

Bernd Heißing | Metin Ersoy | Stefan Gies (Hrsg.)

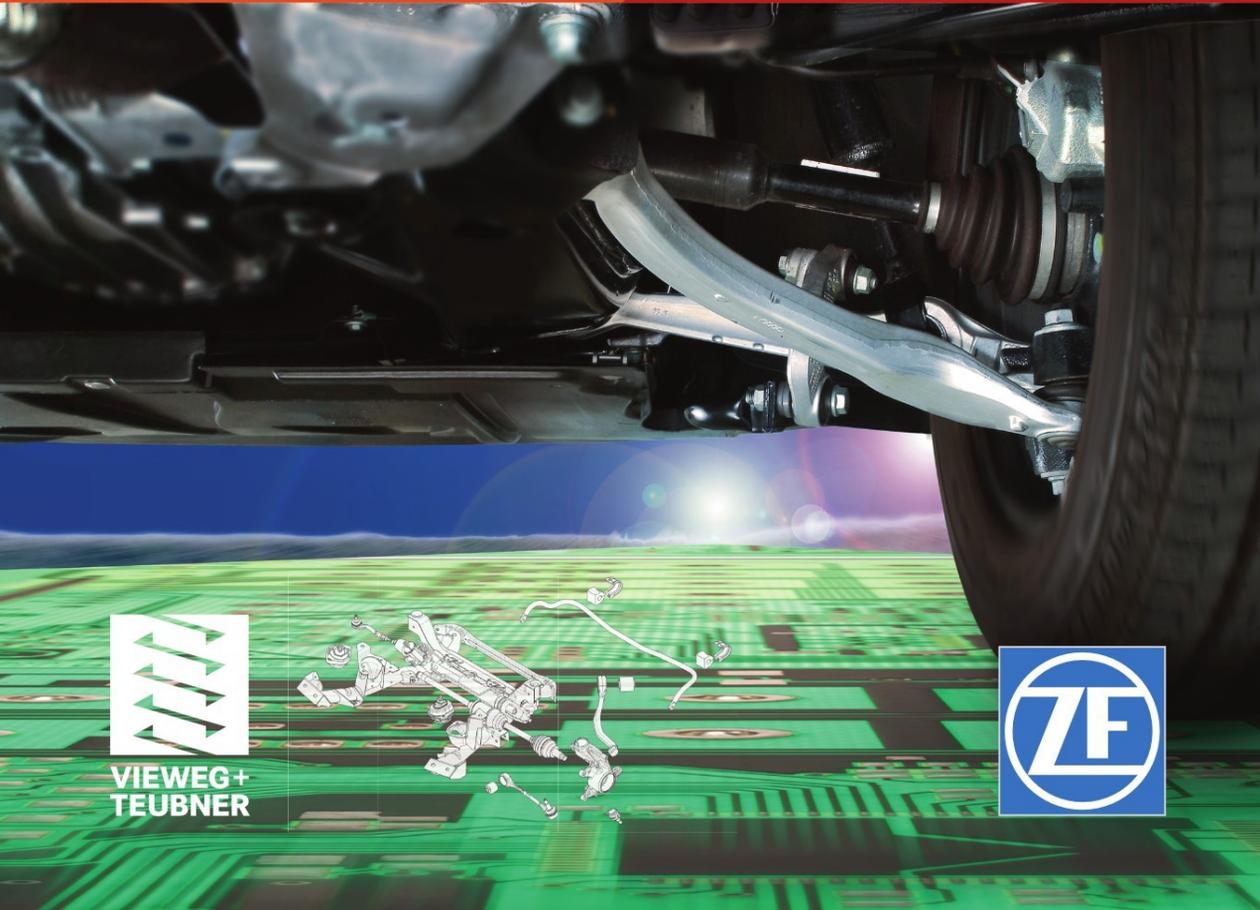
# Fahrwerkhandbuch

Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten,  
Systeme, Mechatronik, Perspektiven

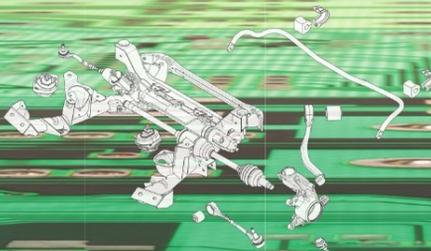
3. Auflage

**ATZ**

**PRAXIS**



**VIEWEG+  
TEUBNER**



Bernd Heißing | Metin Ersoy | Stefan Gies (Hrsg.)

Fahrwerkhandbuch

Bernd Heißing | Metin Ersoy | Stefan Gies (Hrsg.)

# Fahrwerkhandbuch

Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten,  
Systeme, Mechatronik, Perspektiven

3., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 1250 Abbildungen und 84 Tabellen

PRAXIS | ATZ/MTZ-Fachbuch



**VIEWEG+**  
**TEUBNER**

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

Das Fahrwerkhandbuch entstand mit freundlicher Unterstützung der ZF Friedrichshafen AG.  
Zuschriften und Verbesserungsvorschläge werden erbeten unter [Fahrwerkhandbuch@zf.com](mailto:Fahrwerkhandbuch@zf.com).

1. Auflage 2007
- 2., verbesserte und aktualisierte Auflage 2008
- 3., überarbeitete und erweiterte Auflage 2011

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011

Lektorat: Ewald Schmitt | Elisabeth Lange

Vieweg+Teubner Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.

Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

[www.viewegteubner.de](http://www.viewegteubner.de)



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Satz: KLEMENTZ publishing services, Freiburg

Technische Redaktion: Gabriele McLemore

Druck und buchbinderische Verarbeitung: AZ Druck und Datentechnik, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0821-9

# Vorwort

---

Die Fahrwerktechnik nimmt in der Ausbildung des Fahrzeugingenieurs eine zentrale Stelle ein. Obwohl die Fahrwerktechnik sich in den letzten 20 Jahren rasant entwickelte, insbesondere durch den stetigen Einfluss der Elektronik, fehlte es bislang an einem Handbuch, das gleichermaßen die Grundlagen der Konstruktion und Fahrdynamik sowie die Komponenten, Systeme, Mechatronik und die künftigen Entwicklungen aufzeigt.

Auf Anregung des Vieweg Verlags wurde die renommierte Reihe ATZ/MTZ-Fachbuch um ein Handbuch zum Thema Fahrwerktechnik ergänzt. Die besonderen Belange von Automobilherstellern, Zulieferern und Hochschule mussten, ohne zu sehr ins Detail zu gehen, in diesem Handbuch Berücksichtigung finden. Dabei wurde besonderer Wert auf die Aktualität und leichte Lesbarkeit gelegt. Alle Themen sind mit zahlreichen Bildern und Tabellen systematisch, verständlich und übersichtlich dargestellt. Der Detaillierungsgrad ist so gehalten, dass den Fahrwerkentwicklern ein kompletter Überblick über das Arbeitsgebiet, den Applikationsingenieuren der Einblick in die Fahrdynamik moderner Automobile und den Studenten eine vollständige Wissensbasis für den späteren Beruf an die Hand gegeben wird. Gleichzeitig wird ein ausführlicher Ausblick in die Zukunft des Fahrwerks ermöglicht.

In einem ersten Teil werden Konzepte, Auslegung und Aufbau, die physikalischen Grundlagen der Längs-, Vertikal- und Querdynamik erklärt und die Fahrwerkkenngößen mit deren Bedeutung für das Fahrverhalten erläutert. Es schließen sich sehr umfangreiche Beschreibungen der Bestandteile des Fahrwerks wie Bremsen, Lenkung, Federung, Dämpfung, Radführung, Radlagerung bis zu den Reifen und Rädern an. Danach folgt die Darstellung der Achsen und Radaufhängungen. Ein eigener Abschnitt wird dem Fahrkomfort (NVH) mit den Gummiverbundteilen gewidmet. Die modernen Entwicklungsmethoden und -werkzeuge des Entwicklungsingenieurs, welche die Planungs- bis Serieneinführungsphase, das Simulieren und Entwerfen bis zum Validieren des Fahrwerkumfangs umfassen, werden dargestellt. Die Systeme, welche die aktuellen Sicherheits- und Komfortansprüche im Fahrwerk erfüllen und dem Fahrer bei der Fahrzeugführung assistieren, werden zuerst mit ihren Grundlagen und dann mit aktuellen Beispielen vorgestellt; sie umfassen alle elektronischen und mechatronischen Fahrwerksysteme, die aktiv, semi-aktiv, adaptiv oder durch X-by-wire funktionieren, sowie die fahrwerkrelevanten Fahrerassistenzsysteme. Das letzte Kapitel beschäftigt sich mit dem Beitrag des Fahrwerks zum Umweltschutz durch Gewichts-, Fahrwiderstands- und Verbrauchsenkungen. Abschließend werden Konzepte und Systeme für das Fahrwerk von Morgen sowie Fahrwerke für Elektrofahrzeuge untersucht. Vorausschauende und intelligente Fahrwerke und das autonome Fahren sowie die Visionen der „driving chassis“ und „e-corner“ werden diskutiert. In drei alternativen Zukunftsszenarien wird versucht zu prognostizieren, wie das Fahrwerk in 2025 aussehen könnte.

Mit der dritten Auflage wurde das Buch komplett überarbeitet und der Inhalt um ca. 20 % erweitert. Alle Fortschritte der letzten 5 Jahre in der Fahrwerktechnik wurden einbezogen. Zudem wurden mehrere neue Abschnitte aufgenommen, wie z. B. Lenkrad, Räder, Gas-Feder-Dämpfereinheit, Elektrofahrwerke und neueste Fahrerassistenzsysteme. Mit den aktuellsten Fahrwerkentwicklungen und über 500 Literaturhinweisen – ein Großteil davon nach 2000 veröffentlicht – wurde der Stand der Technik im Jahre 2010 umfassend wiedergegeben. Zur besseren Verständlichkeit technischer Erläuterungen wurden außerdem 250 zusätzliche Farbabbildungen erstellt.

Mit der dritten Auflage ist der Kreis der Herausgeber um Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Gies erweitert worden, einem anerkannten Fachmann des Fahrwerks mit langjährigen Universitäts- und Industrieerfahrungen. Somit haben wir sichergestellt, dass das Fahrwerkhandbuch auch in der Zukunft immer aktuell und für alle Fachleute interessant gehalten wird.

In diesem Handbuch haben 35 namhafte Fachexperten von Automobilherstellern, deren Zulieferern und Universitäten ihr aktuelles Wissen zu Papier gebracht. Neben den namentlich erwähnten Autoren, haben viele weitere Fachleute, sei es durch fachliche Diskussion oder Beratung, zum Gelingen des Handbuchs tatkräftig beigetragen; Kurzbeiträge, Empfehlungen, Korrekturen und die Bereitschaft zum fachlichen Gegenlesen haben dabei geholfen. Nicht unerwähnt bleiben sollte die unermüdliche Unterstützung unserer Office-Mannschaft in den Hochschulen (RWTH Aachen und TU München), der Industrie (Audi, Continental, Mubea, Schaeffler KG, FAG, VW, ZF Friedrichshafen) und im Vieweg+Teubner Verlag bei allen organisatorischen Aufgaben. Allen sagen wir an dieser Stelle ein herzliches Dankeschön.

# Autorenverzeichnis

---

Albers, Ingo, Dipl.-Ing. <b>2.3, 2.4, 2.5, 6.5</b>	ZF Lemförder Fahrwerktechnik GmbH & Co. KG, Lemförde <a href="http://www.zf.com">www.zf.com</a>
Binner, Peter, Dipl.-Ing. <b>5.3</b>	ZF Lemförder Boge, Bonn <a href="http://www.zf.com">www.zf.com</a>
Burgstaler, Andree, Dipl.-Ing. <b>3.3.3.9</b>	ZF Lemförder Fahrwerktechnik GmbH & Co. KG, Lemförde <a href="http://www.zf.com">www.zf.com</a>
Causemann, Peter, Dr.-Ing. <b>3.6</b>	ZF Sachs AG, Schweinfurt
Demmerer, Stephan, Dr. rer.nat. <b>9.8</b>	ZF Friedrichshafen AG/ZF-TE, Friedrichshafen <a href="http://www.zf.com">www.zf.com</a>
Elbers, Christoph, Dr.-Ing. <b>2.1, 2.3, 2.4, 6.5, 8.1, 8.2, 8.4, 8.5</b>	ZF Lemförder Fahrwerktechnik GmbH & Co. KG, Lemförde <a href="http://www.zf.com">www.zf.com</a>
Ersoy, Metin, Prof. Dr.-Ing. <b>1, 2, 5, 3.1, 3.2, 3.4.2.3, 3.5.6.9, 4, 5.1, 6, 8.2 bis 8.5, 8.8, 9.2 bis 9.4, 9.6, 9.7, 9.9</b>	ZF Lemförder Fahrwerktechnik GmbH & Co. KG, Lemförde <a href="http://www.zf.com">www.zf.com</a>
Eulenbach, Hans-Dieter, Dr.-Ing. <b>3.5.7, 3.6.8.3</b>	ZF Sachs AG, Troisdorf
Gädke, Alexander, Dipl.-Ing. <b>3.4</b>	ZF Lenksysteme GmbH, Schwäbisch Gmünd
Gies, Stefan, Prof. Dr.-Ing. <b>1.3, 3.4.4, 4.3, 4.7, 9.9</b>	Volkswagen AG, Wolfsburg <a href="http://www.volkswagen.de">www.volkswagen.de</a>
Giltsdorf, Hans Joachim, Dipl.-Ing. <b>3.6</b>	ZF Sachs AG, Schweinfurt
Gold, Martin, Prof. Dr.-Ing. <b>3.6.9</b>	früher: FH Bingen, Bingen
Greul, Roland, Dipl.-Ing. <b>3.4</b>	ZF Lenksysteme GmbH, Schwäbisch Gmünd
Gruber, Steffen, Dipl.-Ing. <b>3.3</b>	Continental Teves AG & Co. oHG, Frankfurt a. M. <a href="http://www.contiteves.com">www.contiteves.com</a>
Heißing, Bernd, Univ.-Prof. Dr.-Ing. <b>1.3, 2.7, 4.1 bis 4.3, 4.7, 9.1, 9.7, 9.9</b>	Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (FTM) Technische Universität München <a href="http://www.ftm.mw.tum.de">www.ftm.mw.tum.de</a>
Hoffmann, Carsten, Dr.-Ing. <b>7.1, 7.2, 8.1 bis 8.3, 8.5</b>	Porsche AG, Weissach <a href="http://www.porsche.de">www.porsche.de</a>
Hüsemann, Thomas, Dipl.-Ing. <b>2.1 bis 2.3, 2.5, 2.6</b>	Institut für Kraftfahrwesen (IKA) RWTH Aachen, Aachen <a href="http://www.ika.rwth-aachen.de">www.ika.rwth-aachen.de</a>
Kramer, Klaus, Dipl.-Ing. <b>5.4 bis 5.6</b>	ZF Lemförder Boge, Damme <a href="http://www.zf.com">www.zf.com</a>
Krimmel, Horst, Dr. rer. nat. <b>7.2 bis 7.8</b>	ZF Friedrichshafen AG/ZF-TE, Friedrichshafen <a href="http://www.zf.com">www.zf.com</a>
Mundl, Reinhard, Dipl.-Ing., Dr. Tech. <b>3.9</b>	Continental AG, Hannover

