

ATZ/MTZ-Fachbuch

Bernd Heißing
Metin Ersoy
Stefan Gies *Hrsg.*



Fahrwerkhandbuch

Grundlagen · Fahrdynamik · Komponenten ·
Systeme · Mechatronik · Perspektiven

4. Auflage



 Springer Vieweg

ATZ/MTZ-Fachbuch

Die komplexe Technik heutiger Kraftfahrzeuge und Motoren macht einen immer größer werdenden Fundus an Informationen notwendig, um die Funktion und die Arbeitsweise von Komponenten oder Systemen zu verstehen. Den raschen und sicheren Zugriff auf diese Informationen bietet die regelmäßig aktualisierte Reihe ATZ/MTZ-Fachbuch, welche die zum Verständnis erforderlichen Grundlagen, Daten und Erklärungen anschaulich, systematisch und anwendungsorientiert zusammenstellt.

Die Reihe wendet sich an Fahrzeug- und Motoreningenieure sowie Studierende, die Nachschlagebedarf haben und im Zusammenhang Fragestellungen ihres Arbeitsfeldes verstehen müssen und an Professoren und Dozenten an Universitäten und Hochschulen mit Schwerpunkt Kraftfahrzeug- und Motorentechnik. Sie liefert gleichzeitig das theoretische Rüstzeug für das Verständnis wie auch die Anwendungen, wie sie für Gutachter, Forscher und Entwicklungsingenieure in der Automobil- und Zulieferindustrie sowie bei Dienstleistern benötigt werden.

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

Fahrwerkhandbuch

Grundlagen · Fahrdynamik · Komponenten ·
Systeme · Mechatronik · Perspektiven

4., überarbeitete und ergänzte Auflage

Mit 1285 Abbildungen und 80 Tabellen

Herausgeber

Univ.-Prof. i. R. Dr.-Ing. Bernd Heißing
Wettstetten, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Stefan Gies
Volkswagen AG
Wolfsburg, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Metin Ersoy
Walluf, Deutschland

Das Fahrwerkhandbuch entstand mit freundlicher Unterstützung der ZF Friedrichshafen AG. Zuschriften und Verbesserungsvorschläge werden erbeten unter Fahrwerkhandbuch@zf.com.

ISBN 978-3-658-01991-4
DOI 10.1007/978-3-658-01992-1

ISBN 978-3-658-01992-1 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet [ber http://dnb.d-nb.de](http://dnb.d-nb.de) abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2007, 2008, 2011, 2013

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschtzt. 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 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 dürfen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.springer-vieweg.de

Vorwort

Auf Anregung des Vieweg Verlags wurde die renommierte Reihe ATZ/MTZ-Fachbuch 2007 um ein Handbuch zum Thema Fahrwerktechnik ergänzt, welches gleichermaßen die Grundlagen des Fahrwerks und der Fahrdynamik sowie die Merkmale der Komponenten, Systeme, Mechatronik und zukünftiger Entwicklungen aufzeigt. Dabei sollten die besonderen Belange von Automobilherstellern, Zulieferern und Hochschule Berücksichtigung finden. Zudem wurde besonderer Wert auf die Aktualität und leichte Lesbarkeit gelegt.

Unter dieser Zielsetzung wird nun die vierte Auflage dieses Handbuchs vorgelegt, in dem die genannten Themen mit zahlreichen Bildern und Tabellen systematisch, verständlich und übersichtlich dargestellt sind. 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 Fahrwerkenngrößen 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 Gummiverbundeilen 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 Anwendungen 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 Verbrauchssenkungen. Abschließend werden Konzep-

te und Systeme für das Fahrwerk von Morgen sowie Fahrwerke für Hybrid- und 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 vierten Auflage wurde das Buch nochmals komplett überarbeitet und der Inhalt um weitere 20 Seiten erweitert. Alle Fortschritte der letzten 5 Jahre in der Fahrwerktechnik wurden einbezogen. Zudem wurden mehrere neue Abschnitte über Lenksysteme, Elektrofahrwerke und Fahrerassistenzsysteme hinzugefügt. Mit den aktuellsten Fahrwerkentwicklungen und über 600 Literaturhinweisen – ein Großteil davon nach 2000 veröffentlicht – wurde der Stand der Technik im Jahre 2013 umfassend wiedergegeben. Zur besseren Verständlichkeit technischer Erläuterungen wurden 1285 Farbbildungen und 74 Tabellen beigelegt.

Auch in der vierten Auflage hat der neue Herausgeber, Herr Prof. Dr.-Ing. Stefan Gies, ein anerkannter Fachmann des Fahrwerks mit langjähriger Universitäts- und Industrieerfahrung, mitgewirkt. Somit ist sichergestellt, dass das Fahrwerkhandbuch auch in der Zukunft immer aktuell und für alle Fachleute interessant gehalten wird.

In diesem Handbuch haben 36 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 unermüdete Unterstützung unserer Office-Mannschaft in den Hochschulen (RWTH Aachen und TU München), der Industrie (Audi, Continental, Mubea, Schaeffler KG, FAG, VW, ZF Friedrichshafen AG) und im Springer Vieweg Verlag bei allen organisatorischen Aufgaben. Allen sagen wir an dieser Stelle ein herzliches Dankeschön.

München, im Juli 2013 Prof. Dr.-Ing. *Bernd Heißing*

Lemförde, im Juli 2013 Prof. Dr.-Ing. *Metin Ersoy*

Wolfsburg, im Juli 2013 Prof. Dr.-Ing. *Stefan Gies*

Autorenverzeichnis

- Albers, Ingo, Dr.-Ing.
2.3 / 2.4 / 2.5 / 6.5 / 9.2
ZF Friedrichshafen AG / Lemförde
www.zf.com
- Becherer, Thomas, Dr.-Ing.
3.9.1 bis 3.9.4 / 3.9.9
Continental AG / Hannover
www.conti.de
- Binner, Peter, Dipl.-Ing.
5.3
ZF Friedrichshafen AG / Bonn
www.zf.com
- Buchmann, Volker, Dipl.-Ing.
8.7 / 8.8
Volkswagen AG / Wolfsburg
www.volkswagen.de
- Burgstaler, Andree, Dipl.-Ing.
3.3.3.9
ZF Friedrichshafen AG / Lemförde
www.zf.com
- Demmerer, Stephan, Dr. rer.nat.
9.8
ZF Friedrichshafen AG / Friedrichshafen
www.zf.com
- Elbers, Christoph, Dr.-Ing.
2.1 / 2.3 / 2.4 / 6.5 / 8.1 / 8.4
ZF Friedrichshafen AG / Lemförde
www.zf.com
- Ersoy, Metin, Prof. Dr.-Ing.
**1 / 2.0 / 2.5 / 3.0 / 3.1 / 3.2 / 3.4.2.3 / 3.4.6
3.4.8 / 3.5.3.3 / 3.5.6 / 4 / 5.0 / 5.1 / 6 / 8
9.0 / 9.1 / 9.2 / 9.3 / 9.4 / 9.6 / 9.7 / 9.9**
früher: ZF Friedrichshafen AG / Lemförde
www.zf.com
- Eulenbach, Hans-Dieter, Dr.-Ing.
3.5.7 / 3.6.8
ZF Friedrichshafen AG / Northville (USA)
www.zf.com
- Gädke, Alexander, Dipl.-Ing.
3.4.1 / 3.4.2 / 3.4.5 / 3.4.7 / 3.4.9
ZF Lenksysteme / Schwäbisch Gmünd
www.zf-lenksysteme.com
- Gies, Stefan, Prof. Dr.-Ing.
1.3 / 4.3 / 4.8 / 9.9
Volkswagen AG / Wolfsburg
www.volkswagen.de
- Gilsdorf, Heinz-Joachim, Dipl.-Ing.
3.6.1 bis 3.6.7
ZF Friedrichshafen AG / FEZ-TE / Friedrichshafen
www.zf.com
- Gold, Henning, Prof. Dr.-Ing.
3.6.9
früher: FH Bingen, Bingen
- Greis, Christian, Dipl.-Ing.
3.4.4
Volkswagen AG / Wolfsburg
www.volkswagen.de
- Greul, Roland, Dipl.-Ing.
3.4.1 / 3.4.2 / 3.4.5 / 3.4.7 / 3.4.9
ZF Lenksysteme / Schwäbisch Gmünd
www.zf-lenksysteme.com
- Gruber, Steffen, Dipl.-Ing.
3.3
Continental AG / Frankfurt a. M.
www.contiteves.com
- Heißing, Bernd, Univ.-Prof. Dr.-Ing.
2.7 / 4.3 / 4.8 / 9.7 / 9.9
früher: Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (FTM)
Technische Universität München
www.ftm.mw.tum.de
- Hoffmann, Carsten, Dr.-Ing.
7.2 / 8.1 bis 8.5
früher: IKA Institut für Kraftfahrwesen / Aachen
www.ika.rwth-aachen.de
- Hüsemann, Thomas, Dipl.-Ing.
2.1 / 2.2 / 2.6
Porsche AG, Weissach
www.porsche.de
- Kramer, Klaus, Dipl.-Ing.
5.4 / 5.5 / 5.6
ZF Friedrichshafen AG / Damme
www.zf.com

