

Ferit Küçükay

# Grundlagen der Fahrzeugtechnik

Antriebe, Getriebe, Energieverbrauch,  
Bremsen, Fahrdynamik, Fahrkomfort

---

# Grundlagen der Fahrzeugtechnik

---

Ferit Küçükay

# Grundlagen der Fahrzeugtechnik

Antriebe, Getriebe, Energieverbrauch,  
Bremsen, Fahrdynamik, Fahrkomfort

Ferit Küçükay  
Institut für Fahrzeugtechnik  
Technische Universität Braunschweig  
Braunschweig, Deutschland

ISBN 978-3-658-36726-8      ISBN 978-3-658-36727-5 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-36727-5>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2022

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Markus Braun

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

---

# Vorwort

Das vorliegende Buch basiert auf Erfahrungen, die ich während meiner langjährigen Tätigkeit in der Entwicklung der Automobilindustrie sowie in Lehre und Forschung am Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig sammeln konnte.

Die theoretischen Grundlagen der Fahrzeugtechnik bezüglich der Längs-, Quer- und Vertikaldynamik gelten naturgemäß bis heute. Es gibt umfangreiche Literatur darüber und über ihre Anwendungen in der Praxis, nicht zuletzt von meinen für ihre hervorragenden wissenschaftlichen Verdienste auf dem Gebiet der Fahrzeugtechnik vielfach geehrten, renommierten Vorgängern, Herrn Prof. Dr.-Ing. Paul Koeßler (†1987) und Herrn Prof. Dr.-Ing. Manfred Mitschke (†2015).

Die Fahrzeugtechnik befindet sich, wie in allen Bereichen der Technik, im ständigen Wandlungsprozess. Sie ist und wird auf absehbare Zeit insbesondere von der Elektromobilität, Automatisierung und Mobilitätsdienstleistungen geprägt sein, wobei die Digitalisierung in allen genannten Bereichen eine wesentliche Rolle spielt. Entwicklungsschwerpunkte der Fahrzeugtechnik, wie die Elektrifizierung der Antriebe, rekuperationsfähige Bremssysteme, Allrad-, Fahrwerk- und Fahrdynamiksysteme sowie Fahrerassistenz- und automatisierte Fahrfunktionen, lassen sich effektiv nur auf Basis zugehöriger Grundlagen behandeln.

In diesem Sinne besteht das Ziel des vorliegenden Werkes darin, sowohl die Grundlagen ausführlich und möglichst verständlich darzustellen sowie sie an Hand praktischer Anwendungen zu veranschaulichen, als auch die Anforderungen, Konzepte und Funktionen der Bauteile, Sub- und Systemmodule der Fahrzeuge zu beschreiben und Lösungsbeispiele aufzuführen. Die Literaturquellen zur Fahrzeugtechnik als Bücher, Zeitschriften- und Tagungsbeiträge sowie Berichte werden in entsprechenden Textpassagen zitiert und am Ende eines jeweiligen Hauptkapitels aufgelistet. Dieses Buch soll den Studierenden sowie Ingenieurinnen/Ingenieuren in der Forschung und Entwicklung, aber auch den interessierten Praktikerinnen/Praktikern als Lern- und Arbeitshilfe sowie Nachschlagewerk dienen. Es ist in vier Bereiche aufgeteilt:

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

Teil II: Längsdynamische Grundlagen, Antriebe, Getriebe, Energieverbrauch, Bremsen,

Teil III: Querdynamische Grundlagen, Eigenlenkverhalten, Fahrverhalten, Fahrwerkregelssysteme,

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

Zur Entstehung dieses Buchs haben fünf Generationen wissenschaftlicher Mitarbeiter/-innen, Doktorandinnen /Doktoranden und Studierende mit ihren umfangreichen Lehr- und Forschungsaktivitäten, ihren konstruktiv-kritischen Fragen und Diskussionen beigetragen. Ihnen allen gebührt mein Dank. Alle hier namentlich zu erwähnen, würde den Rahmen des Vorworts sprengen. Ich möchte jedoch diejenigen von ihnen, die mich in den letzten Jahren tatkräftig und mit großartigem Einsatz unterstützt haben, namentlich nennen und ihnen besonders danken:

