

Bernd Heißing | Metin Ersoy (Hrsg.)

Fahrwerkhandbuch

Bernd Heißing | Metin Ersoy (Hrsg.)

Fahrwerkhandbuch

Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten,
Systeme, Mechatronik, Perspektiven

2., verbesserte und aktualisierte Auflage

Mit 974 Abbildungen und 76 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“

1. Auflage 2007
- 2., verbesserte und aktualisierte Auflage 2008

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2008

Lektorat: Ewald Schmitt | Gabriele McLemore

Der Vieweg+Teubner Verlag ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media.
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 und Technische Redaktion: Klementz publishing services, Gundelfingen
Druck und buchbinderische Verarbeitung: MercedesDruck, Berlin
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.
Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0444-0

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 Hochschulen mussten, ohne zu sehr ins Detail zu gehen, in diesem Handbuch Berücksichtigung finden. Dabei wurden auf die Aktualität und leichte Lesbarkeit besonders Wert gelegt und alle Themen 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.

In einem ersten Teil werden Konzepte, Aufbau und Auslegung, die physikalischen Grundlagen der Längs-, Vertikal- und Querdynamik erklärt und die Fahrwerkkenngößen mit deren Bedeutung für die Fahreigenschaften beschrieben. Es schließen sich sehr ausführlich die Bestandteile des Fahrwerks wie Bremsen, Lenkung, Federung, Dämpfung, Radführung, Radlagerung bis zu den Reifen und Rädern an. Danach folgen die Beschreibung und die Gegenüberstellung 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- und Serieneinführungsphase, das Simulieren und Entwerfen bis zum Validieren der Komponenten, Module und Systeme des Fahrwerks umfassen, werden dargestellt. Die Systeme, welche die aktuellen Sicherheits- und Komfortansprüche im Fahrwerk erfüllen und dem Fahrer assistieren, werden im vorletzten Kapitel vorgestellt; es umfasst alle elektronischen und mechatronischen Fahrwerksysteme, die aktiv, semiaktiv, adaptiv oder durch X-by-wire funktionieren. Das letzte Kapitel geht weit in die Zukunft und untersucht die Konzepte und Systeme für das Fahrwerk von morgen sowie Fahrwerke für Hybridfahrzeuge. Vorausschauende und intelligente Fahrwerke und das autonome Fahren sowie die Visionen der „driving chassis“ und „e-corner“ werden diskutiert. In den drei Zukunftsszenarien wird versucht herauszufinden, wie das Fahrwerk in 2025 aussehen könnte.

In diesem Handbuch haben fast 40 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, TÜV-Süd, ZF Friedrichshafen) und im Vieweg Verlag bei allen organisatorischen Aufgaben. Allen sagen wir an dieser Stelle ein herzliches Dankeschön.

Die Leser dieses Buches bitten wir, uns ihre Anregungen, Verbesserungs- bzw. Ergänzungsvorschläge unter der Email-Adresse fahrwerkhandbuch@zf.com mitzuteilen, damit wir diese bei der weiteren Entwicklung des Fahrwerkhandbuchs berücksichtigen können.

Autorenverzeichnis

Albers, Ingo, Dipl.-Ing. 2.3, 2.4, 2.5	IKA Institut für Kraftfahrwesen, Aachen www.ika.rwth-aachen.de
Binner, Peter, Dipl.-Ing. 5.3	ZF Boge Elastmetall GmbH, Bonn www.zf.com
Brändle, Markus, Dipl.-Ing. 7.8	Technische Universität München www.ftm.mw.tum.de
Burgstaler, Andree, Dipl.-Ing. 3.3.6.8	ZF Boge Elastmetall GmbH, Damme www.zf.com [z. Z.: ZF Lemförder GmbH, Lemförde]
Carlitz, Andreas, Dr.-Ing. 3.5.1 bis 3.5.4	Mubea Fahrwerksfedern GmbH, Attendorf www.mubea.com
Causemann, Peter, Dr.-Ing. 3.5.6 bis 3.5.8, 3.6	früher ZF Sachs AG, Schweinfurt
Demmerer, Stephan, Dr. rer.nat. 8.8	ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen www.zf.com
Elbers, Christoph, Dr.-Ing. 2, 2.1 bis 2.7, 7.6, 7.7	ZF Lemförder GmbH, Lemförde www.zf.com
Ersoy, Metin, Prof. Dr.-Ing. 1, 3.1, 3.2, 3.4.3, 3.7, 4, 6, 7.6.3.6, 8.1.3, 8.4, 8.5, 8.7, 8.9	ZF Lemförder GmbH, Lemförde www.zf.com
Gies, Stefan, Prof. Dr.-Ing. 4.1 bis 4.5	IKA Institut für Kraftfahrwesen, Aachen www.ika.rwth-aachen.de (früher: Audi AG, Ingolstadt)
Gruber, Steffen, Dipl.-Ing. 3.3	Continental Teves AG & Co., oHG, Frankfurt a. M. www.contiteves.com
Heißing, Bernd, Univ.-Prof. Dr.-Ing. 2.8, 2.9, 4, 7.8, 8.1 bis 8.5, 8.9	FTM Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik Technische Universität München www.ftm.mw.tum.de
Hoffmann, Carsten, Dr.-Ing. 2.6, 2.7, 7.6, 7.7	IKA Institut für Kraftfahrwesen, Aachen www.ika.rwth-aachen.de [z. Z.: Porsche AG, Weissach]
Hüsemann, Thomas, Dipl.-Ing. 2.1, 2.2, 2.6	IKA Institut für Kraftfahrwesen, Aachen www.ika.rwth-aachen.de
Kramer, Klaus, Dipl.-Ing. 5.4 bis 5.9	ZF Boge Elastmetall GmbH, Damme www.zf.com
Krimmel, Horst, Dr. rer. nat. 7.1 bis 7.5	ZF Friedrichshafen AG/ZF-TE, Friedrichshafen www.zf.com
Mayer, Ralph, Dr.-Ing. 7.8	Technische Universität München www.ftm.mw.tum.de [z. Z.: Daimler AG, Sindelfingen]
Meitinger, Karl-Heinz, Dipl.-Ing. 7.8	Technische Universität München www.ftm.mw.tum.de
Mundl, Reinhard, Dipl.-Ing., Dr. Tech. 3.9	Reinhard-Mundl@gmx.de früher: Continental AG, Hannover
Negele, Hans-Jürgen, Dr.-Ing. 8.1, 8.4, 8.5	Kraus-Maffei Wegmann GmbH & Co. KG (früher: FTM-München)
Neubrand, Jörg, Dr.-Ing. 3.5.1 bis 3.5.4	Mubea Fahrwerksfedern GmbH, Attendorf www.mubea.com