---

Neubrand, Jörg, Dr.-Ing. <b>3.5</b>	Mubea Fahrwerksfedern GmbH, Attendorn <a href="http://www.mubea.com">www.mubea.com</a>
Ocvirk, Norbert, Dipl.-Ing. <b>3.3</b>	Continental Teves AG & Co. OHG, Frankfurt a. M. <a href="http://www.contiteves.com">www.contiteves.com</a>
Partheymüller, Peter, Dr.-Ing. <b>3.8</b>	Schaeffler KG FAG, Schweinfurt <a href="http://www.fag.com">www.fag.com</a>
Plank, Robert, Dr.-Ing. <b>3.8</b>	Schaeffler KG FAG, Schweinfurt <a href="http://www.fag.com">www.fag.com</a>
Remfrey, James, Dipl.-Ing. <b>3.3</b>	Continental Teves AG & Co. oHG, Frankfurt a. M. <a href="http://www.contiteves.com">www.contiteves.com</a>
Rosemeier, Thomas, Dr.-Ing. <b>3.2</b>	ZF Friedrichshafen AG/ZF-TE, Friedrichshafen <a href="http://www.zf.com">www.zf.com</a>
Sauer, Wolfgang, Dr.-Ing. <b>5.1, 5.2</b>	Novisys, Bad Soden
Schäfer, Burkhardt, Dipl.-Ing. <b>3.4.3</b>	ZF-LS Bremen, Nacam Deutschland GmbH, Bremen <a href="http://www.zf-lenksysteme.com">www.zf-lenksysteme.com</a>
Schick, Bernhard, Dipl.-Ing. <b>3.9.6.4, 3.9.7, 3.9.8</b>	IPG Automotive GmbH, Karlsruhe <a href="http://www.ipg.de">www.ipg.de</a>
Schimmel, Christian, Dr.-Ing. <b>2.7, 2.8, 8.6 bis 8.8, 9.1, 9.5</b>	Audi AG, Ingolstadt <a href="http://www.audi.de">www.audi.de</a>
Schröder, Carsten, Dipl.-Ing. <b>3.9</b>	Continental AG, Hannover <a href="http://www.conti.de">www.conti.de</a>
Siemer, Hubert, Dipl.-Ing. <b>5.7 bis 5.9</b>	ZF Lemförder Boge, Damme <a href="http://www.zf.com">www.zf.com</a>
Volk, Heiner, Dipl.-Ing. <b>3.9</b>	Continental AG, Hannover <a href="http://www.conti.de">www.conti.de</a>
Vortmeyer, Jens, Dipl.-Ing. <b>8.4.3</b>	ZF Lemförder Fahrwerktechnik GmbH & Co. KG, Lemförde <a href="http://www.zf.com">www.zf.com</a>
Wies, Burkhard, Dr.-Ing. <b>3.9</b>	Continental AG, Hannover <a href="http://www.conti.de">www.conti.de</a>

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1 Einleitung und Grundlagen</b>	1
1.1 Geschichte, Definition, Bedeutung	2
1.1.1 Entstehungsgeschichte	2
1.1.2 Definition und Abgrenzung	8
1.1.3 Aufgabe und Bedeutung	8
1.2 Fahrwerk Aufbau	9
1.2.1 Fahrzeugklassen	9
1.2.2 Antriebskonzepte	11
1.2.3 Fahrwerkkonzeption	14
1.2.4 Trends in der Fahrwerkkonzeption	14
1.3 Fahrwerksauslegung	16
1.3.1 Anforderungen an das Fahrwerk	17
1.3.2 Fahrwerk-Kinematikauslegung	19
1.3.3 Kinematik der Radaufhängung	19
1.3.3.1 Kenngrößen des Fahrwerks am Fahrzeug	19
1.3.3.2 Momentanpole der Radaufhängung	21
1.3.3.3 Radhubkinematik	22
1.3.3.4 Kenngrößen der Radhubkinematik	22
1.3.3.5 Kenngrößen der Lenkkinematik	25
1.3.3.6 Kinematische Kennwerte aktueller Fahrzeugmodelle	29
1.3.3.7 Raderhebungskurven	29
1.3.3.8 Software zur Radkinematikberechnung	32
1.3.4 Elastokinematik und Bauteilelastizitäten der Radaufhängung	33
1.3.5 Zielwerte für die Kenngrößen	34
1.3.6 Synthese der Radaufhängungen	34
<b>2 Fahrdynamik</b>	37
2.1 Fahrwiderstände und Energiebedarf	38
2.1.1 Fahrwiderstände	38
2.1.1.1 Radwiderstände	38
2.1.1.2 Anteil der Fahrbahn $F_{R,Tr}$	42
2.1.1.3 Luftwiderstand	46
2.1.1.4 Steigungswiderstand	46
2.1.1.5 Beschleunigungswiderstand	48
2.1.1.6 Gesamtfahrwiderstand	49
2.1.2 Seitenwindkräfte	49
2.1.3 Leistungs- und Energiebedarf	52
2.1.4 Kraftstoffverbrauch	53
2.2 Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn	55
2.2.1 Physik der Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn	57
2.2.1.1 Bremsen und Antreiben	60
2.2.1.2 Kurvenfahrt	62
2.2.2 Reifenkräfte im Detail	66
2.2.3 Wirkung der Reifenkräfte auf die Fahrstabilität	68
2.3 Längsdynamik	69
2.3.1 Anfahren und Bremsen	70
2.3.1.1 Bremsnickausgleich	70
2.3.1.2 Anfahrnickausgleich	71
2.3.1.3 Lastwechsel bei Geradeausfahrt	71
2.4 Vertikaldynamik	72
2.4.1 Aufbaufedern	72
2.4.1.1 Federübersetzung	73
2.4.1.2 Eigenfrequenzen	73
2.4.2 Schwingungsdämpfer	74

2.4.3	Fahrbahn als Anregung	75
2.4.3.1	Harmonische Anregungen	75
2.4.3.2	Periodische Unebenheiten	76
2.4.3.3	Stochastische Unebenheiten	76
2.4.3.4	Spektrale Dichte der Fahrbahnunebenheiten	77
2.4.3.5	Gemessene, reale Fahrbahnunebenheiten	77
2.4.4	Zweimassen Feder-Dämpfersystem mit dem Reifen als Federelement	78
2.4.5	Federungsmodelle	80
2.4.5.1	Einmassen-Ersatzsystem	80
2.4.5.2	Zweimassen-Ersatzsystem	80
2.4.5.3	Erweiterung um Sitzfederung	81
2.4.5.4	Einspur-Federungsmodell	82
2.4.5.5	Zweispur-Federungsmodell	83
2.4.6	Parametervariation	85
2.4.7	Verknüpfung Fahrbahn–Fahrzeug	87
2.4.7.1	Spektrale Dichte der Aufbaubeschleunigung	88
2.4.7.2	Spektrale Dichte der Radlastschwankungen	89
2.4.8	Menschliche Schwingungsbewertung	90
2.4.9	Erkenntnisse aus den vertikaldynamischen Grundlagen	91
2.5	Querdynamik	92
2.5.1	Anforderungen an das Fahrverhalten	92
2.5.2	Lenkkinematik	93
2.5.2.1	Statische Lenkungsauslegung	94
2.5.2.2	Dynamische Lenkungsauslegung	94
2.5.3	Fahrzeugmodellierung	95
2.5.3.1	Einfaches Einspurmodell	95
2.5.3.2	Einfache Betrachtungen der Fahrdynamik	97
2.5.3.3	Bewegungsvorgänge beim Über- und Untersteuern	100
2.5.3.4	Erweitertes Einspurmodell mit Hinterradlenkung	100
2.5.3.5	Nichtlineares Einspurmodell	102
2.5.3.6	Instationäre Betrachtungen des einfachen Einspurmodells	103
2.5.4	Die Regelstrecke „Fahrzeug“ im Regelkreis	106
2.5.4.1	Dynamisches Verhalten der Regelstrecke Fahrzeug	106
2.5.4.2	Schwimmwinkelkompensation mittels Hinterradlenkung	109
2.5.5	Frequenzgangbetrachtung bei variierten Fahrzeugkonfigurationen	110
2.5.5.1	Variation der Fahrgeschwindigkeit	111
2.5.5.2	Variation des Gierträgheitsmomentes	111
2.5.5.3	Variation der hinteren Schräglaufsteifigkeit	111
2.5.6	Zweispur-Fahrzeugmodellierung	112
2.5.7	Parametervariation	115
2.5.7.1	Variation der Schwerpunkthöhe (Variante 1)	115
2.5.7.2	Variation der Schwerpunktlage in Längsrichtung (Variante 2)	116
2.5.7.3	Variation der Wankachse (Variante 3)	116
2.5.7.4	Variation der Wankfederverteilung (Variante 4)	117
2.5.7.5	Variation des Antriebskonzepts (Variante 5)	118
2.6	Allgemeine Fahrdynamik	119
2.6.1	Wechselwirkungen zwischen Vertikal-, Längs- und Querdynamik	119
2.6.1.1	Vertikalkraftschwankungen	119
2.6.2	Kritische Fahrsituationen	120
2.6.2.1	Bremsen in der Kurve	120
2.6.2.2	Beschleunigte Kurvenfahrt	121
2.6.2.3	Lastwechsel in der Kurve	122
2.6.2.4	Vertikalanregung durch Fahrbahnunebenheiten bei Kurvenfahrt	123
2.6.2.5	Bremsen und Anfahren auf einer inhomogenen Fahrbahnoberfläche ( $\mu$ -Split)	123
2.7	Fahrverhalten	124
2.7.1	Beurteilung des Fahrverhaltens	125
2.7.2	Fahrmanöver	126
2.7.3	Fahrmanöver Parameterraum	129
2.7.4	Abstimmungsmaßnahmen	131
2.7.4.1	Abstimmungsmaßnahmen zum stationären Lenkverhalten	131

2.7.5	Subjektive Fahrverhaltensbeurteilung	131
2.7.5.1	Bewertungsmethoden und Darstellung	131
2.7.5.2	Anfahrverhalten	134
2.7.5.3	Bremsverhalten	134
2.7.5.4	Lenkverhalten	134
2.7.5.5	Kurvenverhalten	138
2.7.5.6	Geradeausfahrt	138
2.7.5.7	Fahrkomfort (subjektiv)	138
2.7.6	Objektive Fahrverhaltensbeurteilung	143
2.7.6.1	Messgrößen	143
2.7.6.2	Anfahrverhalten	143
2.7.6.3	Bremsverhalten	144
2.7.6.4	Lenkverhalten	146
2.7.6.5	Kurvenverhalten	147
2.7.6.6	Geradeausfahrt	149
2.7.6.7	Fahrkomfort (objektiv)	151
2.8	Aktive und passive Sicherheit	151
<b>3</b>	<b>Bestandteile des Fahrwerks</b>	<b>155</b>
3.1	Struktur des Fahrwerks	155
3.1.1	Funktionelle Struktur des Fahrwerks	155
3.1.2	Modulare Struktur des Fahrwerks	156
3.1.3	Bestandteile des Fahrwerks	156
3.2	Antriebsstrang	157
3.2.1	Anordnungen	157
3.2.2	Achsgetriebe	157
3.2.2.1	Differenziale	157
3.2.2.2	Sperrdifferenziale	158
3.2.2.3	Aktive Sperrdifferenziale	159
3.2.2.4	Torque Vectoring	159
3.2.3	Allradantrieb (Längsverteiler)	161
3.2.4	Allradantrieb (Längs-/Querverteiler)	162
3.2.5	Betriebsstrategien	163
3.2.6	Aktuelle Allradsysteme	163
3.2.7	Seitenwellen	165
3.3	Radbremsen und Bremssysteme	166
3.3.1	Aufgaben und Grundlagen	166
3.3.2	Arten von Bremsanlagen	167
3.3.2.1	Allgemeine Anforderungen	167
3.3.3	Gesetzliche Vorschriften	169
3.3.4	Auslegung der Bremsanlage	169
3.3.4.1	Bremskraftverteilung	169
3.3.4.2	Dimensionierung	171
3.3.4.3	Bremsskennung	171
3.3.5	Bremsmomente und Dynamik	172
3.3.5.1	Bremsmomente	172
3.3.5.2	Bremsdynamik	173
3.3.6	Komponenten des Bremssystems	173
3.3.6.1	Bremssattel	174
3.3.6.2	Bremsscheiben	178
3.3.6.3	Bremssbeläge	179
3.3.6.4	Trommelbremsen	179
3.3.6.5	Bremsleitungen und -schläuche	181
3.3.6.6	Bremsflüssigkeit	181
3.3.6.7	Bremskraftverstärker	182
3.3.6.8	Tandem-Hauptzylinder	184
3.3.6.9	Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI)	185
3.3.7	Elektronische Bremsregelsysteme	189
3.3.7.1	Bremsassistent (MBA, EBA, HBA)	189
3.3.7.2	Hydraulisch/Elektronische Regeleinheit (HECU)	191

