

Inhaltsverzeichnis

Teil I Definition von Parametern und Kräften, Rad- und Reifeneigenschaften, Normen und Regelungen, 3F-Methodik zur Abbildung des Kundenbetriebs

1	Definition von Parametern und Kräften, Rad, Reifen, Reibkreis, Normen und Regelungen	3
1.1	Koordinatensystem, Schwerpunktlage, Spurkreis	3
1.1.1	Koordinatensystem, Schwerpunktlage	3
1.1.2	Spur- und Wendekreis	6
1.2	Feder- und Dämpferübersetzungen	10
1.3	Räder und Reifen	16
1.3.1	Bezeichnungen und Begriffsdefinitionen	17
1.3.2	Einflussparameter von Rad und Reifen auf das Gesamtfahrzeugverhalten	19
1.3.3	Radradius, Reifenradius	30
1.3.4	Mechanismen zur Entstehung der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn	33
1.3.5	Verlustbehaftetes Abrollen des Rades und Schlupf	35
1.3.6	Reibwert, Kraftschlussbeanspruchung, Kräfte am Reifen	40
1.4	Reifenkräfte, Kraftschluss, Reibkreis (Kamm'scher Kreis)	47
1.4.1	Reibkreise bei unterschiedlichen Fahrmanövern	50
1.4.2	Reibkreise der Räder bei μ -Split	53
1.4.3	Fahrzeugseitige Einflussparameter auf Reibkreis und Beschleunigungspotential des Fahrzeugs	54
1.4.4	Ausnutzung der Reibkreise im Kundenbetrieb	56
1.5	Messung und Schätzung der Fahrzeuggeschwindigkeit	59
1.5.1	Bestimmung der Fahrgeschwindigkeit mittels Raddrehzahl	60
1.5.2	Bestimmung der Fahrgeschwindigkeit mittels GNSS	64
1.5.3	Bestimmung der Fahrgeschwindigkeit mittels Umgebungssensoren	67
1.6	Normen und Regelungen	68
1.6.1	Einteilung der Kraftfahrzeuge	69

1.6.2	Einteilung von Reifen	70
1.6.3	Ausgewählte Normen und Regelungen	74
	Literatur	80
2	3F-Methodik zur Abbildung des Kundenbetriebs	87
2.1	Ziele, Vorgehensweise	87
2.2	Zuordnung der Ziel-Bauteile zu den Komponenten, Modulen und Systemen	88
2.3	Eigenschaften der 3F-Parameter	90
2.4	Ermittlung der 3F-Parameter	93
2.5	3F-Parameterraum der Ziel-Bauteile und Ziel-Komponenten	95
2.6	Simulationsplattform zur 3F-Methodik	98
	Literatur	102
 Teil II Längsdynamische Grundlagen, Antriebe, Getriebe, Energieverbrauch, Bremsen		
3	Einleitung zu Teil II	107
3.1	Inhalt	107
3.2	Parameter der Beispielfahrzeuge	113
4	Fahrwiderstände, Zugkraft	115
4.1	Rollwiderstand	117
4.1.1	Effizienzklassen der Reifen	122
4.1.2	Beispielrechnungen zum Rollwiderstand	124
4.1.3	Rollwiderstandsleistung und -energie	125
4.1.4	Beispiel zur Rollwiderstandsleistung und -energie	126
4.2	Reibwiderstand	127
4.2.1	Reibungsverluste der Radlagerung	128
4.2.2	Reibungsverluste infolge des Restbremsmoments	129
4.2.3	Reibkraft aus Lagerreibung und Restbremsmoment	132
4.2.4	Radlagerreibmoment in der Praxis	134
4.2.5	Restbremsmoment in der Praxis	139
4.3	Steigungswiderstand	142
4.3.1	Detaillierte Betrachtung des Steigungswiderstands	143
4.3.2	Steigungswiderstandsleistung und -energie	144
4.3.3	Beispielbetrachtungen zum Steigungswiderstand	144
4.3.4	Steigungen in der Praxis	147
4.3.5	Einfluss geringer Steigungsveränderung auf die Maximalgeschwindigkeit des Fahrzeugs	148
4.4	Luftwiderstand, Luftkräfte, Luftmomente am Fahrzeug	149
4.4.1	Schräge Anströmung	152
4.4.2	Luftwiderstandsbeiwerte, -kräfte und -momente und ihre Abhängigkeit von dem Anströmwinkel	154
4.4.3	Einflussparameter auf den Luftwiderstand	157
4.4.4	Luftwiderstandsleistung und -energie	159