Ocvirk, Norbert, Dipl.-Ing. 3.3	Continental Teves AG & Co., OHG, Frankfurt a. M. www.contiteves.com
Plank, Robert, Dr.-Ing. 3.8	Schaeffler KG, Schweinfurt www.fag.com
Remfrey, James, Dipl.-Ing. 3.3	Continental Teves AG & Co., oHG, Frankfurt a. M. www.contiteves.com
Rieger, Wolfgang, Dipl.-Ing. 3.4	früher ZF Lenksysteme GmbH, Donzdorf www.zf-lenksysteme.com
Rosemeier, Thomas, Dr.-Ing. 3.2	ZF Friedrichshafen AG/ZF-TI-F, Friedrichshafen www.zf.com
Sauer, Wolfgang, Dr.-Ing. 5.1, 5.2	ZF Boge Elastmetall GmbH, Bonn www.zf.com
Schäfer, Burkhardt, Dipl.-Ing. 3.4.4	ZF-LS Bremen, Nacam Deutschland GmbH, Bremen www.ZF-Lenksysteme.com
Schick, Bernhard, Dipl.-Ing. 3.9.5.4, 3.9.6, 3.9.7	TÜV SÜD Automotive GmbH, Garching www.tuev-sued.de/automotive [z. Z.: IPB Automotive GmbH]
Schlereth, Werner, Dipl.-Ing. 3.8	Schaeffler KG, Schweinfurt www.fag.com
Schröder, Carsten, Dipl.-Ing. 3.9	Continental AG, Hannover www.conti.de
Siebendritt, Harry, Dipl.-Ing. 8.1, 8.2	Technische Universität München www.ftm.mw.tum.de
Siemer, Hubert, Dipl.-Ing. 5.10 bis 5.12	ZF Boge Elastmetall GmbH, Damme www.zf.com
Stingl, Hanno, Dipl.-Ing. 6.1 bis 6.4, 6.7, 6.8	Audi AG, Ingolstadt www.audi.com
Volk, Heiner, Dipl.-Ing. 3.9	Continental AG, Hannover www.conti.de
Vortmeyer, Jens, Dipl.-Ing. 3.5.5	ZF Lemförder GmbH, Lemförde www.zf.com
Wies, Burkhard, Dr.-Ing. 3.9	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	7
1.1.3 Aufgabe und Bedeutung	8
1.2 Fahrwerk Aufbau	9
1.2.1 Fahrzeugklassen	9
1.2.2 Antriebskonzepte	10
1.2.3 Fahrwerkkonzeption	13
1.2.4 Trends in der Fahrwerkkonzeption	13
1.3 Fahrwerkauslegung	15
1.3.1 Anforderungen an das Fahrwerk	16
1.3.2 Fahrwerk-Kinematikauslegung	18
1.3.3 Kinematik der Radaufhängung	18
1.3.3.1 Kenngrößen des Fahrwerks am Fahrzeug	18
1.3.3.2 Momentanpole der Radaufhängung	20
1.3.3.3 Radhubkinematik	20
1.3.3.4 Kenngrößen der Radhubkinematik	21
1.3.3.5 Kenngrößen der Lenkkinematik	24
1.3.3.6 Kinematische Kenngrößen aktueller Fahrzeugmodelle	28
1.3.3.7 Raderhebungskurven	28
1.3.3.8 Software zur Radkinematikberechnung	31
1.3.4 Elastokinematik und Bauteilelastizitäten der Radaufhängung	31
1.3.5 Zielwerte für die Kenngrößen	32
1.3.6 Synthese der Radaufhängungen	33
2 Fahrdynamik	35
2.1 Fahrwiderstände und Energiebedarf	35
2.1.1 Fahrwiderstände	35
2.1.1.1 Radwiderstände	35
2.1.1.2 Anteil der Fahrbahn $F_{R,Tr}$	40
2.1.1.3 Luftwiderstand	43
2.1.1.4 Steigungswiderstand	44
2.1.1.5 Beschleunigungswiderstand	45
2.1.1.6 Gesamtfahrwiderstand	46
2.1.2 Seitenwindkräfte	46
2.1.3 Leistungs- und Energiebedarf	49
2.1.4 Kraftstoffverbrauch	50
2.2 Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn	52
2.2.1 Physik der Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn	54
2.2.1.1 Bremsen und Antreiben	57
2.2.1.2 Kurvenfahrt	59
2.2.2 Reifenkräfte im Detail	63
2.3 Längsdynamik	65
2.3.1 Anfahren und Bremsen	65
2.3.1.1 Bremsnickausgleich	65
2.3.1.2 Anfahrnickausgleich	66
2.3.1.3 Lastwechsel bei Geradeausfahrt	67
2.4 Vertikaldynamik	67
2.4.1 Aufbaufedern	67
2.4.1.1 Federübersetzung	68
2.4.1.2 Eigenfrequenzen	68
2.4.2 Schwingungsdämpfer	69