3.3.7.3	Raddrehzahlsensor	192
3.3.7.4	Funktionen der elektronischen Bremssysteme	193
3.3.8	Neuartige Bremssysteme	199
3.3.8.1	Elektrohydraulische Bremse (EHB)	199
3.3.8.2	Elektromechanische Bremse (EMB)	200
3.3.8.3	Elektrohydraulische Kombibremse (EHC)	201
3.3.8.4	Regenerative Bremssysteme	202
3.3.9	Vernetztes Chassis	203
3.4	Lenksysteme	205
3.4.1	Anforderungen und Bauformen	205
3.4.2	Hydraulische Zahnstangenlenkung	207
3.4.2.1	Technik und Funktion	207
3.4.2.2	Aufbau und Bauteile	210
3.4.2.3	Spurstangen	213
3.4.3	Lenkstrang und Lenksäule	217
3.4.3.1	Komponenten und Funktionseinheiten	217
3.4.3.2	Auslegung und Erprobung	219
3.4.3.3	Crashanforderungen und Energieverzehrmeechanismen	220
3.4.3.4	Ausblick und Modularisierung	223
3.4.4	Lenkrad	223
3.4.5	Elektromechanische Lenkung	225
3.4.5.1	Bauformen	225
3.4.5.2	Aufbau und Vorteile	227
3.4.5.3	Bedeutung der Lenkung für die Assistenzsysteme	230
3.4.6	Überlagerungs- oder Aktivlenkung	231
3.4.6.1	Überlagerung von Momenten	231
3.4.6.2	Überlagerung von Winkeln	232
3.4.6.3	Stellervarianten der Aktivlenkung	232
3.4.6.4	Überlagerungsaktor am Lenkgetriebe	232
3.4.6.5	Überlagerungsaktor in der Lenksäule	234
3.4.6.6	Steuergerät und Sicherheitskonzept	235
3.4.6.7	Funktionen der Aktivlenkung	235
3.4.7	Zahnstangenservolenkung mit Momenten- und Winkelsteller	237
3.4.8	Hinterachs- und Allradlenkung	238
3.4.9	Steer-by-wire-Lenksystem und Einzelradlenkung	240
3.4.9.1	Systemkonzept und Bauteile	241
3.4.9.2	Technik, Vorteile und Chancen	243
3.5	Federn und Stabilisatoren	244
3.5.1	Aufgabe der Federung	244
3.5.2	Systematik der Federarten	245
3.5.3	Konstruktion und Berechnung von Stahlfedern	245
3.5.3.1	Blattfedern	245
3.5.3.2	Drehstabfedern	248
3.5.3.3	Stabilisatoren	249
3.5.3.4	Schraubenfedern	257
3.5.4	Werkstoffe für Stahlfedern	265
3.5.5	Herstellung von Stahlfedern	267
3.5.5.1	Warmumformung	267
3.5.5.2	Vergütung warmgeformter Federn	269
3.5.5.3	Kaltumformung	269
3.5.5.4	Kugelstrahlen	270
3.5.5.5	Plastifizieren	271
3.5.5.6	Korrosionsschutz	271
3.5.5.7	Endkontrolle und Markierung	272
3.5.6	Compositfedern	272
3.5.7	Federung für Niveauregelung	273
3.5.7.1	Aufgaben und Bauarten	273
3.5.7.2	Berechnung von Gasfedern und deren Eigenschaften	274
3.5.8	Federung durch Elastomerfeder	277
3.5.9	Federung durch Gaskompression	277

3.5.9.1	Vor- und Nachteile von Gasfedern	278
3.5.9.2	Luftfederung	278
3.5.9.3	Hydropneumatische Federung	279
3.6	Dämpfung	279
3.6.1	Aufgabe der Dämpfung	279
3.6.2	Teleskopdämpfer-Bauarten	283
3.6.2.1	Zweirohrdämpfer	283
3.6.2.2	Einrohrdämpfer	284
3.6.2.3	Vergleich beider Dämpferarten	284
3.6.2.4	Sonderbauarten	285
3.6.3	Stoßdämpferberechnung	285
3.6.4	Zusatzfunktionen im Dämpfer	286
3.6.4.1	Zug- und Druckanschlüsse	286
3.6.4.2	Hubabhängige Dämpfung	289
3.6.4.3	Amplitudenselektive Dämpfung	290
3.6.5	Dämpferlager	291
3.6.6	Semiaktive Dämpfung	292
3.6.6.1	Lastabhängige Dämpfung	292
3.6.6.2	Elektrisch verstellbare Dämpfung	292
3.6.7	Alternative Dämpfungsprinzipien	296
3.6.7.1	Dämpfer mit rheologischen Flüssigkeiten	297
3.6.7.2	Verbunddämpfung	297
3.6.7.3	Elektrischer Dämpfer	298
3.6.8	Kombinierte Feder-/Dämpfereinheiten	298
3.6.8.1	Federträger und Federbein	298
3.6.8.2	Hydropneumatische Federung	300
3.6.8.3	Selbstpumpendes, hydropneumatisches Feder- und Dämpferelement	300
3.6.8.4	Luftfederung und hydraulischer Dämpfer	303
3.6.9	Gas-Feder-Dämpfereinheiten (GFD)	305
3.6.9.1	Physikalische Grundlagen	305
3.6.9.2	Auslegung der Gas-Feder-Dämpfereinheit	309
3.6.9.3	Ausführungsbeispiele von Gas-Feder-Dämpfereinheiten	315
3.6.9.4	Formelzeichen und Basisformeln der Gas-Feder-Dämpfer-Einheiten	317
3.7	Radführung	317
3.7.1	Aufgaben, Struktur und Systematik	317
3.7.2	Lenker Aufgaben, Struktur und Systematik	319
3.7.2.1	Führungslenker	320
3.7.2.2	Traglenker	320
3.7.2.3	Hilfslenker	321
3.7.2.4	Anforderungen an Fahrwerkslenker	321
3.7.2.5	Werkstoffe für Fahrwerkslenker	321
3.7.2.6	Herstellverfahren für Fahrwerklenker	322
3.7.2.7	Herstellverfahren für Aluminiumlenker	330
3.7.2.8	Auslegung und Optimierung der Lenker	331
3.7.2.9	Integration der Gelenke an den Lenker	332
3.7.3	Kugelgelenk	333
3.7.3.1	Aufgabe und Anforderungen	333
3.7.3.2	Systematik für Kugelgelenke	334
3.7.3.3	Aufbau der Kugelgelenke	334
3.7.3.4	Lagersystem (Schale, Fett)	337
3.7.3.5	Dichtsystem (Balg, Spannring)	340
3.7.3.6	Führungsgelenke	343
3.7.3.7	Traggelenke	344
3.7.3.8	Hülsengelenke	346
3.7.4	Gummilager	347
3.7.4.1	Aufgabe, Anforderungen, Funktion	347
3.7.4.2	Ausführungen	350
3.7.5	Drehgelenk	351
3.7.6	Drehschubgelenk	352
3.7.7	Kugelschubgelenk	353

3.7.8	Achsträger . . . . .	353
3.7.8.1	Aufgabe und Anforderungen . . . . .	353
3.7.8.2	Systematik und Bauarten . . . . .	354
3.8	Radträger und Radlager . . . . .	356
3.8.1	Bauarten für Radträger . . . . .	357
3.8.2	Werkstoffe und Herstellverfahren für Radträger . . . . .	358
3.8.3	Bauarten für Radlager . . . . .	358
3.8.3.1	Dichtung . . . . .	362
3.8.3.2	Schmierung . . . . .	362
3.8.3.3	ABS-Sensoren . . . . .	363
3.8.4	Herstellung von Radlagern . . . . .	365
3.8.4.1	Ringe und Flansche . . . . .	365
3.8.4.2	Käfige und Wälzkörper . . . . .	365
3.8.4.3	Montage . . . . .	366
3.8.5	Anforderung, Auslegung und Erprobung . . . . .	366
3.8.5.1	Ermüdungslebensdauer (Überrollfestigkeit) des Radlagers . . . . .	368
3.8.5.2	Bauteilfestigkeit und Kippsteifigkeit . . . . .	370
3.8.5.3	Verifizierung durch Prüfmethoden . . . . .	371
3.8.6	Ausblick . . . . .	373
3.9	Reifen und Räder . . . . .	377
3.9.1	Anforderungen an den Reifen . . . . .	377
3.9.1.1	Gebrauchseigenschaften . . . . .	377
3.9.1.2	Gesetzliche Anforderungen . . . . .	381
3.9.1.3	Umweltaspekte . . . . .	382
3.9.2	Bauarten, Aufbau und Material . . . . .	383
3.9.2.1	Reifenbauarten . . . . .	383
3.9.2.2	Reifenaufbau . . . . .	383
3.9.2.3	Sommer-, Winter-, All-Seasonreifen . . . . .	384
3.9.2.4	Reifenmaterialien . . . . .	384
3.9.2.5	Viskoelastische Eigenschaften von Gummi . . . . .	386
3.9.3	Kraftübertragung Reifen–Fahrbahn . . . . .	387
3.9.3.1	Tragverhalten . . . . .	387
3.9.3.2	Kraftschlussverhalten, Aufbau von Horizontalkräften . . . . .	387
3.9.3.3	Antreiben und Bremsen, Umfangskräfte . . . . .	388
3.9.3.4	Schräglauf, Seitenkräfte und Rückstellmomente . . . . .	389
3.9.3.5	Schräglaufsteifigkeit . . . . .	390
3.9.3.6	Reifen unter Quer- und Längsschlupf . . . . .	391
3.9.3.7	Reifengleichförmigkeit . . . . .	392
3.9.4	Reifenmodelle für die Simulation . . . . .	392
3.9.4.1	Reifenmodelle für die Horizontaldynamik . . . . .	392
3.9.4.2	Reifenmodelle mit Finiten Elementen (FEM-Modelle) . . . . .	394
3.9.4.3	Reifenmodelle für die Vertikaldynamik . . . . .	394
3.9.4.4	Reifenmoden . . . . .	395
3.9.4.5	Eigenschwingung der Kavität . . . . .	395
3.9.4.6	Gesamtmodelle . . . . .	395
3.9.5	Auswahl und Entwicklung von Reifen und Rädern . . . . .	396
3.9.5.1	Reifen . . . . .	396
3.9.5.2	Rad . . . . .	396
3.9.6	Moderne Reifentechnologien . . . . .	397
3.9.6.1	Reifensensorik . . . . .	397
3.9.6.2	Reifennotlaufsysteme . . . . .	399
3.9.6.3	Reifen und Regelsysteme . . . . .	400
3.9.6.4	High-Performance-(HP-) und Ultra-High-Performance-(UHP-)Reifen . . . . .	401
3.9.7	Test und Messmethoden im Fahrversuch . . . . .	403
3.9.7.1	Subjektive Testverfahren . . . . .	403
3.9.7.2	Objektive Testverfahren für die Längshaftung . . . . .	404
3.9.7.3	Objektive Testverfahren für die Seitenhaftung . . . . .	405
3.9.7.4	Akustik . . . . .	405
3.9.8	Test und Messmethoden im Labor . . . . .	405
3.9.8.1	Grundkonzepte für Reifenprüfstände . . . . .	405

3.9.8.2	Festigkeitsprüfung	406
3.9.8.3	Charakteristikmessungen am Prüfstand	406
3.9.8.4	Charakteristikmessungen mit dem Laborfahrzeug	407
3.9.8.5	Rollwiderstandsmessung	407
3.9.8.6	Uniformity- und Geometrie-Messung	408
3.9.8.7	Streckenmessung und Modellierung	409
3.9.8.8	Verlustleistungsanalyse	409
3.9.8.9	Reifentemperaturverfahren	410
3.9.9	Zukünftige Reifentechnologien	411
3.9.9.1	Materialentwicklung	411
3.9.9.2	Rollwiderstandsenkung (Sparreifen)	411
3.9.9.3	Neuartige Reifenkonzepte	412
<b>4</b>	<b>Achsen und Radaufhängungen</b>	<b>417</b>
4.1	Starrachsen	419
4.1.1	Starrachsen mit Längsblattfederführung	421
4.1.2	Starrachsen mit Längs- und Querlenker	422
4.1.3	De-Dion-Achse: angetriebene Starrachse mit Zentralgelenk	424
4.1.4	Starrachsen mit Zentralgelenk- und Querlenkerführung (Deichselachse)	424
4.2	Halbstarrachsen	424
4.2.1	Verbundlenkerachsen	424
4.2.1.1	Torsionskurbelachse	426
4.2.1.2	Koppellenkerachse	426
4.2.1.3	Verbundlenkerachse	427
4.2.1.4	Verbundlenkerachse mit Wattgestänge	427
4.2.1.5	Verbundlenkerachse mit entkoppeltem Radträger	427
4.2.2	Dynamische Verbundachse (DVA)	428
4.3	Einzelradaufhängungen	428
4.3.1	Kinematik der Einzelradaufhängung	428
4.3.2	Eigenschaften der Einzelradaufhängungen	431
4.3.3	Einzelradaufhängungen mit einem Lenker	431
4.3.3.1	Längslenker-Einzelradaufhängungen	431
4.3.3.2	Schräglenker-Einzelradaufhängungen	432
4.3.3.3	Schraublenker-Einzelradaufhängungen	434
4.3.4	Einzelradaufhängungen mit zwei Lenkern	434
4.3.4.1	Quer-Längs-Pendelachsen	434
4.3.4.2	Trapezlenker mit einem Querlenker	434
4.3.4.3	Trapezlenker mit einem flexiblen Querlenker (Porsche Weissachachse)	435
4.3.5	Einzelradaufhängungen mit drei Lenkern	435
4.3.5.1	Längslenker mit zwei Querlenkern	435
4.3.5.2	Längslenker mit zwei Schräglenkern (Zentrallenker-Einzelradaufhängung)	436
4.3.5.3	Doppelquerlenker-Einzelradaufhängungen	436
4.3.6	Vierlenker – Einzelradaufhängungen der Hinterachse (Mehrlenker)	439
4.3.6.1	Mehrlenkerhinterachsen durch Auflösung des unteren 3-Punkt-Lenkens	440
4.3.6.2	Mehrlenkerhinterachsen durch Auflösung der oberen 3-Punkt-Lenker	441
4.3.6.3	Trapezlenkeraufhängung (Integrallenker)	441
4.3.6.4	Mehrlenkerhinterachsen mit Längslenker	442
4.3.7	Vierlenker – Einzelradaufhängungen der Vorderachse (Mehrlenker)	444
4.3.8	Einzelradaufhängungen mit fünf Lenkern	446
4.3.8.1	Fünflenker Einzelradaufhängung – Vorderachse	446
4.3.8.2	Fünflenker Einzelradaufhängung – Hinterachse (Raumlenker)	446
4.3.9	Federbein-Einzelradaufhängungen	448
4.3.9.1	Dreieckslenker-Federbeinaufhängung	448
4.3.9.2	McPherson mit Querverbindungsstraverse	450
4.3.9.3	McPherson mit optimiertem Lenker	450
4.3.9.4	McPherson mit aufgelöstem unteren Lenker (Dreilenker-Federbein)	450
4.3.9.5	McPherson mit doppeltem Radträger	451
4.3.9.6	Federbeinaufhängung für die Hinterachse	451
4.4	Einzelradaufhängungen der Vorderachse	452
4.4.1	Anforderungen an die Vorderachsaufhängungen	452