4.4.5	Beispielrechnungen zum Luftwiderstand	159
4.4.6	Einfluss des Gegenwinds auf die maximale Fahrgeschwindigkeit	162
4.5	Beschleunigungswiderstand	164
4.5.1	Rotatorische Massenträgheitsmomente (MTM).....	165
4.5.2	Beispiel zur Bestimmung der Massenträgheitsmomente im Fahrzeug.....	169
4.5.3	Beschleunigungswiderstand und Drehmassenzuschlagsfaktor ..	171
4.5.4	Beschleunigungswiderstandsleistung und -energie	173
4.5.5	Beispielbetrachtungen zum Beschleunigungswiderstand	174
4.5.6	Beschleunigung von Fahrzeugen in der Praxis.....	177
4.6	Vorspur- und Kurvenwiderstand.....	178
4.6.1	Kurvenwiderstand aus Querb beschleunigung bzw. Fahrgeschwindigkeit	179
4.6.2	Kurvenwiderstand in der Praxis	180
4.6.3	Vorspurwiderstand in der Praxis	182
4.6.4	Vorspur- und Kurvenwiderstandsleistung sowie -energie	182
4.6.5	Beispielbetrachtungen zum Kurvenwiderstand	182
4.7	Herleitung der Zugkraftgleichung	184
4.7.1	Radgleichung, Achsgleichung	185
4.7.2	Quellen der Zugkraft	190
4.7.3	Zugkraftgleichung	192
4.7.4	Zusammenfassung der Fahrwiderstände im Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm	199
4.8	Ermittlung der Fahrwiderstände mittels Ausrollversuch	200
4.8.1	Versuchsdesign	201
4.8.2	Berechnung von Fahrzeugparametern aus einer Ausrollkurve ..	202
4.8.3	Ausrollkurven von verschiedenen Fahrzeugen	206
4.8.4	Versuche am Rollenprüfstand mit einprogrammierter Fahrwiderstandslinie	209
	Literatur	211
5	Rad- und Achskräfte, Kraftschlussbeanspruchung, Haftwertausnutzung .	213
5.1	Längskräfte	213
5.1.1	Näherungsberechnung der Längskräfte	215
5.2	Radlasten, Achslasten	217
5.2.1	Statische Achslasten	218
5.2.2	Dynamische Achslaständerung	220
5.2.3	Achslasten aus Luftkräften	221
5.2.4	Dynamische Rad- bzw. Achslaständerung durch Trägheiten in Antriebsstrang und Fahrwerk	222
5.2.5	Achslaständerung durch Rollwiderstand	225
5.2.6	Zusammenfassung der Achslasten	226
5.3	Kraftschlussbeanspruchung und Haftwertausnutzung	227
5.3.1	Beispiel zur Kraftschlussbeanspruchung verschiedener Antriebs- und Bremskonzepte	231

5.3.2	Haftwertausnutzung	233
5.3.3	Kraftschlussbeanspruchung für ein Fahrzeug mit Strahltriebwerke- oder Raketenantrieb	237
5.3.4	Fahrwiderstandsbeiwerte für Kraftschlussbeanspruchung	238
5.4	Ideale Zugkraftverteilung für Antrieb und Bremsung	246
5.5	Längsdynamische Fahrgrenzen	255
5.5.1	Beschleunigungs- und Steigungsvermögen	255
5.5.2	Traktions- und Haftgrenzen	261
	Literatur	266
6	Antriebsbedarf	267
6.1	Das Bedarfskennfeld am Rad im Z-v-Diagramm	268
6.1.1	Bereich maximaler Zugkraft – Anfahr-, Beschleunigungs- und Steigungsvermögen	270
6.1.2	Bereich maximaler Geschwindigkeit	272
6.1.3	Schubbereich des Bedarfskennfelds am Rad	275
6.2	Das Bedarfskennfeld im P-v-Diagramm	276
6.3	Vergleich der Bedarfskennfelder eines Kompaktklassefahrzeugs und eines SUV	277
6.4	Einfluss von Fahrzeugparametern auf das Bedarfskennfeld	279
7	Energiewandler, Energiespeicher	281
7.1	Energiewandler, Einführung	281
7.2	Verbrennungskraftmaschinen	282
7.3	Elektromaschinen	288
7.4	Leistungselektronik	294
7.5	Vergleich von VKM und EM	295
7.6	Brennstoffzellen	296
7.7	Energiespeicher, Einführung	298
7.8	Batterien	302
7.8.1	Funktionsweise von Batteriezellen	302
7.8.2	Bauformen von Batteriezellen	304
7.8.3	Funktion und Aufbau eines Batteriesystems	306
7.8.4	Batterieparameter	308
7.8.5	Energie- und Leistungsdichten von Batteriesystemen	316
7.9	Kondensatoren	318
7.10	Schwungmassenspeicher	319
7.10.1	Mechanisches Schwungrad	320
7.10.2	Elektromechanisches Schwungrad	321
	Literatur	322
8	Aufgaben und Kinematik der Kennungswandler	325
8.1	Aufgaben der Anfahraggregate	325
8.2	Aufgaben der Getriebe	326
8.3	Kennungswandlung durch Reibkupplung und hydrodynamischen Drehmomentwandler	327

8.4	Kennungswandlung durch Getriebe	329
8.4.1	Auslegung der größten Übersetzung	331
8.4.2	Auslegung der Übersetzung zum Erreichen der Höchstgeschwindigkeit	332
8.4.3	Auslegung der Overdrive-Übersetzungen	334
8.4.4	Auswahl der Zwischenübersetzungen	334
8.5	Zugkraftaufbau beim Anfahren mit Reibkupplungen	339
8.6	Zugkraftaufbau beim Anfahren mit hydrodynamischem Drehmomentwandler	341
	Literatur	342
9	Konzepte und Kennfelder von Antrieben	343
9.1	Nicht elektrifizierte Antriebsstrangkonzpte	347
9.1.1	Antriebskennfelder von nicht elektrifizierten Antrieben	349
9.2	Hybride Antriebskonzepte	351
9.2.1	Add-on-Hybridantriebe	353
9.2.2	Antriebskennfelder von Add-on-Hybridantrieben	356
9.2.3	Konzepte mit dedizierten Hybridgetrieben (DHT)	358
9.2.4	Antriebskennfelder von dedizierten Hybridgetrieben (DHT) ...	360
9.2.5	Brennstoffzellenantriebe (FCEV)	361
9.2.6	Nomenklatur der Hybridantriebe	362
9.3	Elektrische Antriebskonzepte	363
9.3.1	Zentralantrieb	364
9.3.2	Radnaher Antrieb	364
9.3.3	Radnabenantrieb	365
9.3.4	Antriebskennfelder von Elektroantrieben	366
	Literatur	368
10	Anfahraggregate	371
10.1	Reibkupplungen	371
10.1.1	Berechnung der Reibarbeit aus einer Anfahrmessung	376
10.1.2	Trockenlaufende Reibungskupplungen in manuellen Schaltgetrieben (MT) und automatisierten Schaltgetrieben (AMT)	378
10.1.3	Elektrifizierte Kupplungen (E-Clutch) in manuellen Schaltgetrieben (MT)	381
10.1.4	Trockenlaufende Doppelkupplung im DCT	383
10.1.5	Nasslaufende Doppelkupplung im DCT	384
10.1.6	Merkmale und Unterschiede von trocken- und nasslaufenden Doppelkupplungsgetrieben	386
10.2	Hydrodynamischer Drehmomentwandler	388
10.3	Anfahrvorgang mit automatisch schaltenden Getrieben	398
10.3.1	Anfahrmoment und Anfahrbeschleunigung bei automatisch schaltenden Getrieben	398
10.3.2	Einfluss von Temperatur und Höhe auf den Anfahrvorgang ...	400