2.4.3	Fahrbahn als Anregung	70
2.4.3.1	Harmonische Anregungen	70
2.4.3.2	Periodische Unebenheiten	71
2.4.3.3	Stochastische Unebenheiten	71
2.4.3.4	Spektrale Dichte der Fahrbahnunebenheiten	72
2.4.3.5	Gemessene, reale Fahrbahnunebenheiten	72
2.4.4	Reifen als Feder- und Dämpferelement	73
2.4.5	Federungsmodelle	73
2.4.5.1	Einmassen-Ersatzsystem	74
2.4.5.2	Zweimassen-Ersatzsystem	75
2.4.5.3	Erweiterung um Sitzfederung	75
2.4.5.4	Einspur-Federungsmodell	76
2.4.5.5	Zweispur-Federungsmodell	77
2.4.6	Parametervariation	79
2.4.7	Verknüpfung Fahrbahn–Fahrzeug	81
2.4.7.1	Spektrale Dichte der Aufbaubeschleunigung	82
2.4.7.2	Spektrale Dichte der Radlastschwankungen	84
2.4.8	Menschliche Schwingungsbewertung	84
2.4.9	Erkenntnisse aus den vertikaldynamischen Grundlagen	86
2.5	Querdynamik	86
2.5.1	Anforderungen an das Fahrverhalten	86
2.5.2	Lenkinematik	87
2.5.2.1	Statische Lenkungsauslegung	87
2.5.2.2	Dynamische Lenkungsauslegung	88
2.5.3	Fahrzeugmodellierung	89
2.5.3.1	Einfaches Einspurmodell	89
2.5.3.2	Einfache Betrachtungen der Fahrdynamik	91
2.5.3.3	Bewegungsvorgänge beim Über- und Untersteuern	93
2.5.3.4	Erweitertes Einspurmodell mit Hinterradlenkung	94
2.5.3.5	Nichtlineares Einspurmodell	96
2.5.3.6	Instationäre Betrachtungen des einfachen Einspurmodells	97
2.5.3.7	Die Regelstrecke „Fahrzeug“ im Regelkreis	100
2.5.3.8	Dynamisches Verhalten der Regelstrecke Fahrzeug	101
2.5.3.9	Schwimmwinkelkompensation mittels Hinterradlenkung	103
2.5.3.10	Frequenzgangbetrachtung bei variierten Fahrzeugkonfigurationen	105
2.5.3.11	Zweispurmodell	106
2.5.3.12	Parametervariation	109
2.6	Allgemeine Fahrdynamik	114
2.6.1	Wechselwirkungen zwischen Vertikal-, Längs- und Querdynamik	114
2.7	Fahrwerkregelsysteme	118
2.7.1	Begriffsbestimmungen	118
2.7.2	Grenzen des passiven Fahrzeugs – Basis-Zielkonflikte	119
2.7.3	Regelkreis Fahrer–Fahrzeug	120
2.7.4	Unterteilung der Fahrwerkregelsysteme in Domänen	121
2.7.4.1	Längsdynamik	121
2.7.4.2	Querdynamik	122
2.7.4.3	Vertikaldynamik	122
2.7.5	Forderungen an Fahrwerkregelsysteme	122
2.8	Fahrverhalten	122
2.8.1	Beurteilung des Fahrverhaltens	123
2.8.2	Fahrmanöver	124
2.8.3	Fahrmanöver Parameterraum	125
2.8.4	Abstimmungsmaßnahmen	128
2.8.4.1	Abstimmungsmaßnahmen zum stationären Lenkverhalten	128
2.8.5	Subjektive Fahrverhaltensbeurteilung	128
2.8.5.1	Bewertungsmethoden und Darstellung	128
2.8.5.2	Anfahrverhalten	128

2.8.5.3	Bremsverhalten	128
2.8.5.4	Lenkverhalten	134
2.8.5.5	Kurvenverhalten	134
2.8.5.6	Geradeausfahrt	137
2.8.5.7	Fahrkomfort	137
2.8.6	Objektive Fahrverhaltensbeurteilung	137
2.8.6.1	Messgrößen	138
2.8.6.2	Anfahrverhalten	138
2.8.6.3	Bremsverhalten	138
2.8.6.4	Lenkverhalten	140
2.8.6.5	Kurvenverhalten	142
2.8.6.6	Geradeausfahrt	144
2.8.6.7	Fahrkomfort	146
2.9	Aktive und passive Sicherheit	146
3	Bestandteile des Fahrwerks	149
3.1	Struktur des Fahrwerks	149
3.1.1	Funktionelle Struktur des Fahrwerks	149
3.1.2	Modulare Struktur des Fahrwerks	150
3.1.3	Bestandteile des Fahrwerks	150
3.2	Antriebsstrang	151
3.2.1	Anordnungen	151
3.2.2	Achsgetriebe	151
3.2.2.1	Differenziale	151
3.2.2.2	Sperrdifferenziale	151
3.2.2.3	Aktive Sperrdifferenziale	153
3.2.2.4	Torque Vectoring	153
3.2.3	Allradantrieb	154
3.2.4	Betriebsstrategien	155
3.2.5	Seitenwellen	156
3.3	Radbremsen und Bremssysteme	157
3.3.1	Aufgaben und Grundlagen	157
3.3.2	Arten von Bremsanlagen	158
3.3.2.1	Allgemeine Anforderungen	159
3.3.3	Gesetzliche Vorschriften	160
3.3.4	Auslegung der Bremsanlage	160
3.3.4.1	Bremskraftverteilung	160
3.3.4.2	Dimensionierung	162
3.3.5	Bremsmomente und Dynamik	162
3.3.5.1	Bremsmomente	162
3.3.5.2	Bremsdynamik	163
3.3.6	Komponenten des Bremssystems	164
3.3.6.1	Bremssattel	164
3.3.6.2	Bremsscheiben	168
3.3.6.3	Bremsbeläge	169
3.3.6.4	Trommelbremsen	169
3.3.6.5	Bremsflüssigkeit	172
3.3.6.6	Bremskraftverstärker	172
3.3.6.7	Tandem-Hauptzylinder	173
3.3.6.8	Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI)	174
3.3.7	Elektronische Bremsregelsysteme	178
3.3.7.1	Bremsassistent (MBA, EBA, HBA)	178
3.3.7.2	Raddrehzahlsensor	180
3.3.7.3	Funktionen des elektronischen Bremssystems	182
3.3.7.4	Elektrohydraulische Bremse (EHB)	187
3.3.7.5	Elektromechanische Bremse (EMB)	189
3.3.7.6	Vernetztes Chassis	190