4.4.2	Komponenten der Vorderachse	453
4.4.3	Einsatzgebiete der Vorderachstypen	454
4.4.4	Besonderheiten der Vorderachsaufhängungen	454
4.5	Einzelradaufhängungen der Hinterachse	455
4.5.1	Anforderungen an die Hinterachse	455
4.5.2	Komponenten der Hinterachse	457
4.5.3	Einsatzgebiete der Hinterachstypen	457
4.5.4	Besonderheiten der Hinterachsaufhängungen	458
4.5.4.1	Nicht angetriebene Hinterachse	458
4.5.4.2	Angetriebene Hinterachse	458
4.5.4.3	Verbundlenker Hinterachsen	458
4.5.4.4	Mehrlenker Hinterachsen	459
4.6	Gesamtfahrwerk	459
4.6.1	Zusammenspiel von Vorder- und Hinterachse	459
4.6.2	Eigenlenkverhalten des Fahrzeugs	459
4.6.3	Achslastverlagerungen	459
4.6.4	Konstruktionskatalog als Auswahlhilfe für die Achstypen	459
4.7	Radaufhängungen der Zukunft	460
4.7.1	Achstypen der letzten 20 Jahre	460
4.7.2	Häufigkeit der aktuellen Achstypen	460
4.7.3	Die zukünftigen Vorderachstypen (Tendenzen)	462
4.7.4	Die zukünftigen Hinterachstypen (Tendenzen)	462
<b>5</b>	<b>Fahrkomfort</b>	465
5.1	Grundlagen, Mensch und NVH	465
5.1.1	Begriffe und Definitionen	465
5.1.2	Schwingungs- und Geräuschquellen	467
5.1.3	Wahrnehmungsgrenzen des Menschen	467
5.1.4	Das Wohlbefinden des Menschen	468
5.1.5	Maßnahmen gegen Schwingungen und Geräusche	469
5.1.6	Vorgehen bei der NVH-Optimierung	470
5.2	Gummiverbundteile	471
5.2.1	Funktion der Gummiverbundteile	471
5.2.1.1	Kräfte übertragen	471
5.2.1.2	Definierte Bewegungen ermöglichen	471
5.2.1.3	Geräusche isolieren	471
5.2.1.4	Schwingungen dämpfen	472
5.2.2	Elastomer spezifische Definitionen	473
5.2.2.1	Kennlinien	473
5.2.2.2	Dämpfung	474
5.2.2.3	Setzung	474
5.3	Aggregatelager	475
5.4	Fahrwerk – Gummilager	479
5.4.1	Hülsenlager	479
5.4.2	Gleitlager	481
5.4.3	Hydraulisch dämpfende Buchsen	481
5.4.5	Verbundlenkerlager	484
5.5	Achsträgerlager	484
5.6	Federbeinstützlager	486
5.7	Berechnungsmethoden	487
5.8	Akustische Bewertung von Gummiverbundteilen	488
5.9	Zukünftige Bauteilausführungen	489
5.9.1	Sensorik	490
5.9.2	Schaltbares Fahrwerklager	491
5.9.3	Regelbares Fahrwerklager	492
<b>6</b>	<b>Fahrwerkentwicklung</b>	495
6.1	Entstehung des Fahrwerks	495
6.1.1	Entwicklungsprozess	496
6.1.2	Projektmanagement (PM)	501

6.2 Planung und Definitionsphase .....	501
6.2.1 Zielwertkaskadierung .....	502
6.3 Konzeptphase .....	503
6.4 Virtuelle Simulation .....	503
6.4.1 Software für die Mehrkörpersimulation (MKS) .....	504
6.4.1.1 Aufbau von MKS-Fahrwerksmodellen mit ADAMS/Car .....	504
6.4.1.2 CAD-Fahrwerkmodell und Mehrkörpersystem .....	504
6.4.1.3 Mehrkörpersimulation mit starren und flexiblen MKS-Modellen .....	504
6.4.1.4 Mehrkörpersimulation mit Gesamt-fahrzeug-, Fahrwerk- und Achsmodellen .....	506
6.4.1.5 Einfluss der Fertigungstoleranzen auf die kinematischen Kennwerte .....	506
6.4.2 Software für Finite Elemente Methode (FEM) .....	506
6.4.2.1 Klassifizierung der Analysen .....	508
6.4.2.2 Festigkeitsanalysen .....	508
6.4.2.3 Steifigkeitsanalysen .....	508
6.4.2.4 Eigenfrequenzanalysen .....	508
6.4.2.5 Lebensdauer-Betriebsfestigkeit .....	509
6.4.2.6 Crash-Simulationen .....	510
6.4.2.7 Topologie- und Formoptimierung .....	510
6.4.2.8 Simulation der Fertigungsverfahren .....	510
6.4.3 Vollfahrzeugsimulation .....	511
6.4.3.1 Fahrdynamiksimulation .....	511
6.4.3.2 Kinematik/Elastokinematik .....	511
6.4.3.3 Standard-Lastfälle .....	512
6.4.3.4 MKS-Modellverifikation .....	512
6.4.3.5 NVH .....	513
6.4.3.6 Loadmanagement (Lastenkaskadierung vom System zur Komponente) .....	514
6.4.3.7 Vollfahrzeug Betriebsfestigkeitssimulation .....	518
6.4.4 Software zur 3D-Modellierung CAD .....	518
6.5 Integrierte Simulationsumgebung .....	519
6.5.1 Kinematische Analyse: Basistool ABE .....	519
6.5.2 Vollautomatische Kinematik- und Elastokinematik-Optimierung OPT .....	521
6.5.3 Virtuelle Produktentwicklungsumgebung .....	522
6.6 Serienentwicklung und Absicherung .....	524
6.6.1 Konstruktion .....	524
6.6.1.1 Bauteilkonstruktion .....	525
6.6.1.2 Bauraum „Package“ .....	525
6.6.1.3 Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse .....	526
6.6.1.4 Toleranzuntersuchungen .....	526
6.6.2 Validierung .....	526
6.6.2.1 Prototypen .....	526
6.6.2.2 Validierung am Prüfstand .....	527
6.6.2.3 Straßen-Simulationsprüfstand (SSP) .....	529
6.6.3 Validierung am Gesamtfahrzeug .....	530
6.6.4 Optimierung und Abstimmung .....	531
6.7 Serienbegleitende Entwicklung .....	531
6.8 Ausblick und Zusammenfassung .....	532
<b>7 Fahrwerkelektronik .....</b>	<b>535</b>
7.1 Motivation und Nutzen .....	535
7.1.1 Grenzen passiver Fahrwerke .....	535
7.1.1.1 Zielkonflikt Dämpfungsauslegung .....	535
7.1.1.2 Zielkonflikt Federungsauslegung .....	536
7.1.1.3 Zielkonflikt Lenkübersetzung .....	536
7.1.1.4 Forderung nach aktiven Systemen .....	536
7.1.2 Fahrzeugführung .....	537
7.1.2.1 Regelkreis Fahrer–Fahrzeug .....	537
7.1.2.2 Vereinfachte Fahrzeugführung .....	537
7.2 Unterteilung der Fahrwerkregelsysteme .....	538
7.2.1 Begriffsbestimmungen .....	538
7.2.2 Unterteilung der Fahrwerkregelsysteme in Domänen .....	538

7.3	Längsdynamikfunktionen	539
7.3.1	Traktionsregelung mit dem Allradverteilergetriebe	539
7.3.2	Traktionsregelung Achsgetriebe	540
7.3.3	Torque Vectoring	541
7.4	Vertikaldynamikfunktionen	542
7.4.1	Variable Dämpfer	542
7.4.2	Aktiver Stabilisator	543
7.4.3	Niveauregulierung	544
7.5	Querdynamikfunktionen	544
7.5.1	Elektrolenkung	545
7.5.2	Überlagerungslenkung	546
7.5.3	Hinterachslenkung	546
7.6	Systemvernetzung und Funktionsintegration	547
7.6.1	Systemvernetzung	547
7.6.2	Fahrdynamikregelung	548
7.6.3	Funktionsintegration	551
7.6.4	Funktionsarchitektur	551
7.6.5	Standardschnittstellen / Autosar	552
7.7	Elektronik-Hardware, Sensorik und Aktuatorik	553
7.7.1	Technologiebeispiele	553
7.7.2	Umweltanforderungen	556
7.7.3	Bussysteme im Fahrwerk	557
7.7.3.1	CAN-Bus	557
7.7.3.2	FlexRay	557
7.7.4	Aktuatoren im Fahrwerk	558
7.7.5	Sensoren im Fahrwerk	559
7.8	Entwicklung der Fahrwerkregelsysteme	561
7.8.1	Entwicklung gemäß Automotive SPICE	561
7.8.2	Funktionale Sicherheit	563
7.8.3	Simulation der Fahrwerkelektronik	564
7.8.4	Hardware-in-the-Loop-Simulation	565
<b>8</b>	<b>Elektronische Systeme im Fahrwerk</b>	<b>569</b>
8.1	Elektronische Struktur des Fahrwerks	569
8.2	Mechatronische Längsdynamiksysteme	569
8.2.1	Antriebssysteme	569
8.2.1.1	xDrive	570
8.2.1.2	Active Yaw Control (AYC)	571
8.2.1.3	Quattro Sport Differential	572
8.2.1.4	Weitere aktive Allradantriebssysteme	574
8.2.1.5	Systeme mit Frontantrieb-Querverteiler Überlagerungsdifferenzial	574
8.2.1.6	4Motion von VW	575
8.2.2	Bremssysteme	575
8.2.2.1	Grundlagen des Bremsen-Fahrdynamikreglers	575
8.2.2.2	Zusatzfunktionen in aktiven Bremssystemen	576
8.3	Mechatronische Vertikaldynamiksysteme	577
8.3.1	Anforderungen an die Vertikalsysteme	577
8.3.2	Einteilung der Vertikalsysteme	577
8.3.3	Dämpfungssysteme	578
8.3.3.1	Adaptive Dämpfungssysteme	579
8.3.3.2	Semi-aktive Dämpfungssysteme	580
8.3.3.3	Regelstrategien für semi-aktive Dämpfer	582
8.3.4	Niveauregulierungssysteme	583
8.3.5	Adaptive Luftfederungssysteme	584
8.3.6	Aktuelle aktive Federungssysteme	585
8.3.6.1	Langsam-aktive Fahrwerksysteme	586
8.3.6.2	Voll-aktive, integrierte Fahrwerksysteme	588
8.3.7	Lagersysteme	591
8.4	Mechatronische Querdynamiksysteme	592
8.4.1	Vorderradlenkung	593

8.4.2	Hinterradlenkung	595
8.4.3	Wankstabilisierungssysteme	601
8.4.3.1	Passiver Stabilisator	602
8.4.3.2	Schaltbare Off-Road-Stabilisatoren	602
8.4.3.3	Schaltbare On-Road-Stabilisatoren	602
8.4.3.4	Semiaktive Stabilisatoren	603
8.4.3.5	Hydraulische aktive Stabilisatoren	604
8.4.3.6	Elektrische aktive Stabilisatoren	607
8.4.4	Aktive Kinematik	609
8.4.5	Gegenüberstellung der Fahrdynamiksysteme	612
8.4.6	Vernetzung der Fahrwerksysteme	614
8.5	X-by-wire	615
8.5.1	Steer-by-wire	615
8.5.2	Brake-by-wire	616
8.5.2.1	Elektrohydraulische Bremse (EHB)	617
8.5.2.2	Elektromechanische Bremse (EMB)	617
8.5.2.3	Elektromechanische Bremse von Teves	617
8.5.2.4	Elektrohydraulische Combi-Bremse (EHC)	618
8.5.2.5	Radialbremse	619
8.5.2.6	Keilbremse	619
8.5.2.7	Mechatronische Bremse	620
8.5.3	Leveling-by-wire	621
8.6	Fahrerinformationssysteme	621
8.7	Fahrerwarnsysteme	622
8.7.1	Fahrerwarnung bei der Längsführung	622
8.7.2	Fahrerwarnung bei der Querverführung	623
8.8	Fahrerassistenzsysteme	623
8.8.1	Bremsassistentz	625
8.8.1.1	Sicherheitsrelevante Bremsassistentz	625
8.8.1.2	Komfortorientierte Bremsassistentz	626
8.8.1.3	Anforderungen an die Bremsassistentz	626
8.8.2	Distanzhalteassistentz	626
8.8.3	Lenkassistentz	627
8.8.3.1	Lenkassistentz durch Anpassung der Unterstützungskraft	628
8.8.3.2	Lenkassistentz durch Überlagerung des Fahrerhandmoments	628
8.8.3.3	Lenkassistentz durch Überlagerung des Fahrerlenkwinkels	631
8.8.3.4	Lenkassistentz durch kombinierten Eingriff aus Lenkradwinkel und -moment	631
8.8.4	Einparkassistentz	631
8.8.4.1	Einführung	631
8.8.4.2	Parklückenerkennung	632
8.8.4.3	Einparkvorgang	633
8.8.4.4	Lenkaktuator	634
8.8.5	Zusammenfassung	634
<b>9</b>	<b>Zukunftsaspekte des Fahrwerks</b>	<b>639</b>
9.1	Fahrwerkkonzepte – Fokussierung auf den Kundenwert	640
9.1.1	Auslegung des Fahrverhaltens	640
9.1.2	Diversifizierung und Stabilisierung der Fahrwerkskonzepte	641
9.1.2.1	Vorderachsen	642
9.1.2.2	Hinterachsen	642
9.1.3	Fahrwerkbestandteile der Zukunft	642
9.1.3.1	Achsantrieb der Zukunft	642
9.1.3.2	Bremse der Zukunft	643
9.1.3.3	Lenkung der Zukunft	643
9.1.3.4	Federung der Zukunft	643
9.1.3.5	Dämpfung der Zukunft	643
9.1.3.6	Radführung der Zukunft	643
9.1.3.7	Radlager der Zukunft	643
9.1.3.8	Reifen und Räder der Zukunft	643