Herrn M.Sc. Marcel Sander für die stets geduldige redaktionelle Betreuung des Buches sowie seinen tatkräftigen und wertvollen Einsatz im Bereich der Längsdynamik, Herrn Dr.-Ing. Andreas Lange für seine vielen wertvollen Ideen und fachlichen Diskussionen, Simulationen sowie seine Mitwirkung am Kapitel Kraftstoff- und Energieverbrauch, Herrn Dr.-Ing. Mark Schudeleit für seine wertvolle Mitwirkung an den Kapiteln Antriebsbedarf, Hybridantriebe und Emissionen, Herrn Dipl.-Ing. Axel Sturm und Herrn M.Sc. Christian Sieg für ihre wertvolle und tatkräftige Mitwirkung an den Kapiteln Hybridantriebe, Energieverbrauch und Energieträger, Herrn Dr.-Ing. Lin Li für seine tatkräftige und wertvolle Mitwirkung bei Hybridantrieben und -getrieben, Herrn Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Carl-Philipp Seekamp für seine tatkräftige und wertvolle Mitwirkung an den Kapiteln Getriebe, Allrad und Sperrdifferenziale, Herrn Dr.-Ing. Benedikt Weiler für seine wertvollen Hinweise und Unterstützung im Bereich Fahrzeugantriebe, Herrn Dr.-Ing. Florian Schober und Herrn Dr.-Ing. Christian Dorsch für ihre tatkräftige Unterstützung in den Kapiteln Anfahraggregate sowie Normen und Regelungen, Herrn Dr.-Ing. Christoph Nippold, Herrn Dr.-Ing. Florian Krauns, Herrn Dr.-Ing. Christian Wagner für ihren wertvollen Einsatz im Kapitel Bremsen und Lenkung, Herrn M.Sc. Arno Ringleb für seine wertvolle Mitwirkung an den Kapiteln RDE (Real Driving Emission) und 3F-Methodik, Herrn M.Sc. Fatim Scheikh Elard für seine wertvolle Unterstützung am Kapitel Lagerreibung und Restbremsmomente, Herrn Dr.-Ing. Tim Seidel für seine tatkräftige Mitwirkung am Kapitel Getriebewirkungsgrad, Herrn Dr.-Ing. Jan Sterthoff und Herrn Dr.-Ing. Felix Tigges für ihre vielen wertvollen Ideen und fachlichen Diskussionen, zahlreichen Simulationen und Messungen in Teil III, Herrn Dipl.-Ing. Bodo Schönemann, Herrn Dr.-Ing. Torben Pawellek, Herrn M.Sc. Janes Iatropoulos für ihre tatkräftige und wertvolle Mitwirkung am Bereich Fahrdynamik und aktive Fahrwerksysteme, Herrn Dr.-Ing. Björn Reuber für seinen wertvollen Einsatz im Kapitel Rad und Reifen, Herrn Dr.-Ing. Waldemar Jarisa für seine Unterstützung im Kapitel Fahrwerkskinematik, Herrn Dr.-Ing. Holger Znamiec, Herrn Dipl.-Ing. Thorsten Meister, Herrn Dr.-Ing. Adrian Sonka, Herrn M.Sc. Torben Hegerhorst, Herrn Dr.-Ing. Haijun Chen, Herrn M.Sc. Leon Ohms, Herrn M.Sc. Xianfeng Zhang, Herrn M.Sc. Andre Kendzia, Herrn Dr.-Ing. Kemal Çalıřkan, Herrn M.Sc. Cord Heer, Herrn M.Sc. Johannes Hengst, Herrn M.Sc. Matthias Werra, Herrn M.Sc. Tim Ahrenhold für ihre tatkräftige Unterstützung in verschiedenen Kapiteln, Herrn Dr.-Ing. Matthias Ristau für die Anfertigung von anschaulichen Schnittbildern und CAD-Zeichnungen verschiedener Antriebs- und Getriebekonzepte sowie seine Mitwirkung am Kapitel Ackermannlenkung, Herrn M.Sc. Gerrit Brandes für seine vielen wertvollen Ideen und fachlichen Diskussionen sowie umfangreichen Simulationen in Teil IV. Ohne ihre Mithilfe wäre dieses Buch nicht gelungen.

Danken möchte ich auch ganz besonders meinem langjährigen Mitarbeiter und Kollegen, Herrn Prof. Dr.-Ing. Roman Henze, für wertvolle Anregungen und das Korrekturlesen des Teils III sowie meinem ebenfalls langjährigen Mitarbeiter, Herrn Dr.-Ing. Gunter Alvermann, für wertvolle Anregungen und das Korrekturlesen der Teile I, II und IV. Ferner danke ich allen hier nicht genannten Kolleginnen/Kollegen und Mitarbeitenden für ihre Unterstützung zum Gelingen dieses Buches. Mein Dank gilt auch den Zulieferern und Automobilfirmen, die Bilder und Informationen zur weiteren Verwendung in diesem Buch zur Verfügung gestellt haben, sowie insbesondere Herrn Markus Braun vom Springer Verlag für die Anregung zu diesem Buch und die stets konstruktive und überaus angenehme Zusammenarbeit.