3.4	Lenksysteme	192
3.4.1	Anforderungen und Bauformen	192
3.4.2	Hydraulische Zahnstangenlenkung	194
3.4.2.1	Technik und Funktion	194
3.4.2.2	Aufbau und Bauteile	197
3.4.3	Spurstangen	201
3.4.4	Lenkstrang und Lenksäule	203
3.4.4.1	Komponenten und Funktionseinheiten	203
3.4.4.2	Auslegung und Erprobung	206
3.4.4.3	Crashanforderungen und Energieverzehrmeechanismen	206
3.4.4.4	Ausblick und Modularisierung	209
3.4.5	Elektromechanische Lenkung	209
3.4.5.1	Bauformen	210
3.4.5.2	Aufbau und Vorteile	212
3.4.6	Aktivlenkung und Überlagerungslenkung	215
3.4.6.1	Wirkprinzip und Aufbau	215
3.4.6.2	Funktionen – heute und morgen	217
3.4.7	Zahnstangenservolenkung mit Momenten- und Winkelsteller	219
3.4.8	Hinterachs- und Allradlenkung	220
3.4.9	Steer-by-wire-Lenksystem und Einzelradlenkung	222
3.4.9.1	Systemkonzept und Bauteile	224
3.4.9.2	Technik, Vorteile und Chancen	225
3.5	Federn und Stabilisatoren	226
3.5.1	Aufgabe der Federung	226
3.5.2	Konstruktion und Berechnung von Stahlfedern	226
3.5.2.1	Blattfedern	227
3.5.2.2	Drehstabfedern	229
3.5.2.3	Stabilisatoren	231
3.5.2.4	Schraubenfedern	239
3.5.3	Werkstoffe für Stahlfedern	247
3.5.4	Herstellung von Stahlfedern	249
3.5.4.1	Warmumformung	249
3.5.4.2	Vergütung warmgeformter Federn	251
3.5.4.3	Kaltumformung	251
3.5.4.4	Kugelstrahlen	252
3.5.4.5	Plastifizieren	253
3.5.4.6	Korrosionsschutz	253
3.5.4.7	Endkontrolle und Markierung	254
3.5.5	Stabilisatoren zur Wankregulierung	254
3.5.5.1	Passiver Stabilisator	255
3.5.5.2	Schaltbarer Off-Road-Stabilisator	255
3.5.5.3	Schaltbarer On-Road-Stabilisator	255
3.5.5.4	Semiaktiver Stabilisator	256
3.5.5.5	Aktiver Stabilisator	257
3.5.6	Federung für Niveauregelung	257
3.5.6.1	Aufgaben und Bauarten	257
3.5.6.2	Niveauänderung mit Gasfeder	258
3.5.7	Hydropneumatische Federung	261
3.5.7.1	Selbstpumpendes, hydropneumatisches Feder- und Dämpferelement	261
3.5.8	Luftfederung	264
3.6	Dämpfung	266
3.6.1	Aufgabe der Dämpfung	266
3.6.2	Teleskopdämpfer-Bauarten	270
3.6.2.1	Zweirohrdämpfer	270
3.6.2.2	Einrohrdämpfer	271
3.6.2.3	Vergleich der beiden Dämpferarten	272
3.6.2.4	Sonderbauarten	272