10.3.3 Vergleich des Anfahrvorgangs mit unterschiedlichen VKM- und Getriebetypen	402
Literatur	406
11 Getriebe	407
11.1 Manuelle Schaltgetriebe (MT - Manual Transmission)	407
11.1.1 Beispiel: MT-Struktur eines Standardantriebs	407
11.1.2 Beispiel: MT-Struktur eines Front-Quer-Antriebs	408
11.1.3 Synchroneinheit	410
11.1.4 Beispiel: CAD-Modell eines MT im Front-Quer-Einbau	411
11.1.5 Betätigungsqualität	412
11.1.6 Repräsentative Kupplungspedalverläufe	414
11.1.7 Ausblick Manuelle Schaltgetriebe (MT)	415
11.2 Automatisierte Schaltgetriebe (AMT - Automated Manual Transmission)	416
11.3 Doppelkupplungsgetriebe (DCT - Dual Clutch Transmissions)	419
11.4 Automatikgetriebe (AT - Automatic Transmission)	425
11.5 Stufenlosgetriebe (CVT - Continously Variable Transmission)	432
11.6 Dedizierte Hybridgetriebe (DHT - Dedicated Hybrid Transmissions)...	436
11.6.1 Serielle Leistungsübertragung	437
11.6.2 Einfluss serieller Leistungsübertragung auf DHT	439
11.6.3 Leistungsübertragung mit Drehzahladdition	440
11.6.4 Einfluss drehzahladdierender Leistungsübertragung auf DHT ..	443
11.6.5 Leistungsverzweigung	443
11.6.6 Einfluss verzweigter Leistungsübertragung auf DHT	456
11.6.7 Praxisbeispiele	458
11.7 Getriebe in elektrischen Antrieben	473
11.7.1 Zentralantrieb mit Differential	473
11.7.2 Radnaher Antrieb	476
11.7.3 Radnabenantrieb	477
11.8 Getriebesynthese	477
11.8.1 Synthese der konventionellen Automatikgetriebe	478
11.8.2 Getriebesynthese der dedizierten Hybridgetriebe (DHT)	481
11.8.3 Getriebesynthese der dedizierten Hybridgetriebe (DHT) mit kombinierter Struktur	483
11.8.4 Bewertung der synthetisierten Getriebekonzepte	486
11.9 Getriebeverluste, Getriebewirkungsgrad	488
11.9.1 Lagerverluste	490
11.9.2 Verzahnungsverluste	494
11.9.3 Dichtungsverluste	496
11.9.4 Verluste von Anfahr- und Schaltelementen	497
11.9.5 Nebenaggregate	503
11.9.6 Wirkungsgradvergleich der Getriebekonzepte	505
11.10 Merkmale und Herausforderungen der Getriebekonzepte	510
Literatur	515

12	Achsgetriebe, Sperren und Allradantriebe	521
12.1	Motivation und Aufbau	522
12.1.1	Querdifferentiale und Quersperren	522
12.1.2	Allradssysteme mit Mittendifferential	527
12.2	Einteilung von Differentialsystemen und Sperren	529
12.2.1	Definition Sperrwert	530
12.2.2	Einteilung nach Regelung	531
12.2.3	Einteilung nach Wirkrichtung	531
12.2.4	Einteilung nach Sperrverhalten	531
12.3	Konzepte von Differentialen und Sperren	532
12.3.1	Konventionelles offenes Differential	533
12.3.2	Starre Verbindung	536
12.3.3	Prinzipieller Aufbau von Differentialen mit formschlüssigen und kraftschlüssigen Sperren	538
12.3.4	Wirkrichtung von Sperrdifferentialen	540
12.3.5	Drehmomentfühlende Sperrdifferentiale	542
12.3.6	Passive drehzahlfühlende Sperren	548
12.3.7	Geregelte Sperren	550
12.3.8	Bremssperrdifferential (BSD)	556
12.3.9	Überlagerungsdifferential	558
12.3.10	Torque Splitter	564
12.3.11	Vergleich von Differentialkonzepten	566
12.3.12	Hybride und elektrische Allradssysteme	569
12.4	Allradgüte, Allradnutzungsgrad: Potential von Allradantrieben	576
12.4.1	Allradgüte	576
12.4.2	Allradnutzungsgrad	578
	Literatur	579
13	Wirkungsgrad und Verlust von Antriebsaggregaten	581
13.1	Wirkungsgrad und Verlust der Batterie	581
13.2	Wirkungsgrad und Verlust der Verbrennungskraftmaschine	584
13.3	Wirkungsgrad und Verlust der Elektromaschine	588
13.4	Wirkungsgrad und Verlust der Brennstoffzelle	591
13.5	Vergleich der Energiewandler hinsichtlich ihrer Wirkungsgrade	594
13.6	Wirkungsgrad und Verlust der Getriebe	595
13.6.1	Elektrische Getriebeverluste	599
13.6.2	Getriebekonzepte für elektrische Antriebe	603
13.7	Wandlungsgüte, Getriebeeffektivität	606
13.7.1	Wandlungsgüte	606
13.7.2	Getriebeeffektivität	612
13.8	Wirkungsgrad und Verlust der Wellen mit Gelenken	617
13.8.1	Kreuzgelenke, Hardyscheiben	618
13.8.2	Gleichlaufgelenke	618
	Literatur	619