Mein ganz besonderer Dank gebührt meiner lieben Frau für ihr Verständnis und ihre Unterstützung.

Braunschweig, Dezember 2021

Ferit Küçükay

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wurde im vorliegenden Buch zur Bezeichnung von Funktionen und Personen die maskuline Form gewählt, jedoch werden Personen aller Geschlechter gleichermaßen angesprochen.

---

# Inhaltsverzeichnis

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

<b>1</b>	<b>Definition von Parametern und Kräften, Rad, Reifen, Reibkreis, Normen und Regelungen</b>	<b>3</b>
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 $\mu$ -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
<b>2</b>	<b>3F-Methodik zur Abbildung des Kundenbetriebs</b> .....	<b>87</b>
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
 <b>Teil II Längsdynamische Grundlagen, Antriebe, Getriebe, Energieverbrauch, Bremsen</b>		
<b>3</b>	<b>Einleitung zu Teil II</b> .....	<b>107</b>
3.1	Inhalt .....	107
3.2	Parameter der Beispielfahrzeuge .....	113
<b>4</b>	<b>Fahrwiderstände, Zugkraft</b> .....	<b>115</b>
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 Querbeschleunigung 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
<b>5</b>	<b>Rad- und Achskräfte, Kraftschlussbeanspruchung, Haftwertausnutzung</b> ..	<b>213</b>
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 Strahltriebwerken- 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
<b>6</b>	<b>Antriebsbedarf</b> .....	<b>267</b>
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
<b>7</b>	<b>Energiewandler, Energiespeicher</b> .....	<b>281</b>
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
<b>8</b>	<b>Aufgaben und Kinematik der Kennungswandler</b> .....	<b>325</b>
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
<b>9</b>	<b>Konzepte und Kennfelder von Antrieben</b> .....	<b>343</b>
9.1	Nicht elektrifizierte Antriebsstrangkonzepete .....	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
<b>10</b>	<b>Anfahraggregate</b> .....	<b>371</b>
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
<b>11</b>	<b>Getriebe</b> .....	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

<b>12</b>	<b>Achsgetriebe, Sperren und Allradantriebe</b>	521
12.1	Motivation und Aufbau	522
12.1.1	Querdifferentiale und Quersperren	522
12.1.2	Allradsysteme 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 Sperrdifferentialie	542
12.3.6	Passive drehzahlfühlende Sperren	548
12.3.7	Geregelte Sperren	550
12.3.8	Bremssperrdifferential (BSD)	556
12.3.9	Überlagerungsdifferentialie	558
12.3.10	Torque Splitter	564
12.3.11	Vergleich von Differentialkonzepten	566
12.3.12	Hybride und elektrische Allradsysteme	569
12.4	Allradgüte, Allradnutzungsgrad: Potential von Allradantrieben	576
12.4.1	Allradgüte	576
12.4.2	Allradnutzungsgrad	578
	Literatur	579
<b>13</b>	<b>Wirkungsgrad und Verlust von Antriebsaggregaten</b>	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

<b>14</b>	<b>Fahrzyklen und ihre Kennparameter</b> .....	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 <sub>2</sub> -Emissionen .....	653
14.5.2	Verteilung der Radleistungen .....	655
14.5.3	Fahrzeugunabhängige Kriterien .....	656
	Literatur .....	662
<b>15</b>	<b>Elektrifizierungsgrade und optimale Betriebsstrategie</b> .....	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
<b>16</b>	<b>Fahrzeug- und fahrzyklusabhängiger Energieverbrauch</b> .....	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
<b>17</b>	<b>Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)- und Abgasemissionen</b> .....	<b>753</b>
17.1	CO <sub>2</sub> -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
<b>18</b>	<b>Abbremsung und Bremssysteme</b> .....	<b>775</b>
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
<b>19</b>	<b>Reduzierung von Bremsnicken und Anfahrnicken</b> .....	<b>873</b>
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