Krimmel, Horst, Dr. rer. nat. 7	ZF Friedrichshafen AG / FEZ-TE / Friedrichshafen www.zf.com
Mundl, Reinhard, Dipl.-Ing., Dr. Tech. 3.9.1 bis 3.9.4 / 3.9.9	früher: Continental AG / Hannover www.conti.de
Neubrand, Jörg, Dr.-Ing. 3.5.1 bis 3.5.5	Mubea Fahrwerksfedern GmbH / Attendorn www.mubea.com
Ocvirk, Norbert, Dipl.-Ing. 3.3	Continental AG / Frankfurt a. M. www.continental-corporation.com
Partheymüller, Peter, Dr.-Ing. 3.8	Schaeffler KG FAG / Schweinfurt www.fag.com
Plank, Robert, Dr.-Ing. 3.8	Schaeffler KG FAG / Schweinfurt www.fag.com
Recker, Carla, Dr.-Ing. 3.9.1 bis 3.9.4 / 3.9.9	Continental AG / Hannover www.conti.de
Remfrey, James, Dipl.-Ing. 3.3	Continental AG / Frankfurt a. M. www.continental-corporation.com
Sauer, Wolfgang, Dr.-Ing. 5.1 / 5.2	Novisys / Bad Soden
Schäfer, Burkhardt, Dipl.-Ing. 3.4.3	ZF-Lenksysteme / Bremen www.zf-lenksysteme.com
Schick, Bernhard, Dipl.-Ing. 3.9.6.4 / 3.9.7 / 3.9.8	IPG Automotive GmbH / Karlsruhe www.ipg.de
Schimmel, Christian, Dr.-Ing. 2.7 / 2.8 / 8.6 / 8.7 / 8.8 / 9.1 / 9.5	Audi AG / Ingolstadt www.audi.de
Siemer, Hubert, Dipl.-Ing. 5.7 / 5.8 / 5.9	ZF Friedrichshafen AG / Damme www.zf.com
Vogel, Volker, Dipl.-Ing. 3.2	ZF Friedrichshafen AG / FEZ-TE / Friedrichshafen www.zf.com
Vortmeyer, Jens, Dipl.-Ing. 8.4	ZF Friedrichshafen AG / Lemförde www.zf.com
Wies, Burkhard, Dr.-Ing. 3.9.1 bis 3.9.4 / 3.9.9	Continental AG / Hannover www.conti.de

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Grundlagen	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	10
1.2 Fahrwerkaufbau	11
1.2.1 Fahrzeugklassen	11
1.2.2 Antriebskonzepte	12
1.2.3 Fahrwerkkonzeption	14
1.2.4 Trends in der Fahrwerkkonzeption	16
1.3 Fahrwerkauslegung	18
1.3.1 Anforderungen an das Fahrwerk	19
1.3.2 Fahrwerk-Kinematikauslegung	20
1.3.3 Kinematik der Radaufhängung	20
1.3.3.1 Kenngrößen des Fahrwerks am Fahrzeug	21
1.3.3.2 Momentanpole der Radaufhängung	23
1.3.3.3 Radhubkinematik	23
1.3.3.4 Kenngrößen der Radhubkinematik	24
1.3.3.5 Kenngrößen der Lenkkinematik	27
1.3.3.6 Kinematische Kennwerte aktueller Fahrzeugmodelle	31
1.3.3.7 Raderhebungskurven	31
1.3.3.8 Software zur Radkinematikberechnung	34
1.3.4 Elastokinematik und Bauteilelastizitäten der Radaufhängung	34
1.3.5 Zielwerte für die Kenngrößen	35
1.3.6 Synthese der Radaufhängungen	36
2 Fahrdynamik	38
2.1 Fahrwiderstände und Energiebedarf	39
2.1.1 Fahrwiderstände	39
2.1.1.1 Radwiderstände	39
2.1.1.2 Anteil der Fahrbahn $F_{R,Tr}$	43
2.1.1.3 Luftwiderstand	47
2.1.1.4 Steigungswiderstand	47
2.1.1.5 Beschleunigungswiderstand	49
2.1.1.6 Gesamtfahrwiderstand	50
2.1.2 Seitenwindkräfte	50
2.1.3 Leistungs- und Energiebedarf	53
2.1.4 Kraftstoffverbrauch	54
2.2 Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn	56
2.2.1 Physik der Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn	58
2.2.1.1 Bremsen und Antreiben	61
2.2.1.2 Kurvenfahrt	63
2.2.2 Reifenkräfte im Detail	67
2.2.3 Wirkung der Reifenkräfte auf die Fahrstabilität	69
2.3 Längsdynamik	70
2.3.1 Anfahren und Bremsen	71
2.3.1.1 Bremsnickausgleich	71
2.3.1.2 Anfahrnickausgleich	72
2.3.1.3 Lastwechsel bei Geradeausfahrt	72
2.4 Vertikaldynamik	73
2.4.1 Aufbaufedern	73
2.4.1.1 Federübersetzung	74
2.4.1.2 Eigenfrequenzen	74
2.4.2 Schwingungsdämpfer	75

2.4.3	Fahrbahn als Anregung	76
2.4.3.1	Harmonische Anregungen	76
2.4.3.2	Periodische Unebenheiten	77
2.4.3.3	Stochastische Unebenheiten	77
2.4.3.4	Spektrale Dichte der Fahrbahnunebenheiten	78
2.4.3.5	Gemessene, reale Fahrbahnunebenheiten	78
2.4.4	Zweimassen Feder-Dämpfersystem mit dem Reifen als Federelement	79
2.4.5	Federungsmodelle	81
2.4.5.1	Einmassen-Ersatzsystem	81
2.4.5.2	Zweimassen-Ersatzsystem	81
2.4.5.3	Erweiterung um Sitzfederung	82
2.4.5.4	Einspur-Federungsmodell	83
2.4.5.5	Zweispur-Federungsmodell	84
2.4.6	Parametervariation	86
2.4.7	Verknüpfung Fahrbahn–Fahrzeug	88
2.4.7.1	Spektrale Dichte der Aufbaubeschleunigung	89
2.4.7.2	Spektrale Dichte der Radlastschwankungen	90
2.4.8	Menschliche Schwingungsbewertung	91
2.4.9	Erkenntnisse aus den vertikaldynamischen Grundlagen	92
2.5	Querdynamik	93
2.5.1	Anforderungen an das Fahrverhalten	93
2.5.2	Lenkinematik	94
2.5.2.1	Statische Lenkungsauslegung	95
2.5.2.2	Dynamische Lenkungsauslegung	95
2.5.3	Fahrzeugmodellierung	96
2.5.3.1	Einfaches Einspurmodell	96
2.5.3.2	Einfache Betrachtungen der Fahrdynamik	98
2.5.3.3	Bewegungsvorgänge beim Über- und Untersteuern	101
2.5.3.4	Erweitertes Einspurmodell mit Hinterradlenkung	101
2.5.3.5	Nichtlineares Einspurmodell	103
2.5.3.6	Instantanäre Betrachtungen des einfachen Einspurmodells	103
2.5.4	Die Regelstrecke „Fahrzeug“ im Regelkreis	107
2.5.4.1	Dynamisches Verhalten der Regelstrecke Fahrzeug	107
2.5.4.2	Schwimmwinkelkompensation mittels Hinterradlenkung	110
2.5.5	Frequenzgangbetrachtung bei variierten Fahrzeugparametern	111
2.5.5.1	Variation der Fahrgeschwindigkeit	112
2.5.5.2	Variation des Gierträgheitsmoments	112
2.5.5.3	Variation der hinteren Schräglaufsteifigkeit	112
2.5.6	Zweispur-Fahrzeugmodellierung	113
2.5.7	Parametervariation	116
2.5.7.1	Variation der Schwerpunkthöhe (Variante 1)	116
2.5.7.2	Variation der Schwerpunktlage in Längsrichtung (Variante 2)	117
2.5.7.3	Variation der Wankachse (Variante 3)	117
2.5.7.4	Variation der Wankfederverteilung (Variante 4)	118
2.5.7.5	Variation des Antriebskonzepts (Variante 5)	119
2.6	Allgemeine Fahrdynamik	120
2.6.1	Wechselwirkungen zwischen Vertikal-, Längs- und Querdynamik	120
2.6.1.1	Vertikalkraftschwankungen	120
2.6.2	Kritische Fahr Situationen	121
2.6.2.1	Bremsen in der Kurve	121
2.6.2.2	Beschleunigte Kurvenfahrt	122
2.6.2.3	Lastwechsel in der Kurve	123
2.6.2.4	Vertikalanregung durch Fahrbahnunebenheiten bei Kurvenfahrt	124
2.6.2.5	Bremsen und Anfahren auf einer inhomogenen Fahrbahnoberfläche (μ -Split)	124
2.7	Fahrverhalten	125
2.7.1	Beurteilung des Fahrverhaltens	126
2.7.2	Fahrmanöver	127
2.7.3	Fahrmanöver Parameterraum	130
2.7.4	Abstimmungsmaßnahmen	132
2.7.4.1	Abstimmungsmaßnahmen zum stationären Lenkverhalten	132