3.6.3	Federträger und Federbein	272
3.6.4	Stoßdämpferberechnung	274
3.6.5	Zusatzfunktionen im Dämpfer	275
3.6.5.1	Zug- und Druckanschläge	275
3.6.5.2	Hubabhängige Dämpfung	278
3.6.5.3	Amplitudenselektive Dämpfung	279
3.6.6	Dämpferlager	280
3.6.7	Semiaktive Dämpfung und Federung	281
3.6.8	Alternative Dämpfungsprinzipien	285
3.6.8.1	Dämpfer mit magnetoreologischen Flüssigkeiten (MRF)	286
3.6.8.2	Verbunddämpfung	286
3.6.8.3	Lastabhängige Dämpfung (PDC)	286
3.7	Radführung	287
3.7.1	Aufgaben, Struktur und Systematik	287
3.7.2	Lenker Aufgaben, Struktur und Systematik	288
3.7.2.1	Führungslenker	290
3.7.2.2	Traglenker	290
3.7.2.3	Hilfslenker	290
3.7.2.4	Anforderungen an Fahrwerkslenker	291
3.7.2.5	Werkstoffe für Fahrwerkslenker	291
3.7.2.6	Herstellverfahren für Fahrwerklenker	292
3.7.2.7	Herstellverfahren für Aluminiumlenker	298
3.7.2.8	Auslegung und Optimierung der Lenker	300
3.7.2.9	Integration der Gelenke an den Lenker	300
3.7.3	Kugelgelenk	301
3.7.3.1	Aufgabe und Anforderungen	301
3.7.3.2	Systematik für Kugelgelenke	302
3.7.3.3	Aufbau der Kugelgelenke	303
3.7.3.4	Lagersystem (Schale, Fett)	305
3.7.3.5	Dichtsystem (Balg, Spannring)	308
3.7.3.6	Führungsgelenke	311
3.7.3.7	Traggelenke	313
3.7.3.8	Hülsengelenke	314
3.7.4	Gummilager	315
3.7.4.1	Aufgabe, Anforderungen, Funktion	315
3.7.4.2	Ausführungen	318
3.7.5	Drehgelenk	319
3.7.6	Drehschubgelenk	320
3.7.7	Achsträger	321
3.7.7.1	Aufgabe und Anforderungen	321
3.7.7.2	Systematik und Bauarten	322
3.8	Radträger und Radlager	324
3.8.1	Bauarten für Radträger	325
3.8.2	Werkstoffe und Herstellverfahren für Radträger	327
3.8.3	Bauarten für Radlager	327
3.8.3.1	Dichtung	330
3.8.3.2	Schmierung	331
3.8.3.3	ABS-Sensoren	331
3.8.4	Herstellung von Radlagern	333
3.8.4.1	Ringe und Flansche	333
3.8.4.2	Käfige und Wälzkörper	334
3.8.4.3	Montage	334
3.8.5	Anforderung, Auslegung und Erprobung	334
3.8.5.1	Ermüdungslebensdauer (Überrollfestigkeit) des Radlagers	336
3.8.5.2	Bauteilfestigkeit und Kippsteifigkeit	338
3.8.5.3	Verifizierung durch Prüfmethode	340
3.8.6	Ausblick	341

3.9	Reifen und Räder	345
3.9.1	Anforderungen an den Reifen	345
3.9.1.1	Gebrauchseigenschaften	346
3.9.1.2	Gesetzliche Anforderungen	348
3.9.2	Bauarten, Aufbau und Material	349
3.9.2.1	Reifenbauarten	349
3.9.2.2	Reifenaufbau	350
3.9.2.3	Reifenmaterialien	350
3.9.2.4	Viskoelastische Eigenschaften von Gummi	351
3.9.3	Kraftübertragung Reifen–Fahrbahn	352
3.9.3.1	Tragverhalten	352
3.9.3.2	Kraftschlussverhalten, Aufbau von Horizontalkräften	353
3.9.3.3	Antreiben und Bremsen, Umfangskräfte	354
3.9.3.4	Schräglauf, Seitenkräfte und Rückstellmomente	355
3.9.3.5	Schräglaufsteifigkeit	356
3.9.3.6	Reifen unter Quer- und Längsschlupf	357
3.9.3.7	Reifengleichförmigkeit	358
3.9.4	Reifenmodelle für die Simulation	358
3.9.4.1	Reifenmodelle für die Horizontaldynamik	358
3.9.4.2	Reifenmodelle mit Finiten Elementen (FEM-Modelle)	360
3.9.4.3	Reifenmodelle für die Vertikaldynamik	361
3.9.4.4	Reifenmoden	361
3.9.4.5	Eigenschwingung der Kavität	362
3.9.4.6	Gesamtmodelle	362
3.9.5	Moderne Reifentechnologien	365
3.9.5.1	Reifensensorik	365
3.9.5.2	Reifennotlaufsysteme	367
3.9.5.3	Reifen und Regelsysteme	367
3.9.5.4	High Performance (HP) und Ultra High Performance (UHP) Reifen	368
3.9.6	Test und Messmethoden im Fahrversuch	369
3.9.6.1	Subjektive Testverfahren	370
3.9.6.2	Objektive Testverfahren für die Längshaftung	371
3.9.6.3	Objektive Testverfahren für die Seitenhaftung	372
3.9.6.4	Akustik	372
3.9.7	Test und Messmethoden im Labor	373
3.9.7.1	Grundkonzepte für Reifenprüfstände	373
3.9.7.2	Festigkeitsprüfung	373
3.9.7.3	Charakteristikmessungen am Prüfstand	374
3.9.7.4	Charakteristikmessungen mit dem Laborfahrzeug	374
3.9.7.5	Rollwiderstandsmessung	374
3.9.7.6	Uniformity- und Geometrie-Messung	376
3.9.7.7	Streckenmessung und Modellierung	376
3.9.7.8	Verlustleistungsanalyse	377
3.9.7.9	Reifentemperaturverfahren	378
3.9.8	Zukünftige Reifentechnologien	379
3.9.8.1	Materialentwicklung	379
4	Achsen im Fahrwerk	383
4.1	Starrachsen	385
4.1.1	De-Dion-Achse: angetriebene Starrachse	387
4.1.2	Starrachsen mit Längsblattfederführung	387
4.1.3	Starrachsen mit Längs- und Querlenker	388
4.1.4	Starrachsen mit Zentralgelenk- und Querlenkerführung (Deichselachse)	389