<b>20</b>	<b>Einleitung zu Teil III</b> .....	903
20.1	Inhalt .....	905
20.2	Parameter der Beispielfahrzeuge .....	912
<b>21</b>	<b>Kinematik und Kräfte bei Kurvenfahrt</b> .....	917
21.1	Bewegungsparameter des Fahrzeugs in der Kurve .....	917
21.2	Momentanpol $MP$ , Gierradius $\rho_{MP}$ , Kursmittelpunkt $M$ , Kursradius $\rho$ ..	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
<b>22</b>	<b>Eigenlenkverhalten, Einfluss der Reifen, Reifenkräfte</b> .....	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
<b>23</b>	<b>Kinematik der Radaufhängung, Rückstellmomente am Rad, Lenkradmoment</b> .....	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
<b>24</b>	<b>Lenkung, Lenkinematik, Lenkkraftunterstützung, Reibung, Steer-by-Wire</b>	<b>1007</b>
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
<b>25</b>	<b>Wanken, lateraler Radlasttransfer, Wanklenken, Längs- und Seitenkraftlenken</b>	<b>1045</b>
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

<b>26</b>	<b>Zweispurmodell, einfaches und erweitertes Einspurmodell, Fahrmanöver</b>	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
<b>27</b>	<b>Stationäre Kreisfahrt</b>	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

<b>28</b>	<b>Fahrverhalten infolge instationärer und periodischer Anregungen</b>	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

<b>29</b>	<b>Aktive Fahrwerksysteme und Regelsysteme .....</b>	<b>1247</b>
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 $\mu$ -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

<b>30</b>	<b>Einleitung zu Teil IV</b> .....	1315
30.1	Inhalt .....	1317
30.2	Parameter der Beispielfahrzeuge für Vertikaldynamik .....	1319
	Literatur .....	1324
<b>31</b>	<b>Funktionen und ihre Kennparameter, Übertragungsverhalten linearer Systeme</b> .....	1325
31.1	Mittelwert, Effektivwert, Varianz und Standardabweichung .....	1325
31.2	Harmonische Funktionen .....	1328
31.3	Periodische Funktion, Fourierreihe .....	1329
31.3.1	Effektivwert $q_{\text{eff}}$ und spektrale Leistungsdichte $\Phi$ .....	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
<b>32</b>	<b>Fahrbahnanregung</b> .....	1341
32.1	Beschreibung der Fahrbahnanregung im Weg- und Zeitbereich .....	1341
32.2	Beschreibung stochastischer Fahrbahnnunehheitsprofile .....	1347
32.3	Transiente Vorgänge in realen Fahrbahnanregungsfunktionen .....	1354
32.4	Fahrstreckentyp- und regionsspezifische Belastungszahlen des Fahrwerks .....	1357
32.4.1	Messverfahren für Fahrbahnnunehheiten .....	1359
32.4.2	Das Fahrbahnnunehheitsmesssystem FUMS .....	1360
32.4.3	Schätzverfahren zur Ermittlung von Fahrbahnnunehheiten .....	1361
	Literatur .....	1366
<b>33</b>	<b>Modelle zur Vertikaldynamik</b> .....	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
<b>34</b>	<b>Beurteilung des dynamischen Sitzkomforts in Pkw</b> .....	1437
34.1	Objektivierung des Sitzkomforts .....	1437
34.2	Objektivierung des Sitzkomforts mithilfe des Effektivwerts der Sitzschwingungen .....	1438
	Literatur .....	1447
<b>35</b>	<b>Aufbaufedern und Aufbaudämpfer</b> .....	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
	<b>Sachverzeichnis</b> .....	1473



---

## Teil I

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

# Definition von Parametern und Kräften, Rad, Reifen, Reibkreis, Normen und Regelungen

# 1

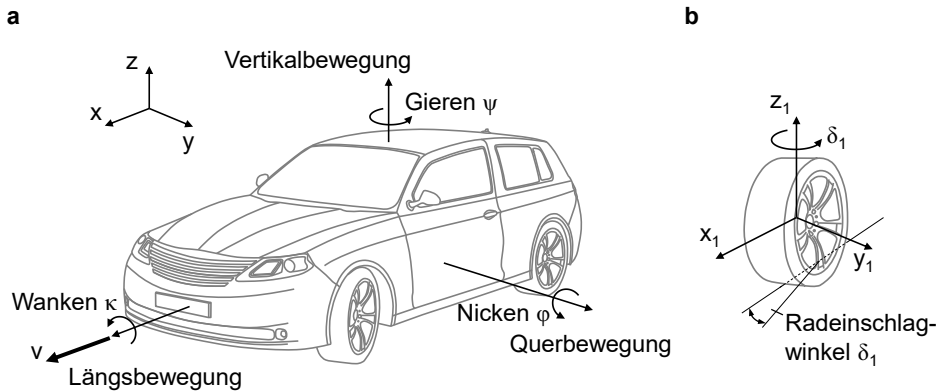
Zum Verständnis der im vorliegenden Buch dargestellten Zusammenhänge ist die Kenntnis der verwendeten Terminologie von maßgeblicher Bedeutung. Aus diesem Grund werden im folgenden Kapitel Parameter, Kräfte und Systeme definiert, welche von Bedeutung für alle behandelten Teilbereiche der Fahrzeugtechnik sind. Zunächst werden das Koordinatensystem und wesentliche geometrische Parameter des Gesamtfahrzeugs und Fahrwerks beschrieben. Ein maßgeblicher Parameter für die Dynamik von Fahrzeugen ist die Fahrgeschwindigkeit, zu deren Ermittlung Verfahren für die Messung und Schätzung vorgestellt werden. Im Zusammenhang mit der Fahrzeuggeschwindigkeit stehen außerdem der Antriebs- und Bremsschlupf. Für einen stabilen Fahrzustand sind die Reifenkräfte und der sogenannte Reibkreis entscheidend. Abschließend wird eine Übersicht ausgewählter wichtiger Normen und Regelungen vorgestellt.

## 1.1 Koordinatensystem, Schwerpunktlage, Spurkreis

Die Kenntnis des Koordinatensystems ist grundlegend zum Verständnis der Zusammenhänge der Fahrzeugdynamik, weshalb ein genormtes Koordinatensystem verwendet wird. Großen Einfluss auf Fahrverhalten und Fahrleistungen hat die Schwerpunktlage, welche ebenfalls nachfolgend definiert wird.

### 1.1.1 Koordinatensystem, Schwerpunktlage

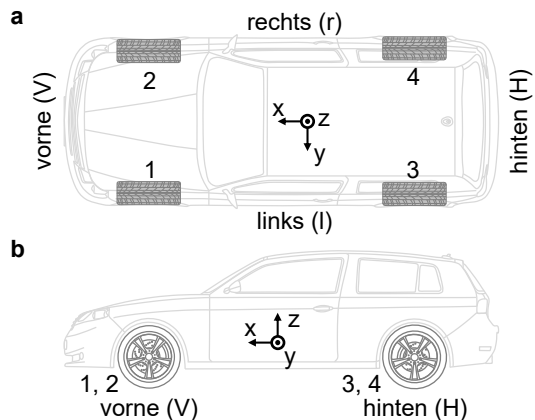
Im vorliegenden Buch werden die Koordinatensysteme nach ISO-Norm 8855 [65] verwendet. Die maßgeblichen und später noch detailliert beschriebenen Bewegungsgrößen und Koordinaten sind in Abb. 1.1 dargestellt. Das fahrzeugfeste rechtshändige, orthogonale Koordinatensystem hat seinen Ursprung im Fahrzeugschwerpunkt. Die x-Achse zeigt entlang der Fahrzeuglängsachse, die y-Achse in Fahrtrichtung nach links und die z-Achse aus der x-y-Ebene hinaus nach oben. Die Drehung um die x-Achse wird als Wanken, um die y-Achse



**Abb. 1.1** Fahrzeugkoordinatensystem nach ISO8855 [65], **a** Bezeichnung der Fahrzeugbewegungen bezüglich der translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade des Aufbaus sowie **b** Koordinatensystem (exemplarisch gezeigt) am Rad 3 (Nummerierung der Räder entsprechend Abb. 1.2)