2.7.5	Subjektive Fahrverhaltensbeurteilung	132
2.7.5.1	Bewertungsmethoden und Darstellung	132
2.7.5.2	Anfahrverhalten	135
2.7.5.3	Bremsverhalten	135
2.7.5.4	Lenkverhalten	135
2.7.5.5	Kurvenverhalten	139
2.7.5.6	Geradeausfahrt	139
2.7.5.7	Fahrkomfort (subjektiv)	139
2.7.6	Objektive Fahrverhaltensbeurteilung	144
2.7.6.1	Messgrößen	144
2.7.6.2	Anfahrverhalten	144
2.7.6.3	Bremsverhalten	145
2.7.6.4	Lenkverhalten	147
2.7.6.5	Kurvenverhalten	148
2.7.6.6	Geradeausfahrt	150
2.7.6.7	Fahrkomfort (objektiv)	152
2.8	Aktive und passive Sicherheit	152
3	Bestandteile des Fahrwerks	156
3.1	Struktur des Fahrwerks	156
3.1.1	Funktionelle Struktur des Fahrwerks	156
3.1.2	Modulare Struktur des Fahrwerks	157
3.1.3	Bestandteile des Fahrwerks	157
3.2	Antriebsstrang	158
3.2.1	Anordnungen	158
3.2.2	Achsgetriebe	158
3.2.2.1	Offene Differenziale	158
3.2.2.2	Formschlüssige Sperrdifferenziale	159
3.2.2.3	Selbstregelnde Sperrdifferenziale	159
3.2.2.4	Aktive Sperrdifferenziale	159
3.2.2.5	Torque Vectoring	161
3.2.3	Allradantrieb (Längsverteiler)	162
3.2.4	Allradantrieb (Längs-/Querverteiler)	163
3.2.5	Abschaltbare Allradsysteme	164
3.2.6	Betriebsstrategien	164
3.2.7	Aktuelle Allradsysteme	165
3.2.8	Seitenwellen	166
3.3	Radbremzen und Bremssysteme	167
3.3.1	Aufgaben und Grundlagen	168
3.3.2	Arten von Bremsanlagen	168
3.3.2.1	Allgemeine Anforderungen	169
3.3.3	Gesetzliche Vorschriften	170
3.3.4	Auslegung der Bremsanlage	170
3.3.4.1	Bremskraftverteilung	171
3.3.4.2	Dimensionierung	172
3.3.4.3	Bremskennung	173
3.3.5	Bremsmomente und Dynamik	173
3.3.5.1	Bremsmomente	173
3.3.5.2	Bremsdynamik	174
3.3.6	Komponenten des Bremssystems	175
3.3.6.1	Bremssattel	175
3.3.6.2	Bremsscheiben	179
3.3.6.3	Bremsbeläge	180
3.3.6.4	Trommelbremsen	180
3.3.6.5	Bremsleitungen und -schläuche	182
3.3.6.6	Bremsflüssigkeit	183
3.3.6.7	Bremskraftverstärker	183
3.3.6.8	Tandem-Hauptzylinder	186
3.3.6.9	Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI)	186

3.3.7	Elektronische Bremsregelsysteme	191
3.3.7.1	Bremsassistent (MBA, EBA, HBA)	191
3.3.7.2	Hydraulisch/Elektronische Regeleinheit (HECU)	192
3.3.7.3	Raddrehzahlsensor	194
3.3.7.4	Funktionen der elektronischen Bremssysteme	195
3.3.8	Neuartige Bremssysteme	200
3.3.8.1	Elektrohydraulische Bremse (EHB)	200
3.3.8.2	Elektromechanische Bremse (EMB)	201
3.3.8.3	Elektrohydraulische Kombibremse (EHC)	203
3.3.8.4	Regenerative Bremssysteme	204
3.3.8.5	Elektro-hydraulische Bremsbetätigung	204
3.3.9	Vernetztes Chassis	204
3.4	Lenksysteme	207
3.4.1	Anforderungen und Bauformen	207
3.4.2	Hydraulische Zahnstangenlenkung	210
3.4.2.1	Technik und Funktion	210
3.4.2.2	Aufbau und Bauteile	213
3.4.2.3	Spurstangen	216
3.4.3	Lenkstrang und Lenksäule	220
3.4.3.1	Komponenten und Funktionseinheiten	220
3.4.3.2	Auslegung und Erprobung	223
3.4.3.3	Crashanforderungen und Energieverzehrmehanismen	223
3.4.3.4	Ausblick und Modularisierung	227
3.4.4	Lenkrad	227
3.4.5	Elektromechanische Lenkung	229
3.4.5.1	Bauformen	230
3.4.5.2	Aufbau und Vorteile	233
3.4.5.3	Bedeutung der Lenkung für die Assistenzsysteme	236
3.4.6	Überlagerungs- oder Aktivlenkung	237
3.4.6.1	Überlagerung von Momenten	237
3.4.6.2	Überlagerung von Winkeln	237
3.4.6.3	Stellervarianten der Aktivlenkung	238
3.4.6.4	Überlagerungsaktor am Lenkgetriebe	238
3.4.6.5	Überlagerungsaktor in der Lenksäule	240
3.4.6.6	Überlagerungsaktor um die Zwischenwelle	240
3.4.6.7	Steuergerät und Sicherheitskonzept	241
3.4.6.8	Funktionen der Aktivlenkung	242
3.4.7	Zahnstangenservolenkung mit Momenten- und Winkelsteller	245
3.4.8	Hinterachs- und Allradlenkung	246
3.4.9	Steer-by-wire-Lenksystem und Einzelradlenkung	248
3.4.9.1	Systemkonzept und Bauteile	249
3.4.9.2	Technik, Vorteile und Chancen	251
3.5	Federn und Stabilisatoren	252
3.5.1	Aufgabe der Federung	252
3.5.2	Systematik der Federarten	252
3.5.3	Konstruktion und Berechnung von Stahlfedern	252
3.5.3.1	Blattfedern	253
3.5.3.2	Drehstabfedern	256
3.5.3.3	Stabilisatoren	257
3.5.3.4	Schraubenfedern	265
3.5.4	Werkstoffe für Stahlfedern	273
3.5.5	Herstellung von Stahlfedern	275
3.5.5.1	Warmumformung	276
3.5.5.2	Vergütung warmgeformter Federn	277
3.5.5.3	Kaltumformung	277
3.5.5.4	Kugelstrahlen	279
3.5.5.5	Plastifizieren	279
3.5.5.6	Korrosionsschutz	280
3.5.5.7	Endkontrolle und Markierung	281
3.5.6	Compositfedern	281