9.1.4	Elektronische Fahrwerksysteme der Zukunft	643
9.1.4.1	Systemvernetzung	644
9.1.4.2	Leistungsfähigkeit	644
9.1.4.3	Systemsicherheit	645
9.1.4.4	Elektronik Entwicklungsprozess	645
9.1.4.5	Anforderungen an die Datenübertragung	645
9.2	Umweltschutz und CO <sub>2</sub>	646
9.2.1	Bedeutung der CO <sub>2</sub> -Senkung	646
9.2.2	Beitrag des Fahrwerks zur CO <sub>2</sub> -Senkung	646
9.2.2.1	Reifen und Bremse	646
9.2.2.2	Nebenaggregate mit Elektroantrieb	647
9.2.2.3	Fahrwerkgewicht	647
9.2.2.4	Fahrwiderstand	648
9.2.2.5	Energierückgewinnung an Stoßdämpfern	648
9.2.2.6	Zusammenfassung	648
9.2.3	Beitrag des Hybridantriebs zur CO <sub>2</sub> -Senkung	648
9.2.3.1	Mild- und Parallel-Hybridantriebe	650
9.2.3.2	Seriell-Hybridantriebe	650
9.2.4	Bremsblending für Rekuperation	651
9.3	Elektrofahrzeuge	653
9.3.1	Antriebskonzepte für das Elektrofahrzeug	653
9.3.2	Fahrwerkkonzepte für Elektro-Autos	655
9.3.2.1	Fahrwerkkonzepte mit zentralem Elektromotor	655
9.3.2.2	Fahrwerkkonzepte für zwei Elektromotoren	655
9.3.2.3	Fahrwerkkonzepte für radnahen Antrieb	656
9.3.2.4	Fahrwerkkonzepte für Radnaben-Antriebe	657
9.3.2.5	Gegenüberstellung radnahe Antriebe und Radnaben-Antriebe	659
9.3.3	Elektro-Radnabenfahrwerk „eCorner“	659
9.4	X-by-wire-Systeme der Zukunft	660
9.5	Fahrerassistenz-Systeme der Zukunft	661
9.6	Vorausschauende und intelligente Fahrwerke der Zukunft	662
9.6.1	Fahrzeugsensorik	662
9.6.2	Aktuatorik	663
9.6.3	Vorausschauendes Fahren	663
9.7	Autonomes Fahren in der Zukunft?	666
9.7.1	Selbstfahrendes Chassis, Rolling/Driving Chassis	666
9.7.2	Urban Challenge 2007: Die ersten Schritte zum autonomen Fahren	667
9.7.3	Autofahren ohne Fahrer	669
9.8	Zukunftsszenarien für das Auto und sein Fahrwerk	670
9.8.1	Trends aus der Vergangenheit	671
9.8.2	Trends aus der Gegenwart	671
9.8.3	Trends der Zukunft	671
9.8.4	Szenarioanalyse	671
9.8.5	Mögliche Zukunftsvisionen	672
9.9	Ausblick	673
<b>Glossar</b>		677
<b>Sachwortverzeichnis</b>		700

# Abkürzungen

---

AAS	Adaptive Air Suspension	Bj.	Baujahr
ABC	Active Body Control	BKV	Bremskraftverstärker
ABS	Anti-Blockiersystem	BMR	Bremsmomentenregelung
ABV	Anti-Blockiervorrichtung	BSA	Baustellen Assistent
ACC	Autonomous / Adaptive Cruise Control		
ACE	Active Cornering Enhancement	C2C	Cart to Car (Communication)
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems	CAD	Computer Aided Design
ADR	Automatische Distanzregelung	CAE	Computer Aided Engineering
ADS	Adaptives Dämpfungssystem	CAM	Computer Aided Manufacturing
ADS	Air Damping System	CAN	Controller Area Network
AFS	Active Front Steering	CAS	Collusion Avoidance System
AFS	Aktive Fahrwerkstabilisierung	CASE	Computer Aided Software Engineering
AGCS	Active Geometry Control Suspension	CATS	Computer Active Technology Suspension
AHK	Aktive Hinterachskinetik	CBC	Cornering Brake Control
AICC	Autonomous Intelligent Cruise Control	CBS	Combined Brake System
AKC	Active Kinematic Control	CCD	Charged Coupled Devices
ALC	Automatic Linear Guidance Control	CDC	Continuous Damper Control
AMR	Antriebsmoment Regelung	CDL	Collision Danger Level
ANB	Automatische Notbremsung	CCS	Cont. Controlled Electronic Suspension
AOS	Adaptive Off-Road Stabilizer	CMOS	Complimentary Metal Oxid Semiconductor
APB	Aktive Parkbremse – Active Parking Brake		
APS	Automatic Parking System	DARPA	Defense Advance Research Projects Agen.
APQP	Advanced Product Quality Planning	DBC	Dynamic Brake Control
ARK	Active Rear Axle Kinematics	DBS	Dynamic Brake Support
ARM	Active Roll Mitigation	DC	DaimlerChrysler
ARP	Active Rollover Control	DD	Dynamic Drive
ARS	Active Roll Stability	DDE	Digitale Dieselelektronik
ART	Abstandsregeltempomat	DDS	Deflation Detection System
ASC	Automatic Stability Control	DIN	Deutsches Institut für Normung
ASCA	Active Suspension via Control Arm	DME	Digitale Motorelektronik
ASCS	Active Suspension Control System	DMU	Digital Mock Up
ASCx	Automatic Stability Control x (Allwheel)	DOE	Design of Experiment
ASD	Amplitudenselektive Dämpfung	DQL	Doppelquerlenker
ASIC	Application Specific Integrated Circuit	DRC	Dynamic Ride Control
ASL	Anhänger-Schlingern-Logik	DSC	Dynamic Stability Control (BMW)
ASM	Asynchron Maschine (Motor)	DSP	Dynamisches Stabilitätsprogramm
ASMS	Autom. Stabilitätsmanagementsystem	D SCT	Dynamic Stability and Traction Control
ASR	Antriebsschlupfregelung	DSR	Driver Steering Recommendation
ASTC	Advanced Stability Control	DTC	Dynamic Traction Control
ATC	Active Tilt Control	DXC	Dynamic x(Allrad) Control
ATTC	Active Tire Tilt Control		
ATTS	Active Torque Transfer System	eABC	Electromechanical Active Body Control
AUN	Allgemeiner Unebenheitsindex	EAS	Electronic Active Steering Assistant
AWD	All Wheel Drive	EASS	Electric Active Stabilizer Suspension System
AWS	All Wheel Steering		
AYC	Active Yaw Control	EBA	Elektronischer Bremsassistent
		EBC	Electronic Body Control
BAB	Bundesautobahn	EBD	Electronic Brake Distribution
BAS	Bremsassistentz	EBM	Elektronisches Bremsen-Management
BASR	Bremsen-Antriebs-Schlupf-Regelung	EBS	Electronically Controlled Braking System
BBA	Betriebsbremsanlage	EBV	Elektronische Bremskraftverteilung
BBC	Brake Boost Control	ECD	Electronic Controlled Decleration
BbW	Brake by Wire	ECE	Economic Commission for Europe

ECM	Electronic Chassis Management	ICC	Intelligent Cruise Control
ECU	Electronic Control Unit	ICC	Integrated Chassis Control
EDC	Elektronischer Dämpfer Control	ICCS	Integrated Chassis Control System
EDS	Elektronische Differenzialsperre	ICD	Intelligent Controlled Damper
E/E	Elektrik/Elektronik	ICM	Integrated Chassis Management
EHB	Elektrohydraulische Bremse	IDS	Interaktives Dynamisches Fahrsystem
E-Gas	Elektronisches Gas- Pedal	IR	Individual(Einzelrad)-Regelung
EGS	Elektronische Getriebesteuerung	IR	Infra Rot
EMB	Elektromechanische Bremse	ISAD	Integrated Starter Alternator Damper
EMC	Electro Magnetic Compatibility	ISG	Integrated Starter Generator
EMF	Elektromechanische Feststellbremse	ISO	International Standards Organization
EMP	Elektronische Parkbremse	IWD	Intelligent Wheel Dynamics
EPS	Electric Power Steering		
EPSapa	EPS mit achsparallelen Antrieb	KAS	Kreuzungsassistentz
EPSc	EPS mit Lenksäulenantrieb	K&C	Kinematics and Compliances
EPSdp	EPS mit Doppelritzelantrieb	KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
EPSp	EPS mit Servoantrieb am Ritzel		
EPB	Elektrische Park- Bremse	LbW	Leveling by Wire
EPH	Einparkhilfe	LCA	Lane Change Assist
ESA	Emergency Steer Assist	LCC	Lane Change Control
ESAS	Electric Steer Assisted System	LDW	Lane Departure Warning
ESD	Electrostatic Discharge	LFD	Luft-Feder-Dämpfereinheit
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm	LG	Line Guidance
ETC	Electronic Traktion Control	LIDAR	Light Detection and Ranging
EV	Electric (Driven) Vehicle	LIN	Local Interconnected Network
		LKS	Line Keeping Support
FAS	Fahrerassistenz-Systeme	LRR	Long Range Radar
FCDB	Full Contact Disc Brake von NewTech	LWS	Lenkwinkelsensor
FDR	Fahrdynamikregelung		
FEA	Finite-Elemente-Analyse	MagneRide	Magneto-Rheologische Dämpfung
FEM	Finite-Elemente-Methode	MB	Mercedes Benz
FFT	Fast Fourier Transformation	MBA	Mechanischer Bremsassistent
FGR	Fahrgeschwindigkeitsregler	MBS	Multi Body System / Simulation (MKS)
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund	MBU	Motorbremsmomentunterstützung
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse	MKS	Multikörpersimulationssystem
FPDS	Ford Product Development System	MMI	Man Machine Interface
FPM	Fahrpedal-Modul	MRR	Middle Range Radar
FSR	Fahrstabilitätsregelung	MPV	Multi Purpose Vehicle
FSRA	Full Speed Range ACC	MSR	Motor Schleppmomentenregelung
GCC	Global Chassis Control	NVH	Noise Vibration Harshness
GFD	Gas-Feder-Dämpfereinheit		
GFK	Glassfaserverstärkter Kunststoff	OCP	Optimized Contact Patch
Gl., Gln.	Gleichung, Gleichungen	OEM	Original Equipment Manufacturer
GMR	Giermomentenregelung	OTA	Overtake Assist
GM	General Motors		
		PBA	Pneumatischer Bremsassistent
HA	Hinterachse	PCB	Printed Circuit Board
HAQ	Hinterachs-Quersperre	PDC	Park Distance Control
HBA	Hydraulischer Bremsassistent	PDC	Pneumatic Damper Control
HBM	Hydraulisches Bremsenmanagement	PDM	Product Data Management
HCU	Hydraulic Control Unit	PDM	Pull Drift Migration
HDC	Hill Descent Control	PEP	Produktentstehungsprozess
HECU	Hydraulic Electronic Control Unit	PM	Projektmanagement
HICAS	High Capacity Actively Controlled Suspension	PSD	Power Spectral Density
		PSM	Permanent erregte Synchron Machine
HiL	Hardware in the Loop	PTO	Power Take Off
HMI	Human Machine Interface		
HPS	Hydraulic Power Servosteering	Quattro	Audi Allrad-System

RADAR	Radio Detection and Ranging	TCM	Traffic Channel Message
RDK	Reifendruckkontrolle	THz	Tandemhauptbremszylinder
RIM	Radindividuelle Momentenregelung	TMC	Tandem Main Cylinder
RLDC	Road Load Data Collections	TPMS	Tire Pressure Monitoring System
ROP	Roll Over Protection	TSC	Torque Steer Compensation
RSP	Roll Stability Control	TTP	Time Triggered Protocol
s.	siehe	TWE	Totwinkelerkennung
S-AWC	Super All Wheel Control	TWIN	Integrierte Spur- und Sturzverstellung
SBC	Sensotronic Brake Control	UCL	Under Steer Control Logic
SCB	Slip-Control-Boost	ÜLL	Überlagerungslenkung
SbW	Steer by Wire	UMTS	Universal Mobile Telecommunication Sys.
SE	Simultaneous Engineering	VA	Vorderachse
SiL	Software in the Loop	VDC	Vehicle Dynamic Control
SIL	Safety Integrity Level	VGRS	Variable Gear Ration Steering
SLS	Self Leveling Suspension	VPE	Virtual Product Environment
SMR	Schleppmomentenregelung	VSA	Vehicle Stability Assist
SOP	Start of Production	VSC	Vehicle Stability Control
SPICE	Software Process Improvement and Capability Determination	VTD	Variable Torque Distribution
SSP	Strassensimulationsprüfstand	VTG	Verteilergetriebe
STC	Stability Traction Control	xDRIVE	Allrad System
SUC	Sport Utility Cabriolet	WSS	Wheel Speed Sensor
SUV	Sport Utility Vehicle	μC/μP	Microcomputer / Microprocessor
SW	Software	4Motion	Permanenter Allradantrieb von VW
S&G	Stop and Go	4WS	Four Wheel Steering
TA	Trailer Assist		
TC(S)	Traction Control (System)		

# 1 Einleitung und Grundlagen

Wenn in den Fachkreisen der Kraftfahrzeugtechnik über Pkw geredet wird, werden Worte wie Mobilität, Antriebsleistung, Verbrauch, Umweltschutz, Fahrzeugklasse, Karosserie, Sicherheit, Fahrkomfort, Fahrdynamik, elektronische Systeme und Elektrifizierung benutzt. Aktuell sind auch Begriffe wie *CO<sub>2</sub>-Emission*, *Downsizing*, *Hybridantrieb*, *Elektroantrieb*, *Fahrerassistenz*, *Agilität*.

Das Fahrwerk spielt dabei die wesentlichste Rolle, wenn es um Fahrsicherheit, Fahrkomfort, Fahrdynamik und Agilität geht. Alle fahrsicherheits- und komfortrelevanten elektronischen Regelsysteme sowie Fahrerassistenzsysteme findet man im Fahrwerk integriert.

Das Gesamtfahrzeug besteht traditional aus drei Hauptgruppen: Antrieb, Fahrgestell und Aufbau.

*Der Antrieb* sichert mit den Elementen des Antriebsstrangs den Vortrieb des Fahrzeugs.

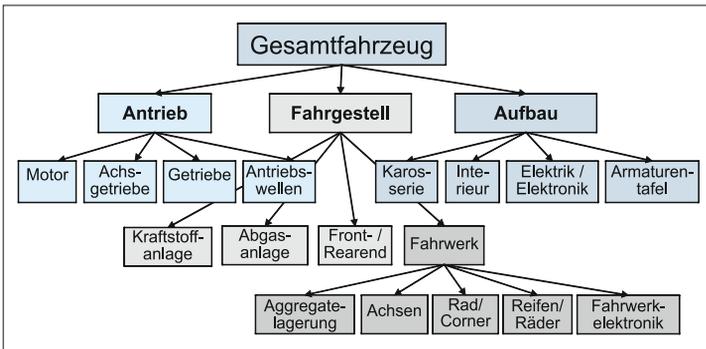
*Der Aufbau* bietet Platz für Personen und Gepäck.