14	Fahrzyklen und ihre Kennparameter	621
14.1	Fahrzeug- und zyklusbezogene Kennparameter	622
14.2	Zyklusbezogene Kennparameter	629
14.3	Gesetzliche Zyklen zur Bestimmung von Energieverbrauch und Emissionen	630
14.3.1	Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ)	631
14.3.2	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP)	634
14.3.3	Nordamerikanisches Testverfahren	637
14.3.4	Japanese Cycle (JC08)	643
14.3.5	Vergleich gesetzlicher Zyklen	644
14.4	Kundenbetrieb und realitätsnahe Fahrzyklen	647
14.5	Überprüfung der Real Driving Emissions (RDE)	651
14.5.1	Normalität der CO ₂ -Emissionen	653
14.5.2	Verteilung der Radleistungen	655
14.5.3	Fahrzeugunabhängige Kriterien	656
	Literatur	662
15	Elektrifizierungsgrade und optimale Betriebsstrategie	663
15.1	Nicht elektrifiziertes Fahrzeug (ICV)	664
15.1.1	Rekuperation bei nicht elektrifizierten Fahrzeugen	664
15.2	Batterieelektrisches Fahrzeug (BEV)	667
15.2.1	Rekuperation bei batterieelektrischen Fahrzeugen	668
15.3	Hybridelektrisches Fahrzeug (HEV)	671
15.3.1	Optimale Betriebsstrategie eines Hybridfahrzeugs	672
15.3.2	Optimaler VKM-Betrieb	672
15.3.3	Optimaler Boost-Betrieb	674
15.3.4	Optimale Rekuperation	675
15.3.5	Optimale Lastpunktabsenkung infolge von Rekuperation	676
15.3.6	Optimale Lastpunktabsenkung infolge von Lastpunktanhebung	680
15.3.7	Potentiale von Hybridmodi	687
15.4	Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV)	690
15.4.1	Optimale Betriebsstrategie eines Brennstoffzellenfahrzeugs	691
15.4.2	Optimaler Boost-Betrieb	694
15.4.3	Optimale Rekuperation	694
15.4.4	Optimale Lastpunktabsenkung infolge von Rekuperation	695
15.4.5	Optimale Lastpunktabsenkung infolge von Lastpunktanhebung	697
	Literatur	702
16	Fahrzeug- und fahrzyklusabhängiger Energieverbrauch	703
16.1	Energieverbräuche für Tank-to-Wheel, Battery-to-Wheel, Plug-to-Wheel	704
16.2	Fahrwiderstandsenergie der Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebskonzepten	705
16.3	Energiebedarf durch Nebenverbraucher	707
16.3.1	Rekuperationspotentiale, Voraussetzungen	713
16.4	Energiebedarf durch Antriebsverluste (AV)	715
16.4.1	Antriebsverluste von nicht elektrifizierten Fahrzeugen (ICV)	716

16.4.2	Antriebsverluste von Elektrofahrzeugen (BEV)	717
16.4.3	Antriebsverluste von hybridelektrischen Fahrzeugen (HEV) ...	718
16.4.4	Antriebsverluste von Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV)	721
16.5	Ladeverluste (Plug-to-Battery)	722
16.6	Gesamtenergieverbrauch der Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebskonzepten	723
16.6.1	Energieverbrauch verschiedener Hybridantriebskonzepte	724
16.6.2	Energieverbrauch von Elektrofahrzeugen im Carsharing-Einsatz	729
16.7	Sensitivitätsanalyse bezüglich des Energieverbrauchs für unterschiedliche Antriebe	730
16.7.1	Sensitivitätsanalyse bezüglich des Kraftstoffverbrauchs für ein nicht elektrifiziertes Fahrzeug (ICV)	730
16.7.2	Sensitivitätsanalyse bezüglich des Energieverbrauchs für ein batterieelektrisches Fahrzeug (BEV)	736
16.7.3	Sensitivitätsanalyse bezüglich des Kraftstoffverbrauchs für ein hybridelektrisches Fahrzeug (HEV)	740
16.7.4	Sensitivitätsanalyse bezüglich des Kraftstoffverbrauchs für ein Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV)	749
16.7.5	Zusammenfassung der Sensitivitätsanalyse	751
	Literatur	752
17	Kohlendioxid (CO₂)- und Abgasemissionen	753
17.1	CO ₂ -Emissionen	753
17.1.1	Fossile und biogene Kraftstoffe	754
17.1.2	Elektrische Energie und Wasserstoff	756
17.1.3	Energiepfade der Zukunft	759
17.2	Abgasemissionen von Fahrzeugen	762
17.2.1	Schadstoffgesetzgebung	762
17.2.2	Verbrennung und Emissionen	763
17.2.3	Charakterisierung der stationären Emissionen	765
17.2.4	Emissionsverhalten hinsichtlich der Dynamik	769
17.2.5	Emissionsvergleich RDE-konformer Zyklen	770
	Literatur	772
18	Abbremsung und Bremssysteme	775
18.1	Kinematik der Abbremsung	776
18.1.1	Zeitlicher Ablauf einer Verzögerungsbremmung	777
18.1.2	Berechnung des Anhalte- und Bremswegs, der Anhalte- und Bremsdauer	780
18.1.3	Einflussparameter auf den Bremsweg bei Vollbremsungen, Maßnahmen	782
18.1.4	Bremszeiten, Bremsweg	786
18.1.5	Sicherer Abstand zum vorderen Fahrzeug	787
18.1.6	Auffahrgeschwindigkeit	788
18.2	Praktische Anwendungen der Berechnung zum Bremsweg	790
18.2.1	Adaptiver Notbremsassistent	790

18.2.2	Abstände bei Kolonnenfahrt	795
18.3	Bremskräfte, ideale Bremskraftverteilung, Gütegrad, Blockiergrenzen	797
18.3.1	Gütegrad, Haftwertausnutzung	800
18.3.2	Nasshaftungskennwert im Reifenlabel	801
18.3.3	Grenzen der Abbremsung nach UN/ECE-R13	802
18.3.4	Blockiergrenzen beim Bremsen	804
18.3.5	Regelung der Bremskraftverteilung	806
18.4	Aufbau von Bremsen	808
18.4.1	Prinzipieller Aufbau einer Bremsanlage	809
18.4.2	Trommelbremsen	815
18.4.3	Scheibenbremsen	820
18.4.4	Allgemeine Bemerkungen zu Bremsen	823
18.5	Entstehung der Bremskraft in der hydraulischen Reibungsbremse	823
18.5.1	Schlussfolgerungen für die Bremskraft	826
18.6	Pedalkraft und Verzögerung in Abhängigkeit vom Pedalweg	827
18.7	Innere Übersetzung in Abhängigkeit vom Reibwert	828
18.7.1	Innere Übersetzung der Scheibenbremse	828
18.7.2	Innere Übersetzungen von Trommelbremsen	829
18.7.3	Zusammenfassung: innere Übersetzung C^* , Empfindlichkeit E_0	838
18.8	Antiblockiersystem (ABS)	843
18.8.1	Ablauf der ABS-Regelung	847
18.8.2	Hydraulisches Steuergerät von ABS-Systemen	849
18.9	Hydraulisches Steuergerät des Elektronischen Stabilitäts-Programms (ESP)	850
18.10	Rekuperationsfähige Bremssysteme	852
18.10.1	Verzögerung durch Rekuperationsbremsen	854
18.10.2	Systeme mit erhöhtem Pedalleerweg	857
18.10.3	Elektro-hydraulisches Bremssystem (EHB)	859
18.10.4	Bremssystem mit elektromechanischem Bremskraftverstärker	863
18.10.5	Elektromechanisches Bremssystem (EMB)	866
18.10.6	Elektromechanisches Kombi-Bremssystem	869
	Literatur	870
19	Reduzierung von Bremsnicken und Anfahrnicken	873
19.1	Entstehung und Reduzierung des Bremsnickens	873
19.2	Nickausgleichsgüte bei Bremsung	880
19.3	Nickschwingungen	882
19.4	Einachsbremsung	894
19.5	Entstehung und Reduzierung des Beschleunigungsnickens	894
19.6	Nickausgleichsgüte beim Antrieb	897
19.7	Beschleunigungsnicken bei Einachsantrieben	897
19.8	Bremsnicken bei Rekuperationsbremsung und Mischbremsung	898
19.8.1	Rekuperation	898
19.8.2	Mischbremsung	899

Teil III Querdynamische Grundlagen, Eigenlenkverhalten, Fahrverhalten, Fahrwerkregelsysteme

20	Einleitung zu Teil III	903
20.1	Inhalt	905
20.2	Parameter der Beispielfahrzeuge	912
21	Kinematik und Kräfte bei Kurvenfahrt	917
21.1	Bewegungsparameter des Fahrzeugs in der Kurve	917
21.2	Momentanpol MP, Gierradius ρ_{MP} , Kursmittelpunkt M, Kursradius ρ	920
21.3	Schwimmwinkel	924
21.4	Effektivwinkel	925
21.5	Kinematische Grundgleichung der Kurvenfahrt	927
21.6	Ackermannwinkel ohne und mit Hinterachslenkung	930
21.7	Zentrifugalkraft, Seitenkräfte, Giermoment, Gierwinkelgeschwindigkeit	936
	Literatur	940
22	Eigenlenkverhalten, Einfluss der Reifen, Reifenkräfte	941
22.1	Eigenlenkwinkel und Steuerverhalten	941
22.2	Seitenkraft und Schräglaufwinkel des Reifens	948
22.2.1	Prüfstand zur Ermittlung von Seitenkraft und Rückstellmoment	949
22.2.2	Zur Entstehung von Seitenkraft und Rückstellmoment am Reifen	950
22.3	Bohrmoment des Reifens	953
22.4	Einfluss der Radlast auf die Seitenkraft	955
22.5	Einfluss des Sturzwinkels auf die Seitenkraft	960
22.6	Einfluss der Längskraft auf die Seitenkraft	963
22.7	Weitere Einflussparameter auf die Seitenkraft	965
22.8	Transientes Reifenverhalten, Reifeneinlaufänge	966
22.9	Eigenlenkwinkel durch die Reifenschräglaufwinkel	969
	Literatur	970
23	Kinematik der Radaufhängung, Rückstellmomente am Rad, Lenkradmoment	971
23.1	Grundparameter der Radaufhängung	971
23.2	Auf die Lenkachse bezogene Parameter	980
23.3	Radlenkachse, Radkräfte und ihre Hebelarme zur Radlenkachse	984
23.3.1	Radlenkachse	984
23.3.2	Radkräfte	984
23.3.3	Abstände der Radkräfte zur Radlenkachse	986
23.4	Einfluss des Radlasthebelarms auf das Rückstellmoment und Lenkradmoment	991
23.5	Anteile des Rückstellmomentes am Rad	993
23.6	Gesamtrückstellmoment der Räder	994
23.7	Kinematische Parameter der Radaufhängung und ihr Einfluss auf das Lenkradmoment	995
23.7.1	Einfluss der kinematischen Parameter, Maßnahmen	996

23.7.2	Torque-Steer-Effekt durch unterschiedlich lange Antriebswellen	999
23.7.3	Torque-Steer-Effekt infolge der Sperrdifferentiale	1000
23.8	Lenkradmoment	1001
	Literatur	1004
24	Lenkung, Lenkkinematik, Lenkkraftunterstützung, Reibung, Steer-by-Wire	1007
24.1	Ackermann-Lenkung	1007
24.2	Aufbau des Lenksystems mit Zahnstangenlenkung, Lenkübersetzung	1014
24.3	Konzepte der elektromechanischen Lenkkraftunterstützung (Electric Power Steering EPS)	1018
24.4	Zahnstangenkraft und -leistungsbedarf der Lenkung	1019
24.5	Beispiele der elektromechanischen Lenksysteme	1021
24.6	Hardware-in-the-Loop-Prüfstand für Lenksysteme	1024
24.7	Reibung im Lenksystem sowie ihre Vor- und Nachteile	1025
24.7.1	Messung der Reibung im Lenksystem	1026
24.7.2	Hysterese aus Lenkradmoment und -winkel des aktiven Lenksystems	1028
24.8	Trägheitsmassen und Amplitudenverstärkung des passiven Lenksystems	1030
24.9	Steer-by-Wire-Systeme	1031
24.9.1	Aufbau und Redundanz	1032
24.9.2	Ziele und Unterschiede zu konventionellen Lenksystemen	1034
24.9.3	Lenkgefühl bei Steer-by-Wire-Systemen	1035
24.10	Lenkungssteifigkeit, Einfluss auf Eigenlenkwinkel und Steuerverhalten	1035
24.10.1	Eigenlenkwinkel durch die Lenkungselastizität	1039
24.10.2	Eigenlenkwinkel durch den Schräglaufwinkel und die Lenkungselastizität	1040
	Literatur	1042
25	Wanken, lateraler Radlasttransfer, Wanklenken, Längs- und Seitenkraftlenken	1045
25.1	Wanksteifigkeit, Wankdämpfung	1045
25.1.1	Wanksteifigkeit infolge der Aufbaufederung	1046
25.1.2	Stabilisatoren und ihr Einfluss auf die Wanksteifigkeit	1047
25.1.3	Wanksteifigkeit infolge der Aufbaufederung und Stabilisatoren	1050
25.1.4	Wankdämpfung	1051
25.2	Wankmoment, Wankwinkel, lateraler Radlasttransfer	1051
25.3	Aufstützkraft beim Wanken	1057
25.4	Einfluss der Verteilung des Wankmomentes auf das Steuerverhalten des Fahrzeugs	1059
25.5	Einfluss des statischen Vorspurwinkels auf das Steuerverhalten	1060
25.6	Wanklenken: Änderung der Radlenkwinkel beim Ein- und Ausfedern der Räder	1061
25.7	Seiten-, Umfangskraftlenken: Radlenkwinkeländerung durch Seiten- und Längskraft	1063
	Literatur	1066

26	Zweispurmodell, einfaches und erweitertes Einspurmodell, Fahrmanöver	1067
26.1	Zweispurmodell	1067
26.1.1	Fahrer	1068
26.1.2	Fahrzustand	1071
26.1.3	Aufbau	1074
26.1.4	Antrieb und Bremse	1078
26.1.5	Fahrwerk	1079
26.1.6	Reifen	1081
26.1.7	Regelsysteme	1086
26.2	Einspurmodell	1087
26.2.1	Vereinfachende Randbedingungen	1088
26.2.2	Kinematik des Einspurmodells	1089
26.2.3	Nichtlineares Einspurmodell	1091
26.2.4	Lineares Einspurmodell	1095
26.2.5	Lineares Einspurmodell mit nichtlinearen Reifenkennlinien	1107
26.3	Erweitertes Einspurmodell	1109
26.4	Testverfahren zur Beurteilung des Fahrverhaltens	1110
	Literatur	1111
27	Stationäre Kreisfahrt	1115
27.1	Fahrmanöver zur stationären Kreisfahrt	1115
27.2	Einspurmodell, Steuerverhalten, Kennparameter der stationären Kreisfahrt	1118
27.3	Kennparameter der stationären Kreisfahrt	1122
27.3.1	Trajektorien des Fahrzeugs bei stationärer Kreisfahrt nach der Methode 2b (Tab. 27.1)	1130
27.3.2	Einfluss des Antriebskonzepts auf das Steuerverhalten	1131
27.4	Stationäre Fahrzeugreaktion auf Lenkradwinkel, Verstärkungen	1134
27.5	Parametervariationen	1145
27.5.1	Variation der Reifenseitensteifigkeiten	1147
27.5.2	Variation der Lenkungssteifigkeit und des Gesamtnachlaufs	1148
27.5.3	Variation der Schwerpunktlage	1149
27.6	Einfluss der Bereifung, Kinematik und Elastokinematik auf das Steuerverhalten	1150
27.6.1	Bereifung	1151
27.6.2	Einfluss der Kinematik und Elastokinematik	1151
27.7	Einfluss der Hinterachslenkung auf das stationäre Fahrverhalten	1153
27.8	Schwimmwinkelkompensation	1158
27.9	Kreisfahrtverhalten von Fahrzeugen unterschiedlicher Segmente	1162
27.10	Kreisfahrtverhalten ausgewählter Elektrofahrzeuge	1163
	Literatur	1166

28	Fahrverhalten infolge instationärer und periodischer Anregungen	1167
28.1	Prüfverfahren bei instationären und periodischen Anregungen	1167
28.1.1	Prüfverfahren „Lenkwinkelsprung“ (Kap. 28.3.3), ISO 7401	1167
28.1.2	Prüfverfahren „Sinuslenken“ (Kap. 28.4), ISO 7401	1169
28.1.3	Beschleunigte Kreisfahrt (Kap. 28.8.2)	1170
28.1.4	Lastwechsel im Kreis (Kap. 28.8.3), ISO 9816	1171
28.1.5	Bremsen im Kreis (Kap. 28.8.4), ISO 7975	1172
28.2	Übertragungsfunktionen des Einspurmodells bei dynamischer Lenkradanregung	1174
28.2.1	Zusammenfassung der Übertragungsfunktionen des Einspurmodells	1178
28.3	Dynamisches Verhalten und Beurteilung des Fahrzeugs beim Lenkwinkelsprung	1180
28.3.1	Entstehung der Seitenkräfte beim Lenkwinkelsprung	1180
28.3.2	Einfluss der Massenverteilung des Fahrzeugs beim Lenkwinkelsprung, Stoßmittelpunkt	1181
28.3.3	Instationäre Lösung der Bewegungsgleichung des einfachen Einspurmodells beim Lenkwinkelsprung	1184
28.3.4	Kennparameter zur Beurteilung des Fahrverhaltens beim Lenkwinkelsprung	1187
28.3.5	Parameterstudie beim Lenkwinkelsprung	1190
28.4	Dynamisches Verhalten und Beurteilung des Fahrzeugs beim Sinuslenken	1197
28.4.1	Übertragungsverhalten beim Sinuslenken	1198
28.4.2	Amplituden- und Phasengänge sowie Kennparameter zur Beurteilung des Fahrzeugverhaltens beim Sinuslenken	1199
28.4.3	Parameterstudien beim Sinuslenken	1201
28.5	Dynamisches Verhalten und Beurteilung von Fahrzeugen unterschiedlicher Segmente	1203
28.6	Dynamisches Verhalten und Beurteilung ausgewählter Elektrofahrzeuge	1207
28.7	Dynamisches Wanken	1210
28.7.1	Instationäre Zeitverläufe des Wankwinkels, der Wankwinkelgeschwindigkeit und der Wankwinkelbeschleunigung	1210
28.7.2	Objektivierung des instationären Wankverhaltens	1215
28.8	Beschleunigen, Lastwechsel und Bremsen aus stationärer Kreisfahrt	1219
28.8.1	Einfluss der Beschleunigungs- und Bremskraft am Reifen auf Radlast, Seitenkraft, Seitensteifigkeit und Schräglaufwinkel	1220
28.8.2	Reaktion des Fahrzeuges mit unterschiedlichen Antriebskonzepten auf das Beschleunigen aus stationärer Kreisfahrt	1224
28.8.3	Reaktion des Fahrzeuges mit unterschiedlichen Antriebskonzepten auf Lastwechsel aus stationärer Kreisfahrt	1228
28.8.4	Reaktion des Fahrzeuges auf Bremsen aus stationärer Kreisfahrt	1231
28.9	Seitenwindverhalten	1233

28.9.1	Ermittlung der Seitenwindempfindlichkeit nach ISO 12021 ...	1234
28.9.2	Seitenwind und Fahrerreaktion	1235
28.9.3	Näherungsweise Beschreibung der Seiten-Luftkraft im Einspurmodell	1236
28.9.4	Druckmittelpunkt im Einspurmodell bei Seitenwind	1238
28.9.5	Bewegungsgleichung des Einspurmodells bei Berücksichtigung der Seiten-Luftkraft	1240
28.9.6	Fahrerreaktion basierend auf vereinfachtem Einspurmodell ...	1241
28.9.7	Lenkkorrektur bei Seitenwind	1243
Literatur		1245
29	Aktive Fahrwerksysteme und Regelsysteme	1247
29.1	Überlagerungslenkung, Ziele	1248
29.1.1	Funktionsweise der Überlagerungslenkung	1249
29.1.2	Fahrdynamisches Potential der Überlagerungslenkung	1252
29.1.3	Praxisbeispiele für die Überlagerungslenkung	1254
29.2	Fahrdynamikregelung mit aktivem Lenkeingriff	1259
29.3	Radnahe Aktuatoren für aktiven Lenkeingriff	1262
29.4	Aktive Hinterachslenkung	1263
29.4.1	Fahrdynamisches Potential der Hinterachslenkung	1263
29.4.2	Praxisbeispiele für die Zusatzlenkung der Hinterachse	1266
29.5	Wankstabilisierung mithilfe von aktiven Stabilisatoren	1268
29.5.1	Fahrdynamisches Potential durch aktive Wankstabilisierung ...	1268
29.5.2	Praxisbeispiele für die Wankstabilisierung	1272
29.6	Fahrdynamikvorteile durch asymmetrische Verteilung des Antriebsmomentes	1274
29.6.1	Verbesserte Traktion bei μ -Split	1274
29.6.2	Reduktion der Untersteuertendenz durch die eindrehende, asymmetrische Antriebsmomentenverteilung	1276
29.6.3	Einfluss der Sperrdifferentiale und der Überlagerungs- differentiale auf Lastwechsel aus der stationären und beschleunigten Kreisfahrt	1279
29.6.4	Verbesserung der Fahrzeugreaktion beim Lenkwinkelsprung durch Sperrdifferentiale und Überlagerungsdifferentiale	1281
29.6.5	Vergleich der Sperren und Überlagerungsgetriebe	1283
29.6.6	Ansteuerung und Applikation geregelter Sperrdifferentiale ...	1284
29.6.7	Applikation geregelter Allradsysteme	1293
29.6.8	Torque Vectoring durch radindividuelle elektrische Antriebe ..	1296
29.7	Elektronisches Stabilitäts-Programm (ESP) und weitere Regelsysteme .	1300
29.7.1	Aufbau und Funktionsprinzip des ESP	1300
29.7.2	Kurvenbremsassistent mithilfe des sensitiven ESP	1304
29.7.3	Giermomentenaufbauverzögerung (GMA)	1305
29.7.4	Stabilisierung von Anhängern	1307
29.7.5	Zusatzfunktionen der elektrohydraulischen Bremssysteme ...	1308
Literatur		1309

Teil IV Fahrzeugschwingungen, Fahrbahnanregung, Modelle, dynamischer Sitzkomfort, Aufbaufedern, Aufbaudämpfer

30	Einleitung zu Teil IV	1315
30.1	Inhalt	1317
30.2	Parameter der Beispielfahrzeuge für Vertikaldynamik	1319
	Literatur	1324
31	Funktionen und ihre Kennparameter, Übertragungsverhalten linearer Systeme	1325
31.1	Mittelwert, Effektivwert, Varianz und Standardabweichung	1325
31.2	Harmonische Funktionen	1328
31.3	Periodische Funktion, Fourierreihe	1329
31.3.1	Effektivwert q_{eff} und spektrale Leistungsdichte Φ	1332
31.4	Stochastische und transiente Funktionen	1333
31.5	Diskrete Fourier-Transformation	1334
31.6	Diskretisierung von Funktionen	1337
31.7	Übertragungsverhalten linearer Systeme	1339
	Literatur	1340
32	Fahrbahnanregung	1341
32.1	Beschreibung der Fahrbahnanregung im Weg- und Zeitbereich	1341
32.2	Beschreibung stochastischer Fahrbahnunebenheitsprofile	1347
32.3	Transiente Vorgänge in realen Fahrbahnanregungsfunktionen	1354
32.4	Fahrstreckentyp- und regionsspezifische Belastungszahlen des Fahrwerks	1357
32.4.1	Messverfahren für Fahrbahnunebenheiten	1359
32.4.2	Das Fahrbahnunebenheitsmesssystem FUMS	1360
32.4.3	Schätzverfahren zur Ermittlung von Fahrbahnunebenheiten	1361
	Literatur	1366
33	Modelle zur Vertikaldynamik	1369
33.1	Gesamtfahrzeugmodell für Vertikalschwingungen	1370
33.1.1	Modellbeschreibung	1370
33.1.2	Lösung der Bewegungsgleichung mit Hilfe der Frequenzgangmatrix des M-D-C-Systems	1382
33.1.3	Lösung der Bewegungsgleichung mit Hilfe der Zustandsgleichung und der Modalmatrix	1383
33.1.4	Simulationsergebnisse ausgesuchter Größen für das Gesamtfahrzeugmodell	1386
33.2	Halbfahrzeugmodell	1399
33.2.1	Vereinfachtes Halbfahrzeugmodell	1402
33.2.2	Simulationsergebnisse ausgesuchter Größen für die Halbfahrzeugmodelle	1409
33.3	Viertelfahrzeugmodell als Dreimassenschwinger	1414
33.4	Einmassenschwinger als Viertelfahrzeugmodell	1418
33.4.1	Die Bewegungsgleichung und Lösung des Einmassenschwingers	1419

33.4.2	Übertragungsfunktionen ausgesuchter Größen, basierend auf Einmassenschwingern	1425
33.5	Näherungslösung durch Anstückelung der Einmassenschwinger	1435
	Literatur	1436
34	Beurteilung des dynamischen Sitzkomforts in Pkw	1437
34.1	Objektivierung des Sitzkomforts	1437
34.2	Objektivierung des Sitzkomforts mithilfe des Effektivwerts der Sitzschwingungen	1438
	Literatur	1447
35	Aufbaufedern und Aufbaudämpfer	1449
35.1	Aufbaufedern	1449
35.1.1	Schraubendruckfeder	1450
35.1.2	Luftfederung	1451
35.2	Aufbaudämpfer	1454
35.2.1	Herleitung der Dämpferkraft	1459
35.2.2	Dämpferkennlinie und -arbeit bei geschwindigkeitsproportionalen Dämpfern	1465
35.2.3	Messung der Dämpferkennlinie und -kennfelder	1466
35.3	Geregelte Dämpfungssysteme	1469
	Literatur	1472
	Sachverzeichnis	1473