3.5.7	Federung für Niveauregelung	282
3.5.7.1	Aufgaben und Bauarten	282
3.5.7.2	Berechnung von Gasfedern und deren Eigenschaften	283
3.5.8	Federung durch Elastomerfeder	285
3.5.9	Federung durch Gaskompression	286
3.5.9.1	Vor- und Nachteile von Gasfedern	286
3.5.9.2	Luftfederung	287
3.5.9.3	Hydropneumatische Federung	287
3.6	Dämpfung	288
3.6.1	Aufgabe der Dämpfung	288
3.6.2	Teleskopdämpfer-Bauarten	291
3.6.2.1	Zweirohrdämpfer	292
3.6.2.2	Einrohrdämpfer	292
3.6.2.3	Vergleich beider Dämpferarten	293
3.6.2.4	Sonderbauarten	293
3.6.3	Stoßdämpferberechnung	294
3.6.4	Zusatzfunktionen im Dämpfer	295
3.6.4.1	Zug- und Druckanschlüge	295
3.6.4.2	Hubabhängige Dämpfung	297
3.6.4.3	Amplitudenselektive Dämpfung	298
3.6.5	Dämpferlager	300
3.6.6	Semiaktive Dämpfung	300
3.6.6.1	Lastabhängige Dämpfung	300
3.6.6.2	Elektrisch verstellbare Dämpfung	301
3.6.7	Alternative Dämpfungsprinzipien	305
3.6.7.1	Dämpfer mit rheologischen Flüssigkeiten	305
3.6.7.2	Verbunddämpfung	306
3.6.7.3	Elektrischer Dämpfer	306
3.6.8	Kombinierte Feder-/Dämpfereinheiten	306
3.6.8.1	Federträger und Federbein	307
3.6.8.2	Hydropneumatische Federung	308
3.6.8.3	Selbstpumpendes, hydropneumatisches Feder- und Dämpferelement	309
3.6.8.4	Luftfederung und hydraulischer Dämpfer	312
3.6.9	Gas-Feder-Dämpfereinheiten (GFD)	313
3.6.9.1	Physikalische Grundlagen	313
3.6.9.2	Auslegung der Gas-Feder-Dämpfereinheit	318
3.6.9.3	Ausführungsbeispiele von Gas-Feder-Dämpfereinheiten	325
3.6.9.4	Formelzeichen und Basisformeln der Gas-Feder-Dämpfer-Einheiten	326
3.7	Radführung	327
3.7.1	Aufgaben, Struktur und Systematik	327
3.7.2	Fahrwerklenker	328
3.7.2.1	Systematik der Fahrwerklenker	329
3.7.2.2	Führungslenker	330
3.7.2.3	Traglenker	330
3.7.2.4	Hilfslenker	330
3.7.2.5	Anforderungen an Fahrwerklenker	330
3.7.2.6	Werkstoffe für Fahrwerklenker	330
3.7.2.7	Herstellverfahren für Fahrwerklenker	332
3.7.2.8	Auslegung und Optimierung der Lenker	340
3.7.2.9	Integration der Gelenke an den Lenker	341
3.7.3	Kugelgelenk	342
3.7.3.1	Aufgabe und Anforderungen	343
3.7.3.2	Systematik für Kugelgelenke	343
3.7.3.3	Aufbau der Kugelgelenke	344
3.7.3.4	Lagersystem (Schale, Fett)	347
3.7.3.5	Dichtsystem (Balg, Spannring)	350
3.7.3.6	Führungsgelenke	352
3.7.3.7	Traggelenke	354
3.7.3.8	Hülsengelenke	355

3.7.4	Gummilager	356
3.7.4.1	Aufgabe, Anforderungen, Funktion	357
3.7.4.2	Ausführungen	359
3.7.5	Drehgelenk	361
3.7.6	Drehschubgelenk	361
3.7.7	Kugelschubgelenk	362
3.7.8	Achsträger	363
3.7.8.1	Aufgabe und Anforderungen	363
3.7.8.2	Systematik und Bauarten	363
3.8	Radträger und Radlager	366
3.8.1	Bauarten für Radträger	366
3.8.2	Werkstoffe und Herstellverfahren für Radträger	368
3.8.3	Bauarten für Radlager	369
3.8.3.1	Dichtung	371
3.8.3.2	Schmierung	372
3.8.3.3	ABS-Sensoren	372
3.8.4	Herstellung von Radlagern	374
3.8.4.1	Ringe und Flansche	374
3.8.4.2	Käfige und Wälzkörper	375
3.8.4.3	Montage	375
3.8.5	Anforderung, Auslegung und Erprobung	376
3.8.5.1	Ermüdungslebensdauer (Überrollfestigkeit) des Radlagers	378
3.8.5.2	Bauteilfestigkeit und Kippsteifigkeit	379
3.8.5.3	Verifizierung durch Prüfmethoden	381
3.8.6	Ausblick	382
3.9	Reifen und Räder	386
3.9.1	Anforderungen an den Reifen	386
3.9.1.1	Gebrauchseigenschaften	387
3.9.1.2	Gesetzliche Anforderungen	390
3.9.1.3	Umweltaspekte	392
3.9.2	Bauarten, Aufbau und Material	393
3.9.2.1	Reifenbauarten	393
3.9.2.2	Reifenaufbau	393
3.9.2.3	Sommer-, Winter-, All-Seasonreifen	394
3.9.2.4	Reifenmaterialien	394
3.9.2.5	Viskoelastische Eigenschaften von Gummi	395
3.9.3	Kraftübertragung Reifen–Fahrbahn	397
3.9.3.1	Tragverhalten	397
3.9.3.2	Kraftschlussverhalten, Aufbau von Horizontalkräften	397
3.9.3.3	Antreiben und Bremsen, Umfangskräfte	398
3.9.3.4	Schräglauf, Seitenkräfte und Rückstellmomente	399
3.9.3.5	Schräglaufsteifigkeit	400
3.9.3.6	Reifen unter Quer- und Längsschlupf	401
3.9.3.7	Reifengleichförmigkeit	401
3.9.4	Reifenmodelle für die Simulation	402
3.9.4.1	Reifenmodelle für die Horizontaldynamik	402
3.9.4.2	Reifenmodelle mit Finiten Elementen (FEM-Modelle)	404
3.9.4.3	Reifenmodelle für die Vertikaldynamik	404
3.9.4.4	Reifenmoden	405
3.9.4.5	Eigenschwingung der Kavität	405
3.9.4.6	Gesamtmodelle	405
3.9.5	Auswahl und Entwicklung von Reifen und Rädern	406
3.9.5.1	Reifen	406
3.9.5.2	Rad	406
3.9.6	Moderne Reifentechnologien	407
3.9.6.1	Reifensensorik	407
3.9.6.2	Reifennotlaufsysteme	410
3.9.6.3	Reifen und Regelsysteme	411
3.9.6.4	High-Performance-(HP-) und Ultra-High-Performance-(UHP-)Reifen	411

3.9.7	Test und Messmethoden im Fahrversuch	413
3.9.7.1	Subjektive Testverfahren	413
3.9.7.2	Objektive Testverfahren für die Längshaftung	414
3.9.7.3	Objektive Testverfahren für die Seitenhaftung	415
3.9.7.4	Akustik	415
3.9.8	Test und Messmethoden im Labor	415
3.9.8.1	Grundkonzepte für Reifenprüfstände	416
3.9.8.2	Festigkeitsprüfung	416
3.9.8.3	Charakteristikmessungen am Prüfstand	416
3.9.8.4	Charakteristikmessungen mit dem Laborfahrzeug	417
3.9.8.5	Rollwiderstandsmessung	417
3.9.8.6	Uniformity- und Geometrie-Messung	418
3.9.8.7	Streckenmessung und Modellierung	419
3.9.8.8	Verlustleistungsanalyse	420
3.9.8.9	Reifentemperaturverfahren	420
3.9.9	Zukünftige Reifentechnologien	421
3.9.9.1	Materialentwicklung	421
3.9.9.2	Rollwiderstandsenkung (Sparreifen)	422
3.9.9.3	Neuartige Reifenkonzepte	422
4	Achsen und Radaufhängungen	426
4.1	Starrachsen	428
4.1.1	Starrachsen mit Längsblatfederführung	430
4.1.2	Starrachsen mit Längs- und Querlenker	431
4.1.3	De-Dion-Achse: angetriebene Starrachse mit Zentralgelenk	433
4.1.4	Starrachsen mit Zentralgelenk- und Querlenkerführung (Deichselachse)	433
4.2	Halbstarrachsen	433
4.2.1	Verbundlenkerachsen	433
4.2.1.1	Torsionskurbelachse	436
4.2.1.2	Koppellenkerachse	436
4.2.1.3	Verbundlenkerachse	436
4.2.1.4	Verbundlenkerachse mit Wattgestänge	436
4.2.2	Dynamische Verbundachse (DVA)	436
4.3	Einzelradaufhängungen	437
4.3.1	Kinematik der Einzelradaufhängung	438
4.3.2	Eigenschaften der Einzelradaufhängungen	440
4.3.3	Einzelradaufhängungen mit einem Lenker	440
4.3.3.1	Längslenker-Einzelradaufhängungen	440
4.3.3.2	Schräglenker-Einzelradaufhängungen	441
4.3.3.3	Schraublenker-Einzelradaufhängungen	442
4.3.4	Einzelradaufhängungen mit zwei Lenkern	443
4.3.4.1	Quer-Längs-Pendelachsen	443
4.3.4.2	Trapezlenker mit einem Querlenker	444
4.3.4.3	Trapezlenker mit einem flexiblen Querlenker (Porsche Weissachachse)	444
4.3.5	Einzelradaufhängungen mit drei Lenkern	444
4.3.5.1	Längslenker mit zwei Querlenkern	444
4.3.5.2	Längslenker mit zwei Schräglenkern (Zentrallenker-Einzelradaufhängung)	445
4.3.5.3	Doppelquerlenker-Einzelradaufhängungen	445
4.3.6	Vierlenker – Einzelradaufhängungen der Hinterachse (Mehrlenker)	448
4.3.6.1	Mehrlenkerhinterachsen durch Auflösung des unteren 3-Punkt-Lenkens	450
4.3.6.2	Mehrlenkerhinterachsen durch Auflösung der oberen 3-Punkt-Lenker	450
4.3.6.3	Trapezlenkerachse (Integralenker)	451
4.3.6.4	Mehrlenkerhinterachsen mit Längslenker	451
4.3.7	Vierlenker – Einzelradaufhängungen der Vorderachse (Mehrlenker)	453
4.3.8	Einzelradaufhängungen mit fünf Lenkern	455
4.3.8.1	Fünflenker Einzelradaufhängung – Vorderachse	456
4.3.8.2	Fünflenker Einzelradaufhängung – Hinterachse (Raumlenker)	456
4.3.9	Federbein-Einzelradaufhängungen	457
4.3.9.1	Dreieckslenker-Federbeinaufhängung	459
4.3.9.2	McPherson mit Querverbindungsstraverse	459

4.3.9.3	McPherson mit optimiertem Lenker	460
4.3.9.4	McPherson mit aufgelöstem unteren Lenker (Dreilenker-Federbein)	460
4.3.9.5	McPherson mit doppeltem Radträger	460
4.3.9.6	Federbeinaufhängung für die Hinterachse	461
4.4	Einzelradaufhängungen der Vorderachse	462
4.4.1	Anforderungen an die Vorderachsaufhängungen	462
4.4.2	Komponenten der Vorderachse	463
4.4.3	Einsatzgebiete der Vorderachstypen	464
4.4.4	Besonderheiten der Vorderachsaufhängungen	464
4.5	Einzelradaufhängungen der Hinterachse	465
4.5.1	Anforderungen an die Hinterachse	465
4.5.2	Komponenten der Hinterachse	467
4.5.3	Einsatzgebiete der Hinterachstypen	467
4.5.4	Besonderheiten der Hinterachsaufhängungen	468
4.5.4.1	Nicht angetriebene Hinterachse	468
4.5.4.2	Angetriebene Hinterachse	468
4.5.4.3	Verbundlenker Hinterachsen	469
4.5.4.4	Mehrlenker Hinterachsen	469
4.6	Gesamtfahrwerk	469
4.6.1	Zusammenspiel von Vorder- und Hinterachse	469
4.6.2	Eigenlenkverhalten des Fahrzeugs	469
4.6.3	Achslastverlagerungen	469
4.6.4	Konstruktionskatalog als Auswahlhilfe für die Achstypen	469
4.7	Radaufhängungen der Zukunft	470
4.7.1	Achstypen der letzten 20 Jahre	470
4.7.2	Häufigkeit der aktuellen Achstypen	470
4.7.3	Die zukünftigen Vorderachstypen (Tendenzen)	472
4.7.4	Die zukünftigen Hinterachstypen (Tendenzen)	472
5	Fahrkomfort	475
5.1	Grundlagen, Mensch und NVH	475
5.1.1	Begriffe und Definitionen	475
5.1.2	Schwingungs- und Geräuschquellen	477
5.1.3	Wahrnehmungsgrenzen des Menschen	477
5.1.4	Das Wohlbefinden des Menschen	478
5.1.5	Maßnahmen gegen Schwingungen und Geräusche	479
5.1.6	Vorgehen bei der NVH-Optimierung	480
5.2	Gummiverbundteile	481
5.2.1	Funktion der Gummiverbundteile	481
5.2.1.1	Kräfte übertragen	481
5.2.1.2	Definierte Bewegungen ermöglichen	481
5.2.1.3	Geräusche isolieren	481
5.2.1.4	Schwingungen dämpfen	482
5.2.2	Elastomer spezifische Definitionen	483
5.2.2.1	Kennlinien	483
5.2.2.2	Dämpfung	484
5.2.2.3	Setzung	484
5.3	Aggregatelager	485
5.4	Fahrwerk – Gummilager	489
5.4.1	Hülsenlager	489
5.4.2	Gleitlager	491
5.4.3	Hydraulisch dämpfende Buchsen	492
5.4.5	Verbundlenkerlager	494
5.5	Achsträgerlager	494
5.6	Federbeinstützlager	496
5.7	Berechnungsmethoden	497
5.8	Akustische Bewertung von Gummiverbundteilen	499
5.9	Zukünftige Bauteilausführungen	499
5.9.1	Sensorik	500
5.9.2	Schaltbares Fahrwerkklager	501
5.9.3	Regelbares Fahrwerkklager	502

6 Fahrwerkentwicklung	504
6.1 Entstehung des Fahrwerks	504
6.1.1 Entwicklungsprozess	505
6.1.2 Projektmanagement (PM)	510
6.2 Planung und Definitionsphase	510
6.2.1 Zielwertkaskadierung	511
6.3 Konzeptphase	512
6.4 Virtuelle Simulation	512
6.4.1 Software für die Mehrkörpersimulation (MKS)	513
6.4.1.1 Aufbau von MKS-Fahrwerksmodellen mit ADAMS/Car	513
6.4.1.2 CAD-Fahrwerkmodell und Mehrkörpersystem	513
6.4.1.3 Mehrkörpersimulation mit starren und flexiblen MKS-Modellen	513
6.4.1.4 Mehrkörpersimulation mit Gesamtfahrzeug-, Fahrwerk- und Achsmodellen	515
6.4.1.5 Einfluss der Fertigungstoleranzen auf die kinematischen Kennwerte	515
6.4.2 Software für Finite Elemente Methode (FEM)	515
6.4.2.1 Klassifizierung der Analysen	517
6.4.2.2 Festigkeitsanalysen	517
6.4.2.3 Steifigkeitsanalysen	517
6.4.2.4 Eigenfrequenzanalysen	518
6.4.2.5 Lebensdauer-Betriebsfestigkeit	518
6.4.2.6 Crash-Simulationen	519
6.4.2.7 Topologie- und Formoptimierung	519
6.4.2.8 Simulation der Fertigungsverfahren	520
6.4.3 Vollfahrzeugsimulation	520
6.4.3.1 Fahrdynamiksimulation	520
6.4.3.2 Kinematik/Elastokinematik	520
6.4.3.3 Standard-Lastfälle	521
6.4.3.4 MKS-Modellverifikation	522
6.4.3.5 NVH	522
6.4.3.6 Loadmanagement (Lastenkaskadierung vom System zur Komponente)	522
6.4.3.7 Vollfahrzeug Betriebsfestigkeitssimulation	527
6.4.4 Software zur 3D-Modellierung CAD	527
6.5 Integrierte Simulationsumgebung	528
6.5.1 Kinematische Analyse: Basistool ABE	528
6.5.2 Vollautomatische Kinematik- und Elastokinematik-Optimierung OPT	530
6.5.3 Virtuelle Produktentwicklungsumgebung	531
6.6 Serienentwicklung und Absicherung	533
6.6.1 Konstruktion	533
6.6.1.1 Bauteilkonstruktion	534
6.6.1.2 Bauraum „Package“	534
6.6.1.3 Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse	535
6.6.1.4 Toleranzuntersuchungen	535
6.6.2 Validierung	536
6.6.2.1 Prototypen	536
6.6.2.2 Validierung am Prüfstand	536
6.6.2.3 Straßen-Simulationsprüfstand (SSP)	538
6.6.3 Validierung am Gesamtfahrzeug	540
6.6.4 Optimierung und Abstimmung	540
6.7 Serienbegleitende Entwicklung	540
6.8 Ausblick und Zusammenfassung	541
7 Fahrwerkelektronik	543
7.1 Motivation und Nutzen	543
7.1.1 Grenzen passiver Fahrwerke	543
7.1.1.1 Zielkonflikt Dämpfungsauslegung	543
7.1.1.2 Zielkonflikt Federungsauslegung	544
7.1.1.3 Zielkonflikt Lenkübersetzung	544
7.1.1.4 Forderung nach aktiven Systemen	544
7.1.2 Fahrzeugführung	545
7.1.2.1 Regelkreis Fahrer–Fahrzeug	545
7.1.2.2 Vereinfachte Fahrzeugführung	545

7.2 Unterteilung der Fahrwerkregelsysteme	546
7.2.1 Begriffsbestimmungen	546
7.2.2 Unterteilung der Fahrwerkregelsysteme in Domänen	546
7.3 Längsdynamikfunktionen	547
7.3.1 Traktionsregelung mit dem Allradverteilergetriebe	547
7.3.2 Traktionsregelung Achsgetriebe	548
7.3.3 Torque Vectoring	549
7.4 Vertikaldynamikfunktionen	550
7.4.1 Variable Dämpfer	550
7.4.2 Aktiver Stabilisator	551
7.4.3 Niveauregulierung	552
7.5 Querdynamikfunktionen	552
7.5.1 Elektrolenkung	553
7.5.2 Überlagerungslenkung	554
7.5.3 Hinterachslenkung	554
7.6 Systemvernetzung und Funktionsintegration	555
7.6.1 Systemvernetzung	555
7.6.2 Fahrdynamikregelung	556
7.6.3 Funktionsintegration	559
7.6.4 Funktionsarchitektur	559
7.6.5 Standardschnittstellen / Autosar	560
7.7 Elektronik-Hardware, Sensorik und Aktuatorik	561
7.7.1 Technologiebeispiele	561
7.7.2 Umwelanforderungen	564
7.7.3 Bussysteme im Fahrwerk	565
7.7.3.1 CAN-Bus	565
7.7.3.2 FlexRay	565
7.7.4 Aktuatoren im Fahrwerk	566
7.7.5 Sensoren im Fahrwerk	567
7.8 Entwicklung der Fahrwerkregelsysteme	569
7.8.1 Entwicklung gemäß Automotive SPICE	569
7.8.2 Funktionale Sicherheit	571
7.8.3 Simulation der Fahrwerkelektronik	572
7.8.4 Hardware-in-the-Loop-Simulation	574
8 Elektronische Systeme im Fahrwerk	576
8.1 Elektronische Struktur des Fahrwerks	576
8.2 Mechatronische Längsdynamiksysteme	576
8.2.1 Antriebssysteme	576
8.2.1.1 xDrive	577
8.2.1.2 Active Yaw Control (AYC)	578
8.2.1.3 Quattro Sport Differenzial	579
8.2.1.4 Weitere aktive Allradantriebssysteme	581
8.2.1.5 Systeme mit Frontantrieb-Querverteiler Überlagerungsdifferenzial	581
8.2.1.6 4Motion von VW	582
8.2.2 Bremssysteme	582
8.2.2.1 Grundlagen des Bremsen-Fahrdynamikreglers	582
8.2.2.2 Zusatzfunktionen in aktiven Bremssystemen	583
8.3 Mechatronische Vertikaldynamiksysteme	584
8.3.1 Anforderungen an die Vertikalsysteme	584
8.3.2 Einteilung der Vertikalsysteme	584
8.3.3 Dämpfungssysteme	586
8.3.3.1 Adaptive Dämpfungssysteme	586
8.3.3.2 Semi-aktive Dämpfungssysteme	587
8.3.3.3 Regelstrategien für semi-aktive Dämpfer	589
8.3.4 Niveauregulierungssysteme	590
8.3.5 Adaptive Luftfederungssysteme	591
8.3.6 Aktuelle aktive Federungssysteme	593
8.3.6.1 Langsam-aktive Fahrwerksysteme	593
8.3.6.2 Voll-aktive, integrierte Fahrwerksysteme	596
8.3.7 Lagersysteme	598

8.4	Mechatronische Querdynamiksysteme	600
8.4.1	Vorderradlenkung	600
8.4.2	Hinterradlenkung	602
8.4.3	Wankstabilisierungssysteme	610
8.4.3.1	Passiver Stabilisator	611
8.4.3.2	Schaltbare Off-Road-Stabilisatoren	611
8.4.3.3	Schaltbare On-Road-Stabilisatoren	611
8.4.3.4	Semiaktive Stabilisatoren	612
8.4.3.5	Hydraulische aktive Stabilisatoren	613
8.4.3.6	Elektrische aktive Stabilisatoren	616
8.4.4	Aktive Kinematik	618
8.4.5	Gegenüberstellung der Fahrdynamiksysteme	621
8.4.6	Vernetzung der Fahrwerksysteme	623
8.5	X-by-wire	624
8.5.1	Steer-by-wire	624
8.5.2	Brake-by-wire	625
8.5.2.1	Elektrohydraulische Bremse (EHB)	626
8.5.2.2	Elektromechanische Bremse (EMB)	626
8.5.2.3	Elektromechanische Bremse von Conti-Teves	626
8.5.2.4	Elektrohydraulische Combi-Bremse (EHC)	627
8.5.2.5	Radialbremse	628
8.5.2.6	Keilbremse	628
8.5.2.7	Mechatronische Bremse	629
8.5.3	Leveling-by-wire	630
8.6	Fahrerinformationssysteme	630
8.7	Fahrerwarnsysteme	631
8.7.1	Fahrerwarnung bei der Längsführung	631
8.7.2	Fahrerwarnung bei der Querverführung	632
8.8	Fahrerassistenzsysteme	633
8.8.1	Bremsassistentz	633
8.8.1.1	Sicherheitsrelevante Bremsassistentz	634
8.8.1.2	Komfortorientierte Bremsassistentz	636
8.8.1.3	Anforderungen an die Bremsassistentz	636
8.8.2	Distanzhalteassistentz	637
8.8.2.1	Front Assist von VW	637
8.8.2.2	Distronic Plus von Mercedes-Benz	638
8.8.2.3	ACC Systeme anderer Automobilhersteller	639
8.8.2.4	Car2Car-Kommunikation zur Verkehrssicherheit	640
8.8.3	Lenkassistentz	640
8.8.3.1	Lenkassistentz durch Anpassung der Unterstützungskraft	640
8.8.3.2	Lenkassistentz durch Überlagerung des Fahrerhandmoments	641
8.8.3.3	Lenkassistentz durch Überlagerung des Fahrerlenkwinkels	644
8.8.3.4	Lenkassistentz durch kombinierten Eingriff aus Lenkradwinkel und -moment	645
8.8.4	Einparkassistentz	645
8.8.4.1	Einführung	645
8.8.4.2	Parklückenerkennung	646
8.8.4.3	Einparkvorgang	647
8.8.4.4	Lenkaktuator	648
8.8.5	Zusammenfassung	648
9	Zukunftsaspekte des Fahrwerks	652
9.1	Fahrwerkkonzepte – Fokussierung auf den Kundenwert	653
9.1.1	Auslegung des Fahrverhaltens	653
9.1.2	Diversifizierung und Stabilisierung der Fahrwerkkonzepte	654
9.1.2.1	Vorderachsen	655
9.1.2.2	Hinterachsen	655
9.1.3	Fahrwerkbestandteile der Zukunft	655
9.1.3.1	Achsantrieb der Zukunft	655
9.1.3.2	Bremse der Zukunft	655
9.1.3.3	Lenkung der Zukunft	656