*Das Fahrgestell* sorgt für deren Beförderung bzw. Mobilität, obwohl heute durch die tragenden Karosserie-

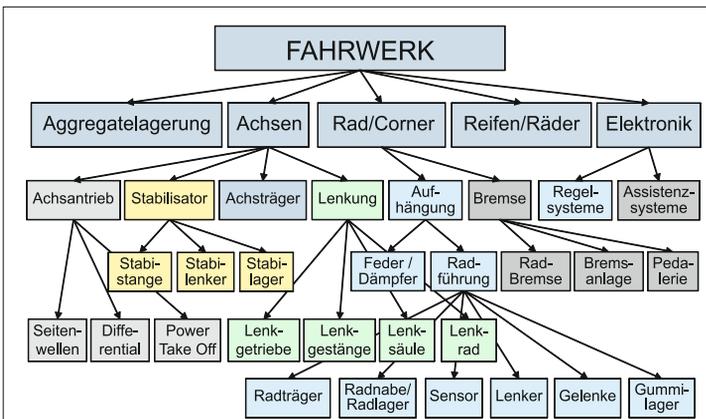
strukturen das Fahrgestell alleine nicht mehr alle für das Fahren wichtigen Komponenten umfasst. Heute ermöglicht nur noch bei einigen Pick-ups, Light-Trucks und Geländefahrzeugen der Chassisrahmen ein fahrbereites Fahrgestell (**Bild 1-1**).

Das Fahrgestell hat Karl Blau bereits im 1906 wie folgt beschrieben: „Das Fahrgestell baut sich aus den Wagenrädern mit dem federnd aufgesetzten Stahlrahmen auf, der den Motor mit allem Zubehör für die Übertragung und den regelmäßigen Betrieb aufnimmt“ [1].

Neben Antrieb und Aufbau gehört das Fahrwerk zu den Hauptbestandteilen des Automobils und besteht aus Rädern, Radträgern, Radlagern, Radbremsen, Bremsanlage, Radaufhängung, Achsträger, Federung inkl. Stabilisator, Dämpfung, Lenkgetriebe, Lenkgestänge, Lenksäule, Lenkrad, Fußhebelwerk, Aggregatelagerung, Seitenwellen, Achsgetriebe und Fahrwerksregelsystemen (**Bild 1-2**). Diese umfassen in der Grundausstattung eines Mittelklassenfahrzeuges ca. 20 % des Gesamtgewichtes und beanspruchen ca. 15 % der Herstellkosten [2] (**Bild 1-3**).



**Bild 1-1:** Hauptgruppen des Gesamtfahrzeugs



**Bild 1-2:** Bestandteile eines modernen Fahrwerks

HERSTELLER	Volvo	Ford	Ford	Toyota	Durchschnitt	
MODELL	S80	Taurus	Mondeo	Camry	kg	%
Karosserie	301	286	276	299	291	20
Türen	90	111	97	102	100	7
Glasscheiben	55	56	36	45	48	3
Stoßstangen	31	31	28	23	28	2
Sitze	78	69	72	59	69	5
Cockpit	48	52	40	49	47	3
<b>Zwischensumme</b>	<b>604</b>	<b>604</b>	<b>550</b>	<b>577</b>	<b>584</b>	<b>39,4</b>
Fahrwerk	233	180	191	187	198	13
Räder + Reifen	94	92	87	97	93	6
<b>Zwischensumme</b>	<b>326</b>	<b>272</b>	<b>279</b>	<b>285</b>	<b>290</b>	<b>19,6</b>
Motor	167	157	156	137	154	10
Getriebe	101	103	86	89	95	6
Antriebswellen	14	13	16	15	14	1
Auspuff	38	30	40	26	34	2
Tank	80	63	56	70	67	5
<b>Zwischensumme</b>	<b>400</b>	<b>366</b>	<b>355</b>	<b>336</b>	<b>364</b>	<b>24,5</b>
Klimaanlage	28	29	26	27	28	2
Elektrik	57	49	40	46	48	3
<b>Zwischensumme</b>	<b>85</b>	<b>77</b>	<b>66</b>	<b>73</b>	<b>75</b>	<b>5,1</b>
Andere	196	210	115	157	170	11
<b>Zwischensumme</b>	<b>196</b>	<b>210</b>	<b>115</b>	<b>157</b>	<b>170</b>	<b>11,4</b>
<b>TOTAL kg</b>	<b>1611</b>	<b>1530</b>	<b>1365</b>	<b>1428</b>	<b>1483</b>	<b>100</b>

**Bild 1-3:** Gewichtsverteilung der Hauptbaugruppen ausgewählter Pkw-Modelle (Modelljahr 2000)

Das Fahrwerk ist die Verbindung des Fahrzeugs zur Straße und realisiert alle Hauptfunktionen, die zum Führen des Fahrzeuges erforderlich sind: Antriebsmoment auf die Fahrbahn übertragen (Fahrwiderstand überwinden, Beschleunigen), Bremsen, Kupplung und Gasbetätigen, Lenken, Federn und Dämpfen.

Das vorliegende Buch ist konzipiert als wissenschaftliches Handbuch für die Fachleute aus dem Fahrwerkbereich sowie für Lehrende und Studierende an den Hochschulen. Es geht nicht zu tief in Theorie und Grundlagen, dafür behandelt es alle wissenschaftlichen Aspekte des letzten Stands der Technik mit Betonung auf Aktualität und Innovationen und gibt einen Ausblick auf das Fahrwerk der Zukunft.

Als Grundlagen werden im Kapitel 1 zuerst das Fahrwerk, die Konzepte und Auslegung beschrieben.

Dann werden im Kapitel 2 sehr ausführlich alle Aspekte der „Fahrndynamik“ und des „Fahrverhaltens“ dargestellt.

Im Kapitel 3 „Bestandteile des Fahrwerks“, das den größten Teil des Buches ausmacht, werden alle Systeme, Module und Komponenten beschrieben: Achsantrieb, Bremse, Lenkung, Federung, Dämpfung, Radführung, Radträger, Radlager, Reifen und Räder.

Den „Achsen“ und dem „Fahrkomfort“ sind die beiden folgenden Kapiteln 4 und 5 gewidmet.

In Kapitel 6 „Fahrwerkentwicklung“ werden Prozesse der Produkt-Entstehungsphasen für das Fahrwerk beleuchtet – von der Planung, Entwicklung, virtuellen Simulation, reeller Validierung, Projektmanagement bis hin zur Serieneinführung.

Direkt oder indirekt beinhalten alle Fahrwerkmodule schon heute Elektronik, die in Kapitel 7 als Grundlagen und in Kapitel 8 als „Systeme im Fahrwerk“ (Anwendungen) ausführlich behandelt wird.

Mit dem Kapitel 9 „Fahrwerktechnik der Zukunft“, in dem auch auf die Aspekte des Hybrid- und Elektroantriebs eingegangen wird, schließt das Buch.

## 1.1 Geschichte, Definition, Bedeutung

### 1.1.1 Entstehungsgeschichte

Die Geschichte des Fahrwerks und des Fahrzeuges beginnt vor über 6000 Jahren mit der Erfindung des Rades. Das Rad gilt als eine der wichtigsten Erfindungen der Menschheit. An Prunkwagen der Sumerer (2700 v. Chr.) befanden sich vier geteilte Scheibenräder mit metallischem Reif, die drehbar auf den zwei festen *Achsen* befestigt waren (**Bild 1-4**). Die zwei Achsen sollten die Stabilität und Tragfähigkeit des Wagens und der Metallreif die Lebensdauer des Rades erhöhen. Die Radlager waren mit tierischem Öl oder Fett geschmiert. 1800 bis 800 v. Chr. wurden die ersten *Lenkungen* an der Vorderachse bekannt; die Achse war nicht mehr fest, sondern an ihrem Mittelpunkt drehbar mit dem Wagenkasten befestigt.



**Bild 1-4:** Prunkwagen der Sumerer 2700 v. Chr.

Die Römer trennten den Wagenkasten vom Fahrgestell, um den Komfort zu steigern. Sie befestigten den Wagenkasten, die spätere Karosserie, mit Ketten oder mit Lederriemen hängend am Fahrgestell um die Stöße, die von der Fahrbahn kommen, zu reduzieren [3]. Somit entstand die erste *Aufhängung*.

Die ersten *gefederten* Wagen mit *Lenkung* und *Bremsen* entstanden im zehnten Jahrhundert in Mitteleuropa (**Bild 1-5**); Blattfedern dienten als Federungselement, ein an einer Kette hängender Bremsenschuh am Rad als Bremse und die in der Mitte drehbar gelagerte Achse als Mühlenlenkung. Die Fahrzeugmasse war in einen *gefederten* und einen *ungefederten* Anteil getrennt; erste Voraussetzung, um die Geschwindigkeit der Wagen über 30 km/h zu erhöhen.



**Bild 1-5:** Pferdekutsche mit Aufhängung, Federung, Bremse und Lenkung

Der Fahrkomfort konnte im 18. Jahrhundert durch die Eigendämpfung der elliptischen Blattfederpakete weiter verbessert werden; die Reibung zwischen den Blättern wirkte als Schwingungsdämpfer. Die Blattfeder übernahm auch die Aufgabe der Längsführung; damit waren die schweren Stützbalken zwischen den Achsen nicht mehr notwendig.

Mit dem Ende des Römischen Reiches wurden die befestigten Wege stark vernachlässigt. Das war wohl mit ein Grund dafür, dass zu Beginn des 19. Jahrhunderts Fahrzeuge mit schweren Dampfmaschinen wirtschaftlich nur auf Schienenwegen zu betreiben waren. Erst mit dem Bau eines befestigten Straßennetzes (*Fahrbahn*) in England durch MacAdam, mit dem Einsatz von Speichenrädern durch Walter Hancock (1830) und der Einführung von *Luftreifen* durch John Boyd Dunlop (1888) nach der Erfindung von Robert William Thomson (1845), waren alle Voraussetzungen für komfortables und schnelles Fahren auf der Straße geschaffen.

Eine andere Erfindung von 1816 ist die Achsschenkel lenkung, ein Patent von Georg Lankensperger, Kutschenbauer aus München, und seinem Lizenznehmer in London, Rudolph Ackermann [4, 5]. Sie ermöglichte, dass sich beim Lenken nicht die gesamte Achse, sondern nur die Räder mit eigenem beweglichem Bolzen drehen. Durch die Verbindung der gelenkten Räder mit einem Gestänge, erhielt jedes Rad einen eigenen Lenkwinkel. Bei nicht parallelen Einschlag schneiden sich die senkrechten Linien zu den Radmitten in der horizontalen Ebene. Dieses Prinzip ist als „*Ackermann-Prinzip*“ immer noch ein wichtiger Parameter für die Lenkungsauslegung (s. Bild 1-45).

Im 18. Jahrhundert kamen erste Fahrzeuge mit einem eigenen Antrieb durch Dampfmaschinen auf die Straße (1769 Nicolas Joseph Cugnot, 1784 James Watt, 1802 Richard Trevithick) mit zum Teil fortschrittlichen Fahrwerken. Diese erste Art des mobilen Fortbewegens mit eigenem Antrieb auf der Fahrbahn war jedoch nicht das Vorbild für die Automobile mit einem Verbrennungsmotor. Erst nach der Erfindung des Gasmotors 1860 durch Étienne Lenoir und dessen Weiterentwicklung zum Viertakter (1876 August Otto, Gottlieb Daimler, Wilhelm Maybach) und dem Einsatz von Petroleum als Kraftstoff [6] (erster schnell laufender Benzinmotor) durch Daimler im Jahr 1883, war es Karl Benz möglich, im Oktober 1885 das erste selbst fahrende Fahrzeug mit Verbrennungsmotor als Urvater heutiger Automobile zu bauen (**Bild 1-6**), für welches am 29. Januar 1886 das Patent erteilt wurde [7].

Die Autopioniere haben das Fahrwerk, wie vieles andere auch, zuerst unverändert aus dem Kutschenbau übernommen: Speichenräder mit Flachbettfelge und Wulstreifen, Kuchschwanzlenkung, elliptische Blattfederung, Klotzbremsen, Lederriemenstoßdämpfer und Starrachsen. Aber schon bald veränderte sich das Aussehen und orientierte sich zunehmend an der Funktion schnell fahrender Automobile.

**Bild 1-7** zeigt der erste Daimler „Motorkutsche“ (1886). Sehr schnell entwickelte sich ein besserer Antriebs-



**Bild 1-6:** Das erste Automobil (Karl Benz 1885)



**Bild 1-7:** Der erste Daimler „Motorkutsche“ (1886)



**Bild 1-8:** Das Automobil mit eigenem, von dem Kutschenimage abgekoppelten Aussehen (Mercedes 1910)

strang und eine bessere Fahrwerksanordnung ähnlich dem heutigen Standardantrieb, wie z. B. der Mercedes F 188 aus dem Jahr 1910 zeigt (**Bild 1-8**).

Die Entwicklungsgeschichte des Fahrwerks ist eng verbunden mit dessen Trennung der Funktionen, die vorher durch dieselben Bauteile erfüllt wurden [8]:

- ♦ Trennung der Karosserie und Fahrgestell,
- ♦ Trennung der gefederten/ungefederten Massen,
- ♦ Trennung der Radführung und Federung,
- ♦ Trennung der Federung und Dämpfung,
- ♦ Trennung von Rad und Achse (Einzelradaufhängung),
- ♦ Trennung der Felgen und Reifen,
- ♦ Trennung der Lenker (Mehrlenkerachsen),
- ♦ Trennung der Anbindung Radaufhängung zur Karosserie durch einen Achsträger.

Zu den bedeutendsten Erfindungen der ersten 100 Jahre der Fahrwerktechnik zählen Radialgürtelreifen, Schrauben- und Luftfederung, hydraulische Stoßdämpfer, Kugelgelenke, Gummilager, Zahnstangenservolenkung, hydraulische Allradbremse, Scheibenbremse, Trennung von Radführung und Federung, Einzelradaufhängungen, Mehrlenkerachsen, Allradantrieb und elektronische Systeme (z. B. ABS, ASR, EBV, ESP, ACC, ...).

**Antriebskonzepte:** Die Kutschen besaßen keinen Antrieb an den Achsen; sie wurden stets gezogen. Die ersten Automobile hatten den Verbrennungsmotor auf der Hinterachse und auch den Antrieb unmittelbar auf den Hinterrädern und sie wurden geschoben; wegen der Lenkung war das Antreiben der Vorderräder nicht so einfach. Das hatte jedoch den Nachteil, dass die Hinterräder deutlich höher belastet waren als die Vorderräder, die geringe Belastung der Vorderachse reduzierte dagegen die Lenkkräfte deutlich. Die für die Fahrdynamik sehr wichtige gleichmäßigere Achslastverteilung, war erst mit einer Anordnung des Motors über der Vorderachse und Hinterradantrieb über eine Kardanwelle zu erreichen. Erste Fahrzeuge mit diesem später als Standardantrieb bezeichneten Antriebskonzept wurden von Renault (1896), Daimler (Phönix-Wagen 1898 [7]) und Horch (1900) gebaut (**Bild 1-9**).

Ähnlich war auch das legendäre T-Modell von Ford (1908) aufgebaut. Es war zudem das erste Auto, das am Fließband in sehr hoher Stückzahlen montiert wurde. Durch die niedrigen Herstellkosten wurde der Erwerb eines Auto ab diesem Zeitpunkt an auch für die Durchschnittsverdiener erschwinglich (**Bild 1-10**).

Ein Antrieb über die Vorderräder war zu dieser Zeit wegen fehlender Antriebswellengelenke mit der erforderlichen Winkelbeweglichkeit nicht serienfähig. Frontantriebsfahrzeuge mit längs eingebautem Motor in größeren Stückzahlen wurden erst später gebaut (1931 DKW F1, 1934 Citroen Traction,).

Im Jahr 1959 ging Mini mit einem Quermotor und Frontantrieb in die Serie. Diese Anordnung (heute mit einem Anteil von weltweit 75 %) brachte besonders für kleinere Fahrzeuge viele sehr wichtige Vorteile: geringes Gewicht, kompakte Maße, größere Innenräume und vor allem niedrigere Kosten.



**Bild 1-9:** Der älteste erhaltene Horch, ein sogenanntes „Tonneau“ mit Standardantrieb aus dem Jahr 1903



**Bild 1-10:** Das erste in Serie gefertigte Volumenauto. Ford T-Modell „Tinny Lizzy“ aus dem Jahr 1908

**Bremse:** Die Klotzbremsen der ersten Autos mit Leder als Bremsbelag wurden schnell durch die deutlich wirkungsvolleren Backenbremsen, die mechanisch direkt auf die Außen- oder Innenfläche einer am Rad befestigten Trommel wirkten, abgelöst. Das Problem der ungleichmäßigen Bremskraftverteilung an allen Rädern durch Seilzugbetätigungen wurde 1920 mit dem Patent von Malcolm Lockheed in Kalifornien beseitigt, bei dem durch Bremsflüssigkeit betätigte hydraulische Radbremszylinder vorgesehen waren. Das erste Serienautomobil mit hydraulischem Bremssystem war ein Chrysler 70 Baujahr 1920.

Um die Sicherheit gegen den Ausfall der Hydraulik zu gewährleisten, waren Zweikreis-Bremsanlagen bereits in den 30er Jahren üblich. Bei schwereren Fahrzeugen wurde zudem die Betätigungskraft durch einen Unterdruck-Bremskraftverstärker unterstützt. Die Teilbelag-Scheibenbremse, die seit 1952 von Jaguar erfolgreich im Rennsport eingesetzt wurde, wurde das erste Mal 1957 auf der Internationalen Automobil-Ausstellung in Frankfurt von der Fa. Dunlop für Serienanwendungen

ausgestellt und setzte sich bei Serienfahrzeugen zuerst an den Vorderrädern schnell durch. Die ersten Scheibenbremsen hatten einen festen Sattel mit Bremskolben von beiden Seiten der Bremscheibe mit den Nachteilen eines relativ großen Platzbedarfs. Der Schwimmrahmensattel mit einem nur auf der Innenseite wirkenden Druckkolben beseitigte diese Probleme. Ab 1978 löste der Faustsattel, der eine deutlich höhere Steifigkeit aufweist, den Schwimmrahmensattel ab [9].

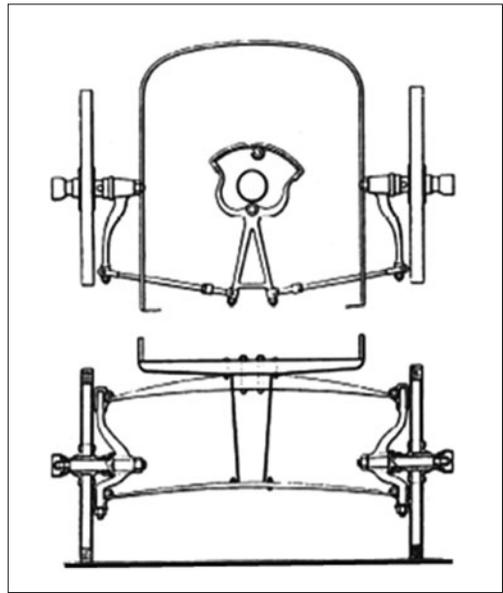
Die eigentliche Revolution am Bremssystem war jedoch die Einführung der elektronischen Bremsregelung 1965 im Jensen C-V8 FF als *ABS (Antiblockiersystem)* zur Verhinderung des Blockierens der Räder. Das moderne, auf frei programmierbarer Elektronik und Raddrehzahlmessung basierende System von Fritz Oswald [8] wurde von Bosch zur Serienreife entwickelt und kam 1978 bei Mercedes-Benz Modellen zum Einsatz. Im Jahre 1987 wurde die Umfangsschlupfregelung als *ASR (Antriebs-Schlupf-Regelung)* auch zur Regelung des Antriebsschlupfes eingesetzt.

Später ab 1995 vollendete das *ESP (elektronisches Stabilitäts-Programm)* die Sicherheitstechnologie durch Stabilisierung des Fahrzeugs in Grenzsituationen mit Brems- und Motoreingriff. Auch die *EBV (elektronische Bremskraftverteilung)* 1994 und der *BAS (Bremsassistent)* 1996 gehören zu den wichtigsten elektronischen Bremsregelsystemen.

**Lenkung:** Schon das Dampffauto des Engländers Walter Hancock zu Beginn des 19. Jahrhunderts hatte ein Lenkrad. Mit der Einführung der Achsschenkellenkung war auch die erste Zahnstangenlenkung bereits 1878 von Amédée Bollée in seinem Dampffauto „La Mancelle“ eingebaut. Die Zahnstange und das Ritzel der Zahnstangenlenkung ermöglichten eine Übersetzung zwischen Lenkrad und Radeinschlag, um die Betätigungskraft klein zu halten. Jedoch erforderte der volle Radeinschlag mehrere Umdrehungen am Lenkrad (**Bild 1-11**).

Schon sehr früh, im Jahre 1902, ließ L. Megy, ein Amerikaner, die Zahnstange gleichzeitig als Spurstange arbeiten; somit wurde bereits vor über 100 Jahren die noch heute mit Abstand gängigste Zahnstangenlenkung erfunden. Sie wurde jedoch wegen des schlechten Wirkungsgrades noch lange Zeit durch die Schnecke und Walze von Henry Marles (1913) oder durch die Schnecke und Finger von Bishop (bekannt als Ross-Lenkung 1923) verdrängt. Die hohe Reibung der Schnecke wurde in den dreißiger Jahren von Saginaw Steering Division durch eine, mit umlaufenden Kugeln gelagerte Spindel deutlich reduziert. Diese sogenannte Kugelmutterlenkung setzte sich bis zu den sechziger Jahren überall durch (bei Mercedes sogar bis in die neunziger Jahre).

Mit der Einführung der Servolenkung 1951 in den USA – zuerst im Chrysler dann bei GM – und durch verbesserte Materialien, Fertigungsverfahren und deutlich reduzierte Herstellkosten, hat die Zahnstangenlenkung die teurere Kugelmutterlenkung beim Pkw vollständig abgelöst.



**Bild 1-11:** Die Vorderachse des Bolleè's Dampffauto „La Mancelle“ (1878) mit Zahnstangenlenkung (oben) und Doppelquerlenker Blattfederaufhängung (unten)

Die Lenkung war immer Teil der Vorderachse, weil die Führung eines Fahrzeugs bei höheren Geschwindigkeiten nur mittels Hinterachslenkung jeden Fahrer überfordern würde, obwohl ein Fahrzeug mit Hinterachslenkung deutlich weniger ist. Die Vorteile von Vorder- und Hinterradlenkung wurden bereits vor hundert Jahren als Allrad- oder Vierradlenkung kombiniert. Nachdem die Vierradlenkung in den neunziger Jahren in einigen japanischen Autos als Serienlösung angeboten und nach ein paar Jahren wieder eingestellt wird, wird sie heutzutage wieder verstärkt eingesetzt.

Zur Geschichte der Lenkung gehören auch Innovationen wie die verstellbare Lenksäule in den USA und die von Bèla Barèny für Daimler Benz entwickelte Sicherheitslenksäule. Nicht zuletzt durch die Sicherheitslenksäule wurde der Begriff „passive Sicherheit“ fester Bestandteil der Fahrzeugentwicklung.

**Federung:** Nach der halb-elliptischen Blattfeder kamen Drehstab oder Schraubenfeder zum Einsatz. Die Entwicklungen an der Schraubenfeder mit gewünschter progressiver Kennlinie sind auf Jean Alber Grègorie zurückzuführen; Lloyd Arabella hatte 1959 eine derartige Schraubenfeder. 1978 führte Opel mit der Miniblockfeder die Platz sparende Version ein. In den letzten Jahren wurden besonders die Federwerkstoffe verbessert und Oberflächenbehandlungen eingeführt, damit die Federn höher belastbar und kleiner wurden. Drehstabtorsionsfedern sind zwar Platz sparend und nachjustierbar, aber deutlich teurer. Deshalb werden sie selten eingesetzt.

Dafür wird aber diese Federart seit 1949 als Stabilisator zur Erhöhung der Wanksteifigkeit besonders an den einzeln aufgehängten Vorderrädern benutzt. Der Stabilisator stützt in der Kurve den Aufbau ab, reduziert dadurch die Wankneigung und beeinflusst die Eigenlenkung des Wagens zum Untersteuern.

Die reine Gasfederung ist dagegen sehr alt und seit 1845 als Pferdewagenfederung bekannt. Die hydropneumatische Federung ist sogar seit 1816 in der Lokomotive von George Stephenson zu finden. Der Amerikaner Westinghouse (1920) war der Entwickler der ersten brauchbaren Kfz-Luftfederung.

Citroen hat die hydropneumatische Federung 1954 in der letzten Serie des 15 CV „Traction Avant“ (Sonderausstattung an der Hinterachse) und 1955 im legendären DS als Serienausstattung eingeführt.

Die Luftrollbälge sind seit den dreißiger Jahren als Luftfederelement im Einsatz und werden in vielen Luxusautos zur Verbesserung des Fahrkomforts eingebaut. Moderne Luftbälge haben sehr dünne Wandstärken und sehr geringe Hysterese. Sie sprechen daher auch bei sehr kleinen Amplituden gut an.

**Dämpfung:** Während der ersten 50 Jahre des Automobils gab es keine richtigen geschwindigkeitsabhängigen Dämpfungselemente. Die bekannten Lösungen funktionierten vorwiegend mit Trockenreibung, basierend auf Leder oder Asbest als Reibbelag. Sie verhinderten aber das feinfühliges Ansprechen der Federung bei kleinen Unebenheiten, weil die ruhende (statische) Reibung deutlich größer ist, als die gleitende (dynamische) Reibung. Zudem ist die gewünschte Steigerung der Dämpfungsrate mit der Einfederungsgeschwindigkeit nicht möglich. Auch die weiterentwickelten Reibungsdämpfer, wie die um 1920 sehr bekannten Gabriel-Snubber mit Leder als Dämpfungselement, erfüllten die Aufgabe nicht zufrieden stellend. Houdaille hatte bereits 1906 als Dämpfungselement die Hydraulikflüssigkeit vorgeschlagen, die zwischen den zwei Kammern einer Drehpumpe über einem Ventil hin und her transportiert wurde [10]. Diese hydraulischen Rotationsdämpfer wurden ab 1915 eingesetzt, bis die ersten translatorischen Dämpfer mit doppelwandigen hydraulischen Teleskopproben in den USA durch die Fa. Monroe kostengünstig in Großserie hergestellt wurden (1934).

In Europa fanden diese drucklosen Teleskopstoßdämpfer im Zweirohrsystem erst Mitte der fünfziger breiteren Einsatz. Derartige Dämpfer lassen nur einen begrenzten Einbauwinkel zu und es besteht immer die Gefahr der inneren Emulsionsbildung. Diese Nachteile konnten am Ende der vierziger Jahre durch die Entwicklung eines Einrohr-Gasdruckdämpfer durch den Franzosen Christian Bourcier de Carbon beseitigt werden, in dem ein Gasdruckpolster den Volumenunterschied beim Ein- und Ausfahren des Kolbens ausglich. Hans Bilstein kaufte die Rechte von de Carbon und entwickelte in Zusammenarbeit mit Mercedes 1953 den hochwertigen Einrohrdämpfer.

Die verstellbaren Dämpfer, die bei höheren Fahrgeschwindigkeiten automatisch zu einer harten Dämpfer-

rate umschalten, wurden zu Beginn der achtziger Jahre von Kayaba und Tokico in Japan vorgestellt. In Europa hat Boge die ersten Dämpfer dieser Art für Mercedes entwickelt. Diesen folgten mehrstufige Dämpfer, die durch einen auf der Kolbenstange sitzenden Schrittmotor umschaltbar waren. Seit 15 Jahren sind durch ein Proportionalventil betätigte stufenlose Dämpfer CDC (*Continuous Damper Control*) verfügbar.

**Radführung:** Mit der Umstellung von der Blattfederung zur Schrauben-, Drehstab- oder Luftfederung und von der Starrachse zur Einzelradaufhängung begann um 1930 das Zeitalter der modernen Radführung bzw. Radaufhängung.

Vorher gab es schon die ersten Parallelschubführungen der Räder entlang der Achsschenkel, wie 1898 im „Motorwagen Wartburg“, oder entlang der Lenkgabel, wie bei Stephens (**Bild 1-12**). Die senkrechte (Teleskop-)Vorderradführung kam erst in 1922 im Lancia Lambda, zum Einsatz [11].



**Bild 1-12:** Vertikalvorderradführung von Stephens 1898

Auch das 1952 eingeführte wartungsfreie Kugelgelenk als Ersatz für die Achsschenkellagerung vereinfachte und erleichterte die Radaufhängung.