4.2	Halbstarrachsen	390
4.2.1	Verbundlenkerachsen	390
4.2.1.1	Torsionskurbelachse	391
4.2.1.2	Verbundlenkerachse	392
4.2.1.3	Koppellenkerachse	392
4.2.2	Dynamische Verbundachse	392
4.3	Einzelradaufhängung	393
4.3.1	Kinematik der Einzelradaufhängung	393
4.3.2	Vorteile der Einzelradaufhängungen	395
4.3.3	Einzelradaufhängungen mit einem Lenker	395
4.3.3.1	Längslenker-Einzelradaufhängungen	396
4.3.3.2	Schräglenker-Einzelradaufhängungen	397
4.3.3.3	Schraublenker-Einzelradaufhängungen	398
4.3.4	Einzelradaufhängungen mit zwei Lenkern	398
4.3.4.1	Quer-Längs-Pendelachsen	398
4.3.4.2	Trapezlenker mit einem Querlenker (Audi 100 Quattro)	399
4.3.4.3	Trapezlenker mit einem flexiblen Querlenker (Porsche Weissachachse)	399
4.3.5	Einzelradaufhängungen mit drei Lenkern	399
4.3.5.1	Zentralenker-Einzelradaufhängung	399
4.3.5.2	Doppelquerlenker-Einzelradaufhängungen	400
4.3.6	Einzelradaufhängungen mit vier Lenkern	402
4.3.6.1	Mehrlenker-Einzelradaufhängungen an Hinterachsen	402
4.3.6.2	Mehrlenkerachsen durch Auflösung der unteren 3-Punkt-Lenker der DQL-Achse	403
4.3.6.3	Trapezlenkerachsaufhängung (Integrallenker)	403
4.3.6.4	Zwei Längs- und zwei Querlenker	404
4.3.6.5	Ein Längs- und drei Querlenker	404
4.3.6.6	Ein Schräg- und drei Querlenker	405
4.3.7	Einzelradaufhängungen mit fünf Lenkern	405
4.3.7.1	Fünflenker-Vorderachsaufhängung	405
	(mit zwei aufgelösten 3-Punkt-Lenkern der DQL)	405
4.3.7.2	Fünflenker-Hinterachsaufhängung (Raumlenker)	406
4.3.8	Federbein-Einzelradaufhängungen	407
4.4	Einzelradaufhängungen der Vorderachse	410
4.4.1	Forderungen an die Vorderachsaufhängungen	410
4.4.2	Komponenten der Vorderachse	411
4.4.3	Bauarten der Vorderachse	411
4.4.3.1	McPherson-Achse mit Verbindungstraverse	411
4.4.3.2	McPherson-Aufhängung mit optimiertem unteren Lenker	412
4.4.3.3	McPherson-Aufhängung mit aufgelöstem unteren Lenker	412
4.4.3.4	McPherson mit doppeltem Radträger	412
4.4.3.5	Doppelquerlenker mit aufgelösten Lenker	413
4.5	Einzelradaufhängungen der Hinterachse	413
4.5.1	Forderungen an die Hinterachse	413
4.5.2	Komponenten der Hinterachse	413
4.5.3	Bauarten der Hinterachse	413
4.5.3.1	Nicht angetriebene Hinterachse	413
4.5.3.2	Angetriebene Hinterachse	414
4.5.4	ULSAS-Benchmark für Hinterachsen	414
4.6	Konstruktionskatalog als Auswahlhilfe für die Achstypen	415
4.7	Gesamtfahrwerk	415
4.7.1	Zusammenspiel von Vorder- und Hinterachse	415
4.8	Radaufhängungen der Zukunft	417
4.8.1	Achstypen der letzten 20 Jahren	417
4.8.2	Häufigkeit der aktuellen Achstypen	417
4.8.3	Die zukünftigen Achstypen (Tendenzen)	417

5 Fahrkomfort	421
5.1 Grundlagen, Mensch und NVH	421
5.1.1 Begriffe und Definitionen	421
5.1.2 Schwingungs- und Geräuschquellen	422
5.1.3 Wahrnehmungsgrenzen des Menschen	423
5.1.4 Das Wohlbefinden des Menschen	424
5.1.5 Maßnahmen gegen Schwingungen und Geräusche	425
5.2 Gummiverbundteile	426
5.2.1 Funktion der Gummiverbundteile	426
5.2.1.1 Kräfte übertragen	426
5.2.1.2 Definierte Bewegungen ermöglichen	426
5.2.1.3 Geräusche isolieren	427
5.2.1.4 Schwingungen dämpfen	427
5.2.2 Elastomer spezifische Definitionen	428
5.2.2.1 Kennlinien	428
5.2.2.2 Dämpfung	428
5.2.2.3 Setzung	429
5.3 Aggregatelager	430
5.4 Hülsenlager (Gummilager)	434
5.5 Gleitlager	435
5.6 Hydraulisch dämpfende Buchsen	436
5.7 Achsträgerlager (Hilfsrahmenlager)	439
5.8 Federbeinstützlager, Dämpferlager	441
5.9 Verbundlenkerlager	442
5.10 Zukünftige Bauteilausführungen	443
5.10.1 Sensorik	444
5.10.2 Schaltbare Fahrwerkklager	444
5.11 Berechnungsmethoden	445
5.12 Akustische Bewertung von Gummiverbundteilen	446
6 Fahrwerkentwicklung	449
6.1 Entwicklungsprozess	449
6.2 Projektmanagement (PM)	455
6.3 Planungs- oder Definitionsphase	455
6.3.1 Zielwertkaskadierung	456
6.4 Konzeptphase	457
6.5 Virtuelle Simulation	457
6.5.1 Software für die Mehrkörpersimulation (MKS)	458
6.5.1.1 Aufbau von MKS-Fahrwerksmodellen mit ADAMS/Car	458
6.5.1.2 CAD-Fahrwerkmodell und Mehrkörpersystem	458
6.5.1.3 Mehrkörpersimulation mit starren und flexiblen MKS	459
6.5.1.4 Mehrkörpersimulation mit Gesamtfahrzeug-, Fahrwerk- und Achsmodellen	460
6.5.1.5 Einfluss der Fertigungstoleranzen auf die kinematischen Kennwerte	461
6.5.2 Software für Finite Elemente Methode (FEM)	462
6.5.2.1 Klassifizierung der Analysen	462
6.5.2.2 Festigkeitsanalysen	463
6.5.2.3 Steifigkeitsanalysen	463
6.5.2.4 Eigenfrequenzanalysen	464
6.5.2.5 Lebensdauer-Betriebsfestigkeit	464
6.5.2.6 Crash-Simulationen	464
6.5.2.7 Topologie- und Formoptimierung	465
6.5.2.8 Simulation der Fertigungsverfahren	465
6.5.3 Vollfahrzeugsimulation	466
6.5.3.1 Fahrdynamiksimulation	466
6.5.3.2 Kinematik/Elastokinematik	466
6.5.3.3 Standard-Lastfälle	468
6.5.3.4 MKS-Modellverifikation	468