9.1.3.4	Federung der Zukunft	656
9.1.3.5	Dämpfung der Zukunft	656
9.1.3.6	Radführung der Zukunft	656
9.1.3.7	Radlager der Zukunft	656
9.1.3.8	Reifen und Räder der Zukunft	656
9.1.4	Elektronische Fahrwerksysteme der Zukunft	656
9.1.4.1	Systemvernetzung	657
9.1.4.2	Leistungsfähigkeit	657
9.1.4.3	Systemsicherheit	658
9.1.4.4	Elektronik Entwicklungsprozess	658
9.1.4.5	Anforderungen an die Datenübertragung	658
9.2	Umweltschutz und CO ₂	659
9.2.1	Bedeutung der CO ₂ -Senkung	659
9.2.2	Beitrag des Fahrwerks zur CO ₂ -Senkung	659
9.2.2.1	Reifen und Bremse	660
9.2.2.2	Nebenaggregate mit Elektroantrieb	660
9.2.2.3	Fahrwerkgewicht	660
9.2.2.4	Fahrwiderstand	660
9.2.2.5	Energierückgewinnung an Stoßdämpfern	661
9.2.2.6	Zusammenfassung	661
9.2.3	Beitrag des Hybridantriebs zur CO ₂ -Senkung	662
9.2.3.1	Mild- und Parallel-Hybridantriebe	665
9.2.3.2	Seriell-Hybridantriebe	665
9.2.4	Bremsblending für Rekuperation	667
9.3	Elektrofahrzeuge	668
9.3.1	Antriebskonzepte für das Elektrofahrzeug	668
9.3.2	Fahrwerkkonzepte für Elektro-Autos	670
9.3.2.1	Fahrwerkkonzepte mit zentralem Elektromotor	671
9.3.2.2	Fahrwerkkonzepte für zwei Elektromotoren	671
9.3.2.3	Fahrwerkkonzepte für radnahen Antrieb	672
9.3.2.4	Fahrwerkkonzepte für Radnaben-Antriebe	673
9.3.2.5	Gegenüberstellung radnahe Antriebe und Radnaben-Antriebe	674
9.3.3	Elektro-Radnabenfahrwerk „eCorner“	674
9.4	X-by-wire-Systeme der Zukunft	675
9.5	Fahrerassistenz-Systeme der Zukunft	676
9.6	Vorausschauende und intelligente Fahrwerke der Zukunft	677
9.6.1	Fahrzeugsensorik	677
9.6.2	Aktuatorik	679
9.6.3	Vorausschauendes Fahren	679
9.7	Autonomes Fahren in der Zukunft?	682
9.7.1	Selbstfahrendes Chassis, Rolling/Driving Chassis	682
9.7.2	Urban Challenge 2007: Die ersten Schritte zum autonomen Fahren	684
9.7.3	Autofahren ohne Fahrer	685
9.8	Zukunftsszenarien für das Auto und sein Fahrwerk	687
9.8.1	Trends aus der Vergangenheit	687
9.8.2	Trends aus der Gegenwart	687
9.8.3	Trends der Zukunft	688
9.8.4	Szenarioanalyse	688
9.8.5	Mögliche Zukunftsvisionen	689
9.9	Ausblick	690
Glossar	694
Sachwortverzeichnis	717

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	Car 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 Hinterachskinematik	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	Continuous Controlled Electronic Suspension
AOS	Adaptive Off-Road Stabilizer		
APB	Aktive Parkbremse – Active Parking Brake	CMOS	Complimentary Metal Oxid Semiconductor
APS	Automatic Parking System		
APQP	Advanced Product Quality Planning		
ARK	Active Rear Axle Kinematics	DARPA	Defense Advance Research Projects Agen.
ARM	Active Roll Mitigation	DBC	Dynamic Brake Control
ARP	Active Rollover Control	DBS	Dynamic Brake Support
ARS	Active Roll Stability	DC	DaimlerChrysler
ART	Abstandsregeltempomat	DD	Dynamic Drive
ASC	Automatic Stability Control	DDE	Digitale Dieselelektronik
ASCA	Active Suspension via Control Arm	DDS	Deflation Detection System
ASCS	Active Suspension Control System	DIN	Deutsches Institut für Normung
ASCx	Automatic Stability Control x (Allwheel)	DME	Digitale Motorelektronik
ASD	Amplitudenselektive Dämpfung	DMU	Digital Mock Up
ASIC	Application Specific Integrated Circuit	DOE	Design of Experiment
ASL	Anhänger-Schlingern-Logik	DQL	Doppelquerlenker
ASM	Asynchron Maschine (Motor)	DRC	Dynamic Ride Control
ASMS	Autom. Stabilitätsmanagementsystem	DSC	Dynamic Stability Control (BMW)
ASR	Antriebsschlupfregelung	DSP	Dynamisches Stabilitätsprogramm
ASTC	Advanced Stability Control	DSCT	Dynamic Stability and Traction Control
ATC	Active Tilt Control	DSR	Driver Steering Recommendation
ATTC	Active Tire Tilt Control	DTC	Dynamic Traction Control
ATTS	Active Torque Transfer System	DXC	Dynamic x(Allrad) Control
AUN	Allgemeiner Unebenheitsindex		
AUTOSAR	Automotive Open System Architecture	eABC	Electromechanical Active Body Control
AWD	All Wheel Drive	EAS	Electronic Active Steering Assistant
AWS	All Wheel Steering	EASS	Electric Active Stabilizer Suspension System
AYC	Active Yaw Control		
		EBA	Elektronischer Bremsassistent
BAB	Bundesautobahn	EBC	Electronic Body Control
BAS	Bremsassistentz	EBD	Electronic Brake Distribution
BASR	Bremsen-Antriebs-Schlupf-Regelung	EBM	Elektronisches Bremsen-Management
BBA	Betriebsbremsanlage	EBS	Electronically Controlled Braking System
BBC	Brake Boost Control	EBV	Elektronische Bremskraftverteilung
BbW	Brake by Wire	ECD	Electronic Controlled Deceleration

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

RADAR	Radio Detection and Ranging	THz	Tandemhauptbremszylinder
RDK	Reifendruckkontrolle	TMC	Tandem Main Cylinder
RIM	Radindividuelle Momentenregelung	TOD	Torque on Demand
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 Ratio 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)		
TCM	Traffic Channel Message		

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 *CO₂-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 vortrieb mit den Elementen des Antriebsstrangs den Vortrieb des Fahrzeuges.

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**).

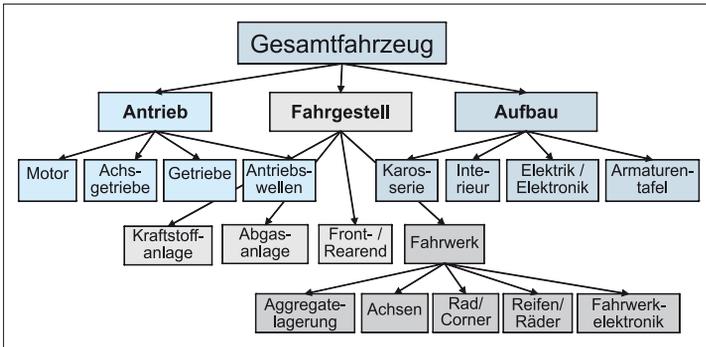


Bild 1-1: Hauptbaugruppen des Gesamtfahrzeugs

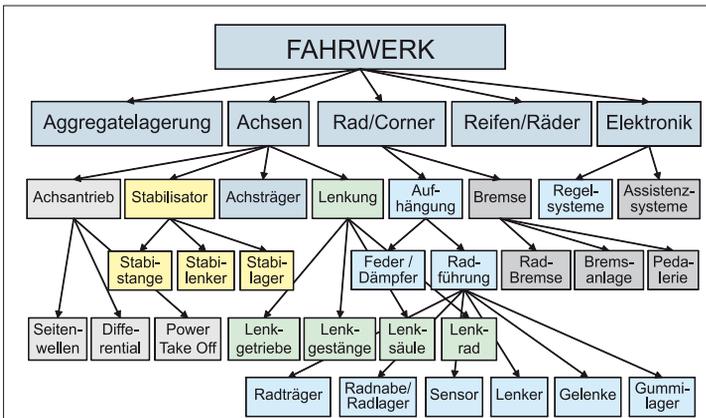


Bild 1-2: Bestandteile eines modernen Fahrwerks

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	AUFBAU
Zwischensumme	604	604	550	577	584	39,4	
Fahrwerk	233	180	191	187	198	13	
Räder + Reifen	94	92	87	97	93	6	FAHRWERK
Zwischensumme	326	272	279	285	290	19,6	
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	ANTRIEB
Zwischensumme	400	366	355	336	364	24,5	
Klimaanlage	28	29	26	27	28	2	
Elektrik	57	49	40	46	48	3	AGGREGAT
Zwischensumme	85	77	66	73	75	5,1	
Andere	196	210	115	157	170	11	SONSTIGES
Zwischensumme	196	210	115	157	170	11,4	
TOTAL kg	1611	1530	1365	1428	1483	100	