Die Doppellängskurbel – wie beim VW Käfer – und die Doppelquerlenkerachsführung – wie beim Mercedes Typ 380 von 1933 – waren die ersten modernen Einzelradaufhängungen. Die weit verbreitete McPherson (Federbein-)Vorderachsaufhängung, die in 1926 in einem Fiat Patent beschrieben und im Jahre 1948 bei den Ford Modellen „Consul“ und „Anglia“ eingeführt wurde, sowie die in dem Patent von Fritz Oswald 1958 beschriebenen Mehrlenkerachsen [8], sind die gängigsten Einzelradaufhängungen. Durch die erste, von Opel patentierte und eingeführte „selbsttragende Karosserie“ (1934), wurde der Begriff „Achse“ mit dem Begriff „Radaufhängung“ ergänzt.

Für die nicht angetriebene Hinterachse wurde 1975 im Audi 50 die Platz und Kosten sparende Verbundlenkerachse eingeführt. Diese bildet immer noch die Standardhinterachse für kleine, frontgetriebene Automobile. Für obere Fahrzeugklassen sind die Mehrlenkerhinterachsen mit mehr Potential für Fahrkomfort und Fahrverhalten weit verbreitet. Sie können außer-

dem angetrieben werden, haben jedoch auch Nachteile in Bezug auf Einbauraum, Gewicht und Kosten.

Durch die geschickte kinematische Anordnung der Lenker und Gelenke konnten vorteilhafte Eigenschaften erzielt werden, wie z. B. ein negativer Lenkrollradius (1958 patentiert von Fritz Oswald, Erstserieneinsatz 1972 im Audi 80), der das Bremsverhalten und die Spurhaltung in der Kurve deutlich verbesserte.

Kugelgelenke mit drei Rotationsfreiheiten waren in den Geburtsjahren des Automobils nicht bekannt. Zum Lenken der Räder hatte man einen Lenkzapfen mit zwei Drehlagern. Erst 1922 hat der deutsche Ingenieur Fritz Faudi ein Reichspatent mit dem Titel „Kugelgelenk, insbesondere für die Lenkvorrichtung von Kraftfahrzeugen“ erteilt bekommen [1]. Ein Stahlkugelzapfen war zwischen zwei Stahlschalen gelagert. Mit der Einführung des Kugelgelenks konnte der Achsschenkel durch einen Radträger ersetzt werden. Die wartungsfreien Kugelgelenke mit Kunststofflagerschale der Firma Ehrenreich sind seit 1952 bekannt.

Die Gummilager wurden zum ersten Mal in den dreißiger Jahren in den USA unter den Namen „Floating Power“ als Motorlagerung eingeführt. Später wurden sie auch als Gelenk an der Lenkerverbindung zur Karosserie benutzt. Sie waren zuerst gedacht, um die Geräusche, Schwingungen und Rauigkeiten, die von der Straße kommen, zu isolieren. Diese wurden dann später gezielt als elastische Elemente der Radaufhängung so ausgelegt, dass die Aufhängung sich deutlich verbesserte. Damit wurde in der Fahrwerksauslegung seit 1955 neben der Kinematik auch der Begriff „Elastokinematik“ eingeführt.

**Radlagerung:** Die Räder sind auf dem Achsträger gelagert. Es waren zuerst Gleitlagerungen im Einsatz, trotz hoher Reibverluste und Spielneigung durch Verschleiß. Obwohl die Kelten schon 1000 v. Chr., Wälzlager mit Nadeln aus Holzstiften als Radlagerung einsetzten [11], wurde dies nicht weiterverfolgt. Die Erfindung der Wälzlager aus Stahl mit niedrigen Reibverlusten, Verschleißanfälligkeiten und Spielfreiheiten kam viel später, und danach wurden diese Wälzlager ausschließlich als Radlagerung eingesetzt, zuerst als Kegellager und später als Schrägkugellager.

**Reifen:** Der Luftreifen hat sein Ursprung im Fahrrad: Das Patent des Schotten Dunlop im Jahr 1888 fand seine Anwendung zuerst ausschließlich an Fahrrädern, die zu der Zeit als Federungselement nur den Reifen aufwiesen. Im Auto war zuerst der hohle Massivgummireifen im Einsatz, der Geschwindigkeiten bis zu 30 km/h zuließ. Die ersten Luftreifen in Autos waren die Wulstreifen auf Flachbettfelgen, basierend auf dem Patent des Amerikaners William Bartlett. Michelin entwickelte die ersten abnehmbaren Luftreifen auf Basis des Bartlett-Patents. Dies waren Reifen aus Kautschuk mit innen liegendem, gekreuztem Gewebe. Sie hatten eine sehr geringe Lebensdauer und das bei einer Reparatur notwendige Ausziehen aus dem Fel-

genwulst war sehr umständlich. So kam die abnehmbare „Stepney“-Felge und schließlich das abnehmbare „Rudge-Withworth“-Rad.

Der Einsatz von Naturkautschuk als Gummi war erst durch die Vulkanisation möglich, was durch den Zusatz von Sulfat möglich und von Fa. Goodyear erfunden wurde. Die schlechte Abriebfestigkeit dieses Gummis konnte später um den Faktor 10 verbessert werden, als die Fa. Pirelli im Jahr 1907 Ruß zum Gummi einmischte.

Wegen der harten Hochdruckreifen ließ der Fahrkomfort auf den schlechten Straßen und bei steigenden Geschwindigkeiten dennoch zu wünschen übrig. Mit einem Überdruck von nur 2,5 bar montierte Michelin 1923 an einem Citroen den ersten Niederdruckreifen auf einer Tiefbettfelge, den sogenannten „Ballonreifen“. Die diagonale Kordlagenstruktur, eine Erfindung von Palmer aus dem Jahr 1908, vermied die Selbsterhitzung des Reifens, weil der zugfeste Kord die inneren Relativverschiebungen der Gummischichten bei jeder Einfederung stark einschränken konnte. Damit wurde die Reifenlebensdauer nochmals um den Faktor 10 gesteigert.

Die dehnfeste Kordeinlage steigerte auch die Seitenstabilität des Reifens. In den dreißiger Jahren wurde der Baumwollkord durch das wesentlich reißfestere synthetische Rayon (Kunstseide) ersetzt.

Die ersten Luftreifen hatten zuerst einen innen liegenden Schlauch, um die Luft nach außen hin abzudichten. Dies war aber nicht unbedingt notwendig, weil der Reifenwulst am Felgenhorn luftdicht aufliegt. Die ersten schlauchlosen Reifen wurden von Dunlop 1938 und Goodrich 1948 in den USA eingeführt und lösten ab 1960 den Schlauch vollständig ab.

Der nächste, vielleicht wichtigste Fortschritt beim Reifen war der Radialgürtelreifen, der von Michelin 1946 patentiert und 1949 im Citroen 2CV in Serie ging. Dieser Reifen hatte ein um den Wulstkern quer zur Fahrtrichtung geschwungenes Textilgewebe, welches dem Reifen seine Festigkeit gegen inneren Druck verleihen und für höhere Seitenstabilität sorgen sollte. Ein umfangsteifer Gürtel aus Stahldrähten verstärkte den Reifen unterhalb der Lauffläche. Damit waren die Relativbewegungen der gekreuzt gewebten Diagonalkarkassenfäden, die durch Reibung die Lebensdauer reduzierten, beseitigt. Der Stahlgürtel, der jetzt die Trägerfunktion übernahm, ließ deutlich höhere Geschwindigkeiten zu. Außerdem war es damit nun möglich, statt ballonförmige, auch flachere Reifenquerschnitte herzustellen, die einen deutlich größeren Reifenlatsch haben, um höhere Seitenkräfte zuzulassen. Die weiteren Entwicklungen am Reifen waren die Anbringung von Profilen und eine quer angeordnete Feinprofilierung (1932 erfunden von dem Deutschen Robert Sommer), um die Griffigkeit auf Eis, Schnee oder Nässe zu erhöhen oder der Silika-Zusatz zum Gummi, um den Rollwiderstand (verantwortlich für bis zu 1/3 des Kraftstoffverbrauches) zu senken.

Schließlich fanden die schon seit den zwanziger Jahren bekannten Sicherheitsreifen, die auch bei einem

luftleeren Reifen noch weiter betrieben werden können, in den letzten Jahren ihren Serieneinsatz bei der Oberklasse.

**Räder:** Die ersten Räder im Automobil waren die von den Kutschen bekannten Speichenräder mit Draht- bzw. Holzspeichen. Die Speichenenden verliefen an der Nabe konisch und fest aneinander liegend. Bei den Drahtspeichenrädern wurden sich kreuzende Stahl-drähte als Speichen verwendet. Sie wurden vor allem aus Gewichtsgründen und zur Bremsbelüftung bei Renn- und Sportwagen verwendet. Dazwischen waren auch gegossene oder gepresste Speichenräder im Einsatz, um die höheren Radlasten zu tragen. Vor den Luftreifen waren auch federnde Räder mit festem Reif üblich, die jedoch zu aufwändig waren. Die bekannte Felge aus gepresstem Stahlblech und mit nach innen gebogenen Hörnern kam als Flachbettfelge mit dem Wulstreifen und dann als Tiefbettfelge mit dem Ballonreifen auf den Markt. Am Ende der Zwanzigerjahre wurde dann die moderne, abnehmbare Tiefbettfelge mit Bolzenzentrierung, auf der ein Niederdruckreifen mit Ventil montiert war, eingeführt.

**Fahrwerkentwicklung:** Während der ersten 50 Jahre des Automobils wurden die Fahrwerke mehr intuitiv, handwerklich und eher improvisierend entwickelt. Es waren Tüftler und Erfinder am Werk. Die ersten Automobile von Benz (1885) und Daimler (1886) hatten gar keine Radaufhängung; die Achsen waren direkt am Wagenkörper befestigt. Nur die Sitzbank war gefedert, um ein Mindestmaß an Fahrkomfort zu gewährleisten. Ein leichtes autark arbeitendes Antriebsaggregat war am Anfang der Automobilgeschichte Mittelpunkt der Automobilentwicklung. Die Entwicklung des Fahrwerks hinkte bis vor dreißig Jahren deutlich hinter der des Antriebs hinterher, wobei Karl Benz derjenige war, der viel Sorgfalt auch auf die Entwicklung des Fahrwerks verwendete. Erst die, mit den leistungsstarken Antriebsaggregaten steigenden Fahrgeschwindigkeiten und die notwendigen Sicherheits- (insbesondere in den Kurven und beim Bremsen), Komfort- sowie Zuverlässigkeitsverbesserungen, lenkten den Entwicklungsschwerpunkt auch zum Fahrwerk. Entsprechend kleiner waren die Fahrwerksabteilungen der großen Automobilhersteller in den fünfziger Jahren besetzt; kaum eine hatte mehr als 50 Ingenieure und technische Zeichner, sodass sich lange Entwicklungszeiten für alle Fahrwerkskomponenten ergaben. Es dauerte von 1956 bis 1965 volle zehn Jahre, die z. B. die Mercedes S-Klasse W108/109 von der ersten Planung bis zur Serieneinführung brauchte [8]. Heute muss dieses schon innerhalb von ca. 3 Jahren geschehen, wenn der Autohersteller wettbewerbsfähig bleiben will und das obwohl die Anzahl der zu entwickelnden Modelle und Derivate sich verzehnfacht hat. Erst mit dem Einsatz von CAD um 1970 konnte mehr und mehr vom Reißbrett zur ungleich effektiveren Workstation gewechselt werden. Die Konstrukteure waren nicht nur in der Lage, die komplizierten Radbewegungen am Bild-

schirm durchzuspielen, sehr schnell Einbau- und Kollisionsuntersuchungen durchzuführen, sondern auch den Änderungs- und Optimierungsaufwand drastisch zu reduzieren. Die Zunahme des Wissens über das dynamische Verhalten des Automobils und die Einführung computergestützter Berechnungs- und Simulationsverfahren während der letzten 20 Jahre sorgte für hohe Fahrsicherheit und hohen Fahrkomfort.

Die Vernetzung der mechanischen Grundfunktionen mit Sensorik, Elektrik und Elektronik ist heute der aktuelle Stand in der Fahrwerktechnik. Verfeinerte, hydraulische Regelsysteme der Lenkung, Federung, Dämpfung und Bremse und vor allem das aktuelle Aufkommen der Regelelektronik ebnet den Weg hin zum „intelligenten“ Fahrwerk. Eine Hauptrolle spielt dabei künftig das Vernetzen der vielen Einzelsysteme, um synchronisierte Eingriffe zu gewährleisten.

### 1.1.2 Definition und Abgrenzung

Das Fahrwerk ist die Summe der Systeme im Fahrzeug, die zum Erzeugen der Kräfte zwischen Fahrbahn und Reifen und zu deren Übertragung zum Fahrzeug dienen, um das Fahrzeug zu beschleunigen, zu lenken, zu bremsen und abzufedern.

Im Einzelnen sind das Rad/Reifen, Radlagerung, Radträger, Bremsen, Radaufhängung, Federung, Dämpfung, Lenkung, Stabilisatoren, Achsträger, Achsgetriebe, Seitenwellen, Fußhebelwerk (Pedalerie), Lenksäule, Lenkrad, Aggregatlagerung und alle Regelsysteme zur Unterstützung der Fahrwerksaufgaben sowie Fahrerassistenzsysteme [12].

Das vorliegende Handbuch behandelt diese Systeme – bis auf die letzten beiden – gebündelt im Kapitel 3 als Bestandteile des Fahrwerks. Die Aggregatlagerung und die Regelsysteme werden in den Kapiteln 5 bzw. 8 ausführlich erläutert.

### 1.1.3 Aufgabe und Bedeutung

Das Fahrwerk stellt die Verbindung zwischen dem Fahrzeug – samt Insassen und Gepäck – und der Fahrbahn her. Mit Ausnahme der Massenkräfte und der aerodynamischen Einflüsse werden alle äußeren Kräfte und Momente in das Fahrzeug über die Kontaktfläche Fahrbahn/Reifen eingeleitet. Das wichtigste Kriterium beim Fahren ist, dass der Kontakt zwischen Fahrzeug und Fahrbahn am Reifenlatsch nie unterbrochen wird, weil sonst keine Führung, keine Beschleunigung, keine Bremsung und keine Seitenkraftübertragung (Lenkung) möglich sind.

Die Aufgabe wäre einfach zu realisieren, wenn die Fahrbahn ohne Hindernisse immer geradeaus führen würde, immer trocken und griffig wäre und es keine Unebenheiten und keine externen Einflüsse gäbe. Dann wäre bei Geradeausfahrt die einzige Eigenschaft des Fahrwerks, das Fahrzeug zu beschleunigen, auf der Spur zu halten und zu bremsen. Selbst die Erfüllung dieser Aufgabe wird schwierig, wenn die Fahrgeschwindigkeit steigt. Auch ein Serienauto kann ohne