5	Verallgemeinerung	515
15.5	Wirkung von Stabilisatoren	516
15.6	Zusammenfassung der Ergebnisse aus diesem Kapitel	518

16	Auswirkung von Radaufhängungen bei Unebenheitsanregung	521
16.1	Beschleunigungskopplung, Feder-Dämpferanordnung	522
16.1.1	Gleichungen für ein Fahrzeug mit Längslenker	522
16.1.2	Einfluss der Radaufhängung	525
16.1.3	Einfluss der Kopplung	526
16.2	Modellierung und Beurteilung im höheren Frequenzbereich (Hinweise)	528
16.3	Spurverschiebung (Spuränderung)	532
16.3.1	Seitenkraft am Reifen durch Spurverschiebung	532
16.3.2	Gleichungen für ein Fahrzeug mit Pendelachse	533
16.3.3	Einfluss der Spurverschiebung	534
16.4	Wank- und Seitenschwingungen an einem Fahrzeug mit Starrachsen	537
16.4.1	Bewegungsgleichungen	537
16.4.2	Wankschwingungen, Radlastschwankungen	540
16.4.3	Seitenschwingungen, Seitenkräfte	545
16.5	Zusammenfassung der Ergebnisse aus diesem Kapitel	545
17	Fahrzeug-Längsschwingungen	547
17.1	Längsschwingungen durch Unebenheitsanregung	547
17.1.1	Umfangskraft beim Überfahren von Unebenheiten	547
17.1.2	Fahrzeug-Längsschwingungen mit steifer Lenkerlagerung	550
17.1.3	Anmerkungen	553
17.2	Längsschwingungen durch Motoranregung (Fahrzeugruckeln)	553
17.2.1	Bewegungsgleichungen	554
17.2.2	Zeitverlauf, Vergleich Theorie-Versuch	555
17.2.3	Einfluss der Übersetzung und der Momente	556
17.2.4	Einfluss der Kraftschluss-Schlupf-Beziehung	557
18	Motorerregte Fahrzeugschwingungen	561
18.1	Anregungen durch einen Einzylinder-Motor	562
18.1.1	Kinematik des Kurbeltriebs	562
18.1.2	Massenkraft	563
18.1.3	Massenmoment	564
18.1.4	Gasmoment	567
18.1.5	Gesamte Anregung beim Einzylinder-Motor	568
18.2	Anregungen durch einen 4-Takt-4-Zylinder-Reihenmotor	569
18.2.1	Massenkraft	569
18.2.2	Massen- und Gasmomente	571
18.2.3	Betriebsverhalten	575
18.2.4	Auswirkung ungleicher Verbrennung	579
18.3	Weitere Mehrzylinder-Motoren	580

18.4	Schwingungsanregungen für den Fahrzeugaufbau	580
18.4.1	Schwingungersatzsystem	583
18.4.2	Vorteil einer elastischen Aggregataufhängung	585
18.4.3	Karosserie-Anregungen durch 2. und höhere Ordnungen . . .	585
18.4.3.1	Asymptoten	588
18.4.3.2	Anwendungsbeispiele	590
18.4.4	Anregung durch niedrige Motorordnungen	591
18.4.4.1	Gasmomentenanregung mit niedriger Ordnung, Leerlaufschütteln	593
18.4.4.2	Einfluss der Kopplung am Antriebsaggregat	594
18.5	Auslegung der Aggregataufhängung bei Motoranregungen	595
18.5.1	Auslegung für Massenanregungen	595
18.5.2	Auslegung bei Gasmomentenanregung	596
18.5.3	Gemeinsame Betrachtung von unebenheits- und motor- erregten Schwingungen	597
Zusammenfassung von Teil III		601
 Teil IV Fahrverhalten		
19	Einleitung	607
20	Lineares Einspurmodell, objektive Kenngrößen, Subjektivurteile	613
20.1	Bewegungsgleichungen eines zweiachsigen Kraftfahrzeugs	614
20.1.1	Krümmungsmittelpunkt und Momentanpol	615
20.2	Lenkungeigenschaften	617
20.3	Differenzialgleichungen des linearen Einspurmodells	619
20.3.1	Spezialfall: Fahrt mit konstanter Fahrgeschwindigkeit	621
20.3.2	Berücksichtigung der Reifennachläufe	622
21	Kreisfahrt bei konstanter Fahrgeschwindigkeit	625
21.1	Zentripetalbeschleunigung	625
21.1.1	Maximalwerte (einfache Betrachtung)	625
21.1.2	Werte aus der Linienführung von Straßen	628
21.1.3	Erreichte Zentripetalbeschleunigungen von Durch- schnitts-Fahrern	629
21.1.4	Grenze für die Betrachtung des linearen Einspurmodells	629
21.2	Abhängigkeiten von der Zentripetalbeschleunigung, Kreisfahrtwerte	629
21.2.1	Lenkradeinschlag	630
21.2.2	Vorderradeinschlag, Schräglaufwinkel	635
21.2.3	Schwimmwinkel	636
21.2.4	Stellung des Kraftfahrzeugs im Kreis	637

21.2.5	Moment am Lenkrad	637
21.2.6	Kreisfahrtwerte	637
21.3	Objektive Fahrzeug-Kenngrößen und subjektive Aussagen	638
21.3.1	Unter-/Übersteuern	639
21.3.2	Schwimmwinkelgradient, Lenkwinkel-Schwimmwinkel-Gradient	641
21.3.3	Moment am Lenkrad	644
21.4	Einfluss von Fahrzeugdaten auf das Kreisfahrtverhalten	645
21.4.1	Grundmodell für die Rechnungen	646
21.4.2	Einfluss des Seitenkraftbeiwerts, Bedeutung des Schwimmwinkels	646
21.4.3	Einfluss von Lenkungsdaten	650
21.4.4	Einfluss der Schwerpunktslage	650
21.4.5	Einfluss der Beladung	652
22	Dynamisches Verhalten	657
22.1	Stabilität, Eigenfrequenz, Dämpfung	657
22.1.1	Stabilität und Unter-/Übersteuern	659
22.1.2	Eigenfrequenzen, Dämpfungsmaß	659
22.1.3	Berücksichtigung der seitlichen Eigenanströmung	664
22.2	Lenkverhalten, Zeitfunktionen, Lenkwinkelrampe	665
22.2.1	Laplace-Transformation, Übertragungsfunktion, Verstärkungsfaktor	666
22.2.2	Sprungantwort	667
22.2.3	Lenkwinkelrampe	670
22.2.4	Fahrzeugkennwerte	673
	22.2.4.1 Beurteilung der Fahrzeugkennwerte	674
	22.2.4.2 Fahrzeugdaten – Verstärkungsfaktor – Peak-Response-Time	675
22.2.5	Einfluss von Lenkwinkelrampe und Fahrgeschwindigkeit	676
22.3	Lenkverhalten, Frequenzgänge	679
22.3.1	Erläuterungen zu den Frequenzgängen	680
22.3.2	Beurteilung der Frequenzgänge	683
22.3.3	Einfluss von Fahrzeugdaten	685
22.4	Fahrt auf vorgegebener Bahnkurve, „idealer Fahrer“, Klotoide	685
22.4.1	Stabilität bei vorgegebener Bahnkurve	687
22.4.2	Klotoide	688
22.4.3	Lenkradeinschlag	691
22.5	Fahrverhalten bei losgelassenem Lenkrad (free control)	691
22.5.1	Bewegungsgleichungen	692
22.5.2	Einfluss von Fahrzeugdaten	693

22.6	Seitenwindverhalten	696
22.6.1	Konstanter Seitenwind, stationärer Fall	696
22.6.2	Dynamisches Verhalten	699
22.6.2.1	Waldausfahrt, Seitenwindanlage, Einfluss von Fahrertyp und Fahrzeugdaten	701
22.6.2.2	Frequenzgänge	707
22.6.2.3	Stochastischer Seitenwind	711
22.7	Zusammenfassung von Kap. 20–22	713
23	Regelkreis Fahrer-Kraftfahrzeug	719
23.1	Einführung in den fahrzeugtechnischen Regelkreis	720
23.1.1	Stabilität, Durchtrittsfrequenz, Phasenrand	721
23.1.2	Fahrer-Übertragungsfunktion, McRUER-Modelle	723
24	Querregelung	729
24.1	Normalfahrt	729
24.1.1	Antizipatorische Steuerung	730
24.1.2	Sollspurbildung	735
24.1.3	Kompensatorische Regelung	735
24.1.3.1	Fahrergleichung	738
24.2	Kritische Fahrsituationen	740
24.2.1	Sollspurbildung beim Umfahren eines Hindernisses	740
24.2.2	Regelung, Vergleich „Normalfahrt“ und „Kritische Fahrsituationen“	741
24.2.3	Einfluss von Fahrzeugdaten	742
24.3	Störverhalten, Adaption des Fahrers	743
24.3.1	Geradeausfahrt bei Seitenwind	744
24.3.2	Anpassung des Fahrers an das Fahrzeug	747
24.3.3	Anpassung des Fahrzeuges an den Fahrer	748
24.3.4	Fahrer als adaptiver Regler, Adaption während der Fahrt	749
25	Längsregelung	753
25.1	Normalfahrt, Folgefahrt	753
25.1.1	Fahrzeug-Übertragungsfunktion	754
25.1.2	Vorsteuerung	755
25.1.3	Wunschabstand, Sollwertbildung	755
25.1.4	Kompensatorische Regelung	755
25.2	Kritische Fahrsituation	756
25.2.1	Fahrzeug-Übertragungsfunktion	757
25.2.2	Sollwertbildung	757
25.2.3	Fahrer-Übertragungsfunktion	758

26	Fahrerassistenzsysteme	761
26.1	Fahrdynamikregelung (ESP)	762
26.2	Zusammenfassung von Kap. 23 bis 26	765
27	Kurvengrenzbeschleunigung, Einfluss von Umfangskraft	769
27.1	Bewegungsgleichungen	769
28	Kreisfahrt mit konstanter Fahrgeschwindigkeit	771
28.1	Kurvenwiderstand	771
28.2	Fahrverhalten auf trockener Straße, Vorder-, Hinter-, Allradantrieb	773
28.2.1	Fahrgrenze durch Kraftschluss	774
28.2.2	Lenkradeinschlag, Unter-/Übersteuern	776
28.2.3	Lenkradmoment	782
28.2.4	Schwimmwinkel	782
28.2.5	Einfluss von Schwerpunktslage und Antriebsart	783
28.3	Fahrverhalten auf vereister Fahrbahn	785
28.4	Fahrt auf nasser Straße	787
28.5	Fahrgrenze durch Antriebsleistung	788
29	Quasilineare Betrachtung	791
29.1	Näherung für die Reifenkennlinien	791
29.2	Unter-/Übersteuern	792
29.3	Stabilität	794
29.4	Stabilitätsgrenzen für Fahrzeuge mit verschiedenen Antrieben	795
30	Instationäre Fahrt, Lenkwinkelrampe	797
30.1	Konstante Fahrgeschwindigkeit auf trockener Straße	798
30.2	Konstante Umfangskraft auf trockener Straße	802
30.3	Fahrt auf vereister Fahrbahn	804
30.4	Zusammenfassung von Kapitel 27–30	805
31	Zweispurmodell, Vierradfahrzeug	807
32	Kreisfahrt mit konstanter Fahrgeschwindigkeit	809
32.1	Einfluss von Radlaständerung, Schwerpunktshöhe und Spurweite	809
32.1.1	Seitenkräfte und Radlasten an einer Achse	811
32.1.2	Anwendung auf das Fahrzeug	813
32.1.2.1	Maximale Zentripetalbeschleunigung	813
32.1.2.2	Unter-/Übersteuern	814
32.1.2.3	Schwimmwinkel, Lenkradeinschlag, Lenkradmoment	814
32.1.2.4	Unterschiedliche Radlaständerungen an Vorder- und Hinterachse	816
32.1.3	Kippgrenze	816

32.2	Zusätzlicher Einfluss des Auftriebes	818
32.3	Momentanzentrum, Momentanachse	821
32.4	Berechnung der vertikalen Radlasten und des Wankwinkels	822
32.5	Unterschiedliche Wankfederhärten an Vorder- und Hinterachse, Stabilisator	825
32.6	Verschiedene Radaufhängungen	827
32.7	Zusammenfassung der bisherigen Gleichungen für die stationäre Kreisfahrt	832
32.8	Kinematik und Elastokinematik der Radaufhängungen	834
32.8.1	Kinematik der gelenkten Vorderräder	836
32.8.2	Kinematik der Radaufhängung	837
32.8.3	Elastokinematik der Radaufhängungen	839
32.8.4	Sturz der Räder	840
32.9	Einfluss der Kinematik und Elastokinematik auf das Fahrverhalten . .	841
32.9.1	Vorspur und Umfangskraftlenken	841
32.9.2	Einschläge der gelenkten Vorderräder, Spurdifferenzwinkel . .	843
32.9.3	Wank- und Seitenkraftlenken	843
32.9.4	Sturz	847
32.10	Einfluss des Wankens	848
32.10.1	Größe des Wankwinkels (der Fahrzeugquerneigung)	848
32.10.2	Auswirkungen auf Fahrzeugschwingungen und Reifen- verschleiß	850
32.10.3	Maximale Querb beschleunigung	851
32.11	Lenkung	852
32.11.1	Konventionelle Lenkung	852
32.11.1.1	Geometrische Beziehungen am Vorderrad	852
32.11.1.2	Lenkradmoment	853
32.11.1.2.1	Schnelle Kurvenfahrt, Antrieb und Bremsung .	854
32.11.1.2.2	Langsame Kurvenfahrt	855
32.11.1.2.3	Lenkradmoment im Stand, Lenkungs- verstärkung	856
32.11.1.2.4	Variable Lenkübersetzung	856
32.11.2	Unkonventionelle Lenkungen	856
32.11.2.1	Mechanische Überlagerungslenkung	857
32.11.2.2	„Steer-By-Wire“	859
33	Instationäre Fahrt	863
33.1	Fahrzeugsystem	863
33.1.1	Koordinatensysteme	864
33.1.2	Programmaufbau	867
33.2	Lenkwinkelrampe bei hohen Querb beschleunigungen	867

33.3	Einfluss des dynamischen Wankens	869
33.3.1	Einfluss von Wankfederung und -dämpfung	869
33.3.2	Querbesehleunigung in Kopfhöhe	870
33.4	Lastweehselverhalten aus stationärer Kreisfahrt	872
33.4.1	Bewertungskriterien	874
33.4.2	Einfluss von Fahrzeuggrößen	874
33.4.2.1	Achslaständerung durch Verzögerung	875
33.4.2.2	Umfangskraft, Vorder-, Hinterradantrieb	878
33.4.2.3	Sperrdifferenzial	881
33.4.2.4	Torque Vectoring	881
33.4.2.5	Umfangskraftlenken	883
33.4.3	Ausgangsquerbesehleunigung	886
33.4.4	Zusammenfassung von Abschnitt 33.4	887
33.5	Allradlenkung	888
33.5.1	Querdynamik bei der Allradlenkung	889
33.5.2	Kompensation von Störungen durch die Allradlenkung	892
33.5.3	Zusammenfassung zur Allradlenkung	895
33.6	Zusammenfassung von Kap. 31–33	895
Zusammenfassung von Teil IV		899
Zusammenstellung häufig vorkommender Formelzeichen		901
Sachverzeichnis		911