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

Das Fahrwerk ist die Verbindung des Fahrzeuges zur Straße und realisiert alle Hauptfunktionen, die zum Führen des Fahrzeuges erforderlich sind: Antriebsmoment auf die Fahrbahn übertragen (Fahrwiderstände 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 wichtigen 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 *gedeferten* Wagen mit *Lenkung* und *Bremsen* entstanden im zehnten Jahrhundert in Mitteleuropa (**Bild 1-5**); Blattfedern dienten als Federungselement, ein an einer Kette hängender Bremsschuh am Rad als Bremse und die in der Mitte drehbar gelagerte Achse als Mühlenlenkung. Die Fahrzeugmasse war in einen *gedeferten* und einen *ungefederten* Anteil getrennt; erste Voraussetzung, um die Geschwindigkeit der Wagen über 30 km/h zu erhöhen.

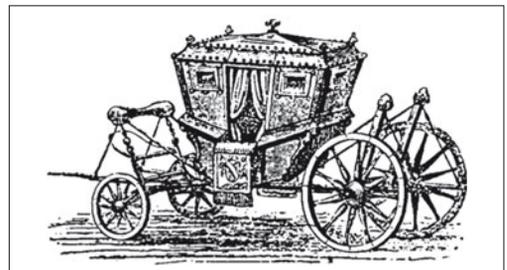


Bild 1-5: Pferdekutsche mit Aufhängung, Federung, Bremse und Lenkung

Der Fahrkomfort konnte im 18. Jahrhundert durch die Eigendämpfung der elliptischen Blattfederpakete weiter verbessert werden; die Reibung zwischen den Blättern wirkte als Schwingungsdämpfer. Die Blattfedern übernahmen 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 ein Grund dafür, dass zu Beginn des 19. Jahrhunderts Fahrzeuge mit schweren Dampfantrieben 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 parallelem 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] (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, Kuhschwanzlenkung, elliptische Blattfederung, Klotzbremsen, Lederriemenschwingungsdämpfer 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)

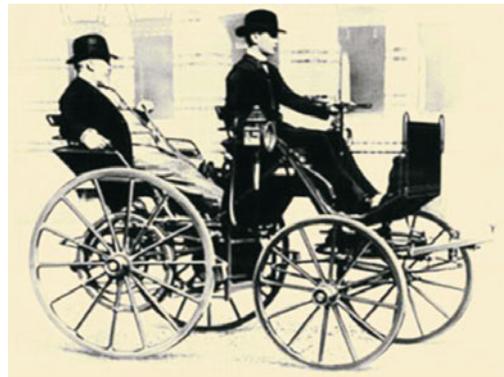


Bild 1-7: Der erste Daimler „Motorkutsche“ (1886)



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 Schwingungsdämpfer, Kugelgelenke, Gummilager, Zahnstangenservolenkung, hydraulische Allradbremse, Scheibenbremse, Wälz- statt Gleitlagerung des Rades, 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 durch die Weiterleitung des Antriebsmomentes über eine Kardanwelle zur Hinterachse 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 viel 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 einen Anteil von weltweit 75 %) brachte besonders für kleinere Fahrzeuge viele sehr wichtige Vorteile: gerin-



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 Lizy“ aus dem Jahr 1908

ges Gewicht, kompakte Maße, größere Innenräume, gutmütiges Fahrverhalten und vor allem niedrigere Kosten.

Das Antreiben von beiden Achsen – besonders bei hochmotorisierten Motoren und schwierigen Fahrbahnbedingungen – bringt viele Vorteile. Es verursacht jedoch mehr Kosten und Gewicht. Abgesehen von Gelände- und Militärfahrzeugen wurden erste Pkws mit Allradantrieb mit dem Jensen FF in Kleinserie (1966) und dem Subaru Leone 4WD in Großserie (1972) produziert. Als erster Großserien-Personenwagen mit permanentem Allradantrieb wurde der Audi Quattro im März 1980 auf dem Genfer Autosalon vorgestellt. Heute werden viele Automodelle, besonders die SUVs serienmäßig mit Allradantrieb angeboten.

Bremse: Die Klotzbremzen 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 Teilbelagscheibenbremse, 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 Bremsscheibe 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 Dampfauto 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 Dampfauto „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

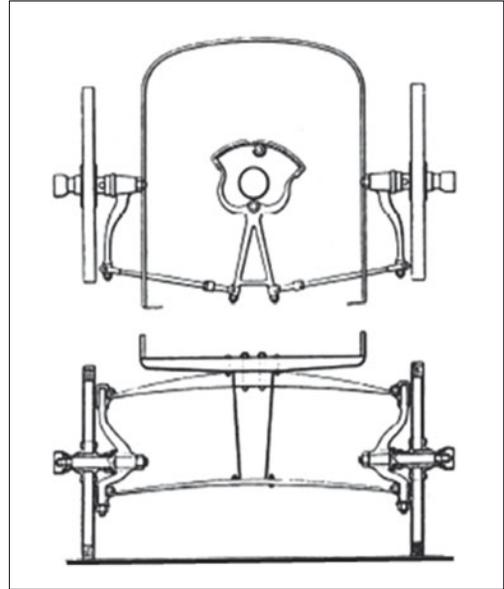


Bild 1-11: Die Vorderachse des Bolleë's Dampfauto „La Mancelle“ (1878) mit Zahnstangenlenkung (oben) und Doppelquerlenker Blattfederaufhängung (unten)

schlechten Wirkungsgrades noch lange Zeit durch die Schnecke und Wälze 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.

Der wichtigste Fortschritt im Lenksystem ist relativ jung. Nach jahrelangem Einsatz von hydraulischen Servolenkungen kamen nach 1988 die Serienanwendungen der Zahnstangenlenkung, die durch einen Elektromotor angetrieben wird; zuerst in Kleinwagen eher als Parkierhilfe, dann auch in den Volumenmodellen der Mittelklasse (z. B. in VW Golf ab 2002) für alle Fahr-situationen. Diese werden *EPS (electric powered steering)* genannt. Der wesentliche Vorteil des elektrischen Antriebs liegt darin, die Lenkung adaptiv ausulegen, um dadurch Assistenzsysteme ermöglichen zu können bzw. die passive Sicherheit zu erhöhen. Aber auch die Kraftstoffreduzierung von bis zu 0,5 l/100 km/h durch den Elektroantrieb ist von großer Bedeutung.

Die Lenkung war immer Teil der Vorderachse, weil die Führung eines Fahrzeugs bei höheren Geschwin-

digkeiten 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 wurde, wird sie heutzutage wieder verstärkt eingesetzt.

Zur Geschichte der Lenkung gehören auch Innovationen wie die verstellbare Lenksäule in den USA und die von Béla Barény 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 Grégoire 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. Drehstabs-torsionsfedern sind zwar platz sparend und nachjustierbar, aber deutlich teurer. Deshalb werden sie heute so gut wie nie 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 Einfedergeschwindigkeit 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 Teleskoprohren 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 Dämpferate 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 1994 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



Bild 1-12: Vertikalvorderradführung von Stepens 1898

„Motorwagen Wartburg“, oder entlang der Lenkgabel, wie bei Stephens (**Bild 1-12**). Die senkrechte (Teleskop-)Vorderradführung kam später in 1922 im Lancia Lambda, zum Serieneinsatz [11].

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

Die Doppellängskurbel – wie beim VW Käfer – und die Doppelquerlenkeraufhängung – 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, bei Citroen und Opel 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 außerdem 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 Drehtagern. 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 (heute TRW) 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, die sich in Fahrrädern als Nabenlagerung bewährt hatten, auch bei Kraftfahrzeugen als Radlagerung eingesetzt, zuerst als Kegellager und später als Schrägkugellager.

Reifen: Der Luftreifen hat seinen 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 damals der hohle Massivgummireifen im Einsatz, der Geschwindigkeiten nur 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 Felgenwulst 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 realisierbar war 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