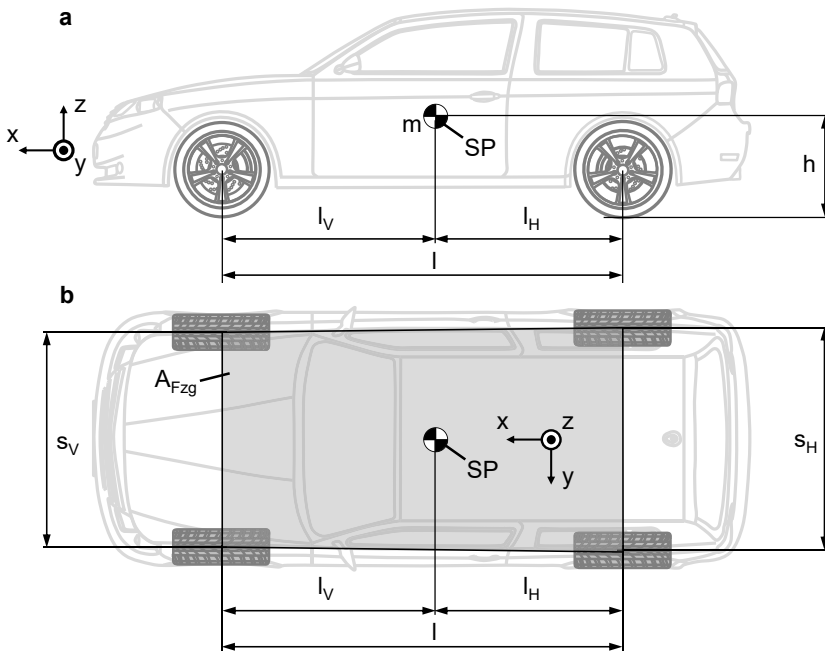
als Nicken sowie um die z-Achse als Gieren bezeichnet. Sie sind positiv für eine Drehung gegen den Uhrzeigersinn mit Blick in negative Achsenrichtung. Die Radeinschlagwinkel  $\delta_1$  bis  $\delta_4$  werden ebenfalls in dieser Drehrichtung beschrieben. Abweichende Definitionen werden an entsprechender Stelle explizit erwähnt.

Die vier Räder des Fahrzeugs werden durchnummeriert, um eine eindeutige Zuordnung von Kräften, Winkeln, Drehzahlen o. ä. zu den Rädern zu ermöglichen. Abb. 1.2a zeigt das Fahrzeug in der Draufsicht mit den vier Rädern 1 bis 4. Das linke Vorderrad erhält den Index 1, das rechte Vorderrad den Index 2. Die beiden Hinterräder entsprechend den Index 3 (hinten links) und 4 (hinten rechts). Für viele Anwendungen können die Räder der Vorder- und Hinterachse jeweils zu einem Rad zusammengefasst und mit den Indizes V (Vorderachse) und H (Hinterachse) versehen werden. In Abb. 1.2b ist dies in der Seitenansicht veranschaulicht.



**Abb. 1.2** Nummerierung und Bezeichnung der Räder und Achsen in der Draufsicht (a) und Seitenansicht (b)

Das Fahrzeug wird für zahlreiche Anwendungen als „Punktmasse“  $m$  im Fahrzeugschwerpunkt (SP) betrachtet. Abb. 1.3a zeigt die geometrischen Größen zur Festlegung der SP-Lage in der  $x$ - $z$ -Ebene. Der Abstand zwischen der Vorder- und Hinterachse wird als Radstand  $l$  bezeichnet. Die Lage des Schwerpunktes wird hier relativ zu Vorder- und Hinterachse sowie der Fahrbahn definiert. Der Schwerpunkt liegt im Abstand  $l_V$ , der Schwerpunktrücklage, hinter der Vorderachse. Dementsprechend wird der Abstand des Schwerpunktes zur Hinterachse als Schwerpunktvorlage  $l_H$  definiert. Darüber hinaus liegt der Schwerpunkt des Fahrzeugs im Abstand der Schwerpunkthöhe  $h$  oberhalb der Fahrbahn. Übliche Werte der Schwerpunkthöhe für Personenkraftwagen (Pkw) liegen im Bereich von  $h = 0,4$  bis  $0,7$  m. Die Schwerpunktlage verschiebt sich in Abhängigkeit von der Beladung des Fahrzeugs. Vereinfachend wird im Rahmen dieses Buchs die Lage des Schwerpunktes in  $y$ -Richtung als konstant in der Fahrzeugmitte angenommen (symmetrisches Fahrzeug). Durch eine ungleichmäßige Beladung des Fahrzeugs kann der Schwerpunkt auch außermittig liegen. Im Vergleich zur Schwerpunktlage in  $x$ -Richtung kann dies jedoch für die meisten Anwendungen vernachlässigt werden. Analog zum Radstand wird der Abstand der Räder einer Achse als Spurweite  $s$  bezeichnet. Die Spurweiten der Vorderachse  $s_V$  und der Hinterachse  $s_H$  sind in Abb. 1.3b dargestellt. Bei Pkw liegt die Spurweite im Bereich von  $s_V, s_H = 1,4$  bis  $1,7$  m. Bei der größeren Spurweite einer Achse kann ein höherer Anteil des Wankmoments abgestützt werden.



**Abb. 1.3** Definition der Schwerpunktlage SP und Fahrzeuggeometrie in **a** der Seitenansicht und **b** der Draufsicht sowie des Radstands  $l$ , der Schwerpunktabstände  $l_V =$  Schwerpunktrücklage,  $l_H =$  Schwerpunktvorlage,  $h =$  Schwerpunkthöhe und Spurweite vorne und hinten  $s_V, s_H$

Die Aufstandsfläche  $A_{Fzg}$  des Fahrzeugs wird durch die vier Radaufstandspunkte gebildet und ergibt sich aus dem Produkt des Mittelwerts der Spurweite der Vorder- und Hinterachse  $s_V, s_H$  und dem Radstand:

$$A_{Fzg} = \frac{s_V + s_H}{2} \cdot l. \quad (1.1)$$

Eine große Aufstandsfläche  $A_{Fzg}$  verleiht einem Fahrzeug in der Regel eine hohe fahrdynamische Stabilität. Entscheidend ist dabei auch das Verhältnis aus Radstand und Spurweite. Im Allgemeinen führt ein großes Radstand-Spurweiten-Verhältnis (langer Radstand, schmale Spur) insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten zu einem stabileren Fahrverhalten, reduziert allerdings auch die Agilität. Demgegenüber ist ein Fahrzeug mit einem geringen Verhältnis von Radstand zu Spurweite (kurzer Radstand, breite Spur) weniger stabil, dadurch jedoch agiler. [98]

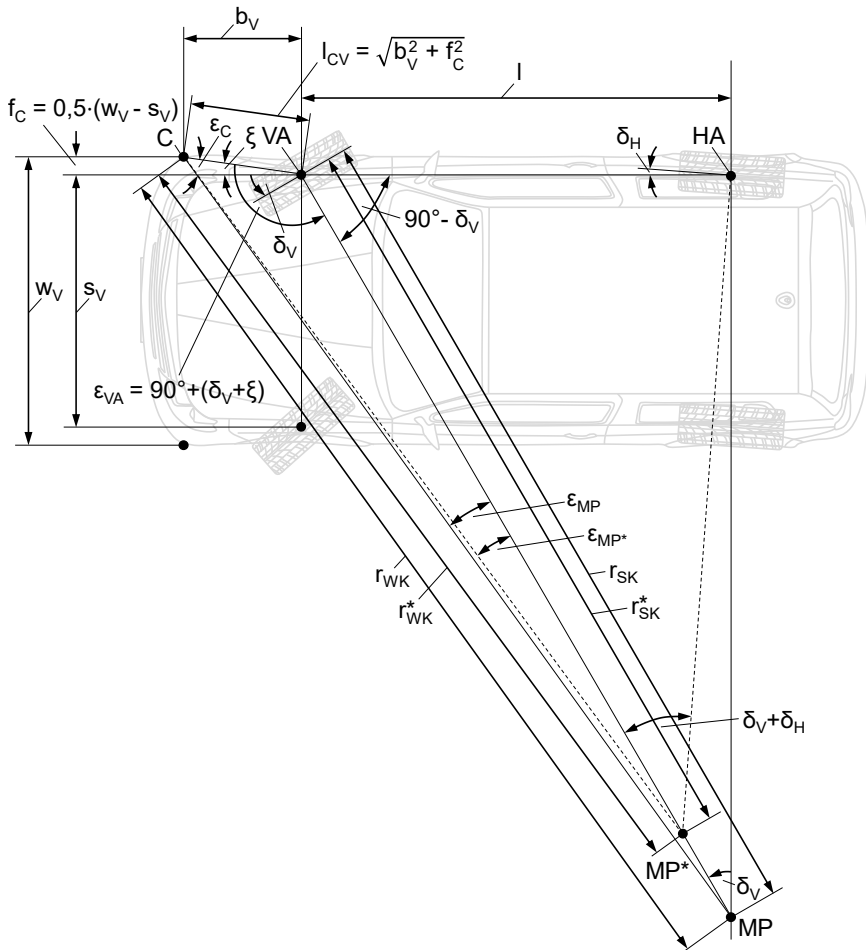
### 1.1.2 Spur- und Wendekreis

Der Spurbkreisradius  $r_{SK}$  ist bei den an der Vorderachse gelenkten Fahrzeugen als der Radius des Kreises, den der Aufstandspunkt des kurvenäußeren Rads bei maximalem Radeinschlag durchfährt, definiert. Der Wendekreisradius  $r_{WK}$  ist näherungsweise als der Radius des Kreises definiert, den der äußere „Eckpunkt“ C der Karosserie unter Berücksichtigung des Überhangs bei maximalem Radeinschlag durchfährt (Abb. 1.4). Als Entwicklungsziel wird dabei ein möglichst geringer Wendekreis angestrebt, um beim Wenden und Rangieren den Komfort zu verbessern. Hierzu können der maximale Radeinschlagwinkel  $\delta_V$  des kurvenäußeren Rads vergrößert oder der Radstand  $l$  verkleinert werden. Dabei ist allerdings zu beachten, dass beim Vorderradantrieb der maximale Radeinschlagwinkel durch die zulässigen Beugewinkel der Antriebsgelenkwellen sowie den Bauraum im Radkasten der Karosserie begrenzt ist. Weiterhin steht – wie bereits in Kap. 1.1.1 erwähnt – ein kleiner Radstand  $l$  im unmittelbaren Zielkonflikt mit der querdynamischen Fahrstabilität, welche einen großen Radstand fordert. Die letztgenannte Herausforderung kann durch eine gelenkte Hinterachse zum Teil entschärft werden.

Zur näherungsweisen Berechnung des Spurbkreisradius  $r_{SK}$  wird das in Abb. 1.4 dargestellte Einspurmodell verwendet. Es wird durch die kurvenäußeren Räder der Vorder- und Hinterachse mit den Aufstandspunkten VA, HA sowie deren Abstand  $l =$  Radstand gebildet. Dabei werden die Lenkrollradien sowie die Differenz der Spurweiten der Vorder- und Hinterachse vernachlässigt. In Abb. 1.4 sind zwei Fälle, nämlich ohne Zusatzlenkung der Hinterachse und mit Zusatzlenkung (hochgestellter Index „\*“, der betreffenden Parameter) dargestellt. Aus dem Dreieck MP-VA-HA erhält man den Spurbkreisradius  $r_{SK}$  ohne Zusatzlenkung der Hinterachse als:

$$r_{SK} = l \cdot \frac{1}{\sin(\delta_V)}. \quad (1.2)$$

Dieser Themenkreis wird in Kap. 24.1 über Ackermann-Lenkung unter Berücksichtigung des Lenkrollradius ausführlicher erläutert.



**Abb. 1.4** Zur Berechnung der Spurkreisradien  $r_{SK}$  und  $r_{SK}^*$  sowie der Wendekreisradien  $r_{WK}$  und  $r_{WK}^*$ , beide ohne und mit Hinterachslenkung anhand des Einspurmodells, das durch die kurvenäußeren Räder mit dem Radstand  $l$  gebildet wird, in Abhängigkeit von der Radeinschlagwinkel  $\delta_V$  der Vorderachse,  $\delta_H$  der Hinterachse, mit den Momentanpolen  $MP$  und  $MP^*$  sowie den Parametern  $b_V$  = Überhang der Karosserie vorne in Längsrichtung,  $f_V$  = Überhang der Karosserie seitlich,  $l_{CV}$  = Abstand zwischen dem Aufstandspunkt des kurvenäußeren Vorderrads und dem äußeren Eckpunkt  $C$  der Karosserie, wobei dieser der halben Differenz zwischen der Spurweite  $s_V$  der Vorderachse und der Breite  $w_V$  des Fahrzeugbuchs entspricht,  $\xi$  = Differenzwinkel zwischen C-VA und Längsachse,  $\epsilon_{VA}$  = Hilfswinkel, der die Seiten C-VA und  $r_{SK}^*$  des Dreiecks C-VA-HA einschließt,  $\epsilon_C$  = Hilfswinkel, der die Seiten  $r_{WK}^*$  und C-VA einschließt,  $\epsilon_{MP^*}$  = Hilfswinkel, der die Seiten  $r_{SK}^*$  und  $r_{WK}^*$  einschließt

Werden die Räder der Hinterachse gegensinnig zu den Rädern der Vorderachse gelenkt, so ergeben sich die Verhältnisse entsprechend dem Dreieck  $MP^*$ -VA-HA in der Abb. 1.4, wobei  $\delta_H$  den Lenkwinkel des kurvenäußeren Rads der Hinterachse bedeutet und wegen des gegensinnigen Einschlags zur Vorderachse einen negativen Wert aufweist. Mit Hilfe