6.5.3.5	NVH	469
6.5.3.6	Loadmanagement (Lastenkaskadierung vom System zur Komponente)	470
6.5.3.7	Vollfahrzeug Betriebsfestigkeitssimulation	474
6.5.3.8	Fahrdynamischer Fingerprint	474
6.5.3.9	Auslegung der Elastokinematik nach der regelungstechnischen Methode	475
6.5.4	Software zur 3D-Modellierung CAD	476
6.5.5	Integrierte Simulationsumgebung	477
6.5.5.1	Kinematische Analyse: Basistool ABE	477
6.5.5.2	Virtuelle Produktentwicklungsumgebung	481
6.6	Serienentwicklung und Absicherung	482
6.6.1	Konstruktion	482
6.6.1.1	Bauteilkonstruktion	483
6.6.1.2	Bauraum „Package“	484
6.6.1.3	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse	485
6.6.1.4	Toleranzuntersuchungen	485
6.6.2	Validierung	485
6.6.2.1	Prototypen	485
6.6.2.2	Validierung am Prüfstand	486
6.6.2.3	Straßen-Simulationsprüfstand (SSP)	488
6.6.3	Validierung am Gesamtfahrzeug	489
6.6.4	Optimierung und Abstimmung	490
6.7	Entwicklungsaktivitäten während der Serienproduktion	490
6.8	Ausblick und Zusammenfassung	491
7	Systeme im Fahrwerk	493
7.1	Elektronik im Fahrwerk	493
7.2	Elektronische Fahrwerkregelsysteme	493
7.2.1	Domänenaufteilung	493
7.2.2	Längsdynamik – Schlupfregelung	494
7.2.2.1	Bremse	494
7.2.2.2	Elektronisch geregeltes Längsdifferenzial	494
7.2.2.3	Torque-on-Demand-Verteilergetriebe	494
7.2.2.4	Elektronisch geregeltes Achsdifferenzial	495
7.2.2.5	Achsgetriebe zur Quermomentverteilung	496
7.2.3	Querdynamikregelsysteme	497
7.2.3.1	Elektrolenkung	497
7.2.3.2	Überlagerungslenkung	498
7.2.3.3	Aktive Hinterachslenkung	498
7.2.3.4	Aktive Hinterachskinematik	498
7.2.4	Vertikaldynamikregelsysteme	499
7.2.4.1	Variable Dämpfer	499
7.2.4.2	Aktiver Stabilisator	500
7.2.4.3	Niveauregulierung	501
7.2.5	Sicherheitsanforderungen	502
7.2.6	Bussysteme	503
7.2.6.1	CAN-Bus	503
7.2.6.2	FlexRay	503
7.3	Systemvernetzung	503
7.3.1	Fahrdynamikregelung	503
7.3.2	Torque Vectoring	505
7.3.3	Vertikaldynamikmanagement	506
7.4	Funktionsintegration	506
7.4.1	Architektur	506
7.4.2	Standardschnittstellen	507
7.4.3	Intelligente Steller	508

7.5	Simulation Fahrwerkregelsysteme	508
7.5.1	Simulationsmodelle	508
7.5.2	Hardware-in-the-loop-Simulation	510
7.6	Mechatronische Fahrwerksysteme	511
7.6.1	Längsdynamiksysteme	511
7.6.1.1	Antriebssysteme	511
7.6.1.2	Bremssysteme	514
7.6.2	Querdynamiksysteme	516
7.6.2.1	Vorderradlenkung	516
7.6.2.2	Hinterradlenkung	517
7.6.2.3	Wankstabilisierungssysteme	521
7.6.2.4	Aktive Kinematik	524
7.6.3	Vertikaldynamiksysteme	526
7.6.3.1	Anforderungen an die Vertikalsysteme	526
7.6.3.2	Einteilung der Vertikalsysteme	526
7.6.3.3	Dämpfungssysteme	528
7.6.3.4	Niveauregulierungssysteme	531
7.6.3.5	Aktuelle aktive Federungssysteme	532
7.6.3.6	Voll-aktive, integrierte Fahrwerksysteme	535
7.6.3.7	Lagersysteme	537
7.7	X-by-wire	539
7.7.1	Steer-by-wire	539
7.7.2	Brake-by-wire	540
7.7.2.1	Elektrohydraulische Bremse (EHB)	540
7.7.2.2	Elektromechanische Bremse (EMB)	541
7.7.2.3	Elektromechanische Bremse von Teves	541
7.7.2.4	Radialbremse	542
7.7.2.5	Keilbremse	543
7.7.3	Leveling-by-wire	544
7.8	Fahrerassistenzsysteme	545
7.8.1	Bremsassistentz	546
7.8.1.1	Sicherheitsrelevante Bremsassistentz	546
7.8.1.2	Komfortorientierter Bremsassistentz	547
7.8.1.3	Anforderungen der Bremsassistentz	547
7.8.2	Distanzassistentz	547
7.8.3	Lenkassistentz	548
7.8.3.1	Lenkassistentz durch Anpassung der Unterstützungskraft	549
7.8.3.2	Lenkassistentz durch Überlagerung des Fahrerhandmoments	549
7.8.3.3	Lenkassistentz durch Überlagerung des Fahrerlenkwinkels	550
7.8.3.4	Zusammenfassung	551
7.8.4	Einparkassistentz	551
7.8.4.1	Einführung	551
7.8.4.2	Parklückenerkennung	551
7.8.4.3	Einparkvorgang	552
7.8.4.4	Lenkaktuator	553
8	Zukunftsaspekte des Fahrwerks	557
8.1	Fahrwerkkonzepte – Fokussierung auf den Kundenwert	557
8.1.1	Auslegung des Fahrverhaltens	557
8.1.2	Diversifizierung der Fahrzeugkonzepte – Stabilisierung der Fahrwerkskonzepte	559
8.1.2.1	Vorderachsen, Stand 2004	559
8.1.2.2	Hinterachsen, Stand 2004	560
8.1.3	Fahrwerkbestandteile der Zukunft	560
8.1.3.1	Achsantrieb der Zukunft	560
8.1.3.2	Bremse der Zukunft	561
8.1.3.3	Lenkung der Zukunft	561
8.1.3.4	Federung der Zukunft	561

8.1.3.5	Dämpfung der Zukunft	561
8.1.3.6	Radführung der Zukunft	561
8.1.3.7	Radlager der Zukunft	561
8.1.3.8	Reifen und Räder der Zukunft	561
8.2	Elektronische Fahrwerksysteme	561
8.2.1	Elektronische Hilfssysteme und Vernetzung	561
8.2.2	Vernetzung von Fahrwerksregelungssystemen	562
8.2.2.1	Friedliche Koexistenz	562
8.2.2.2	Integrale Regelung	563
8.2.2.3	Vernetzte Regelung	563
8.2.2.4	Leistungsfähigkeit	563
8.2.2.5	Systemsicherheit	564
8.2.2.6	Entwicklungsprozess	564
8.2.2.7	Anforderungen an die Datenübertragung	565
8.2.2.8	Zusammenfassung	565
8.3	X-by-wire-Systeme der Zukunft	565
8.4	Vorausschauende und intelligente Fahrwerke der Zukunft	566
8.4.1	Fahrzeugsensorik	566
8.4.2	Aktuatorik	567
8.4.3	Vorausschauendes Fahren	568
8.5	Hybridfahrzeuge	570
8.6	Selbstfahrendes Chassis, Rolling/Driving Chassis	571
8.7	Autonomes Fahren in der Zukunft?	572
8.8	Zukunftsszenarien für das Auto und sein Fahrwerk	573
8.9	Ausblick	576
Anhang: Alle Pkw-Plattformen und Plattformbezeichnungen 2008 bis 2016		579
Sachwortverzeichnis		591

Abkürzungen

AAS	Adaptive Air Suspension	CAM	Computer Aided Manufacturing
ABC	Active Body Control	CAN	Controller Area Network
ABS	Anti-Blockiersystem	CASE	Computer Aided Software Engineering
ABV	Anti-Blockiervorrichtung	CATS	Computer Active Technology Suspension
ACC	Autonomous / Adaptive Cruise Control	CBC	Cornering Brake Control
ACE	Active Cornering Enhancement	CBS	Combined Brake System
ADR	Automatische Distanzregelung	CDC	Continuous Damper Control
ADS	Adaptives Dämpfungssystem	CDL	Collision Danger Level
AFS	Active Front Steering		
AFS	Aktive Fahrwerkstabilisierung	DBC	Dynamic Brake Control
AGCS	Active Geometry Control Suspension	DBS	Dynamic Brake Support
AHK	Aktive Hinterachskinematik	DC	DaimlerChrysler
AICC	Autonomous Intelligent Cruise Control	DD	Dynamic Drive
AKC	Active Kinematic Control	DDE	Digitale Dieselelektronik
ALC	Automatic Linear Guidance Control	DDS	Deflation Detection System
AMR	Antriebsmoment Regelung	DIN	Deutsches Institut für Normung
ANB	Automatische Notbremsung	DME	Digitale Motorelektronik
AOS	Adaptive Off-Road Stabilizer	DMU	Digital Mock Up
APB	Aktive Parkbremse – Active Parking Brake	DOE	Design of Experiment
APS	Automatic Parking System	DQL	Doppelquerlenker
APQP	Advanced Product Quality Planning	DRC	Dynamic Ride Control
ARM	Active Roll Mitigation	DSC	Dynamic Stability Control
ARP	Active Rollover Control	DSP	Dynamisches Stabilitätsprogramm
ARS	Active Roll Stability	DSCT	Dynamic Stability and Traction Control
ART	Abstandsregeltempomat	DTC	Dynamic Traction Control
ASC	Automatic Stability Control	DXC	Dynamic x(Allrad) Control
ASCA	Active Suspension via Control Arm		
ASCS	Active Suspension Control System	eABC	Electromechanical Active Body Control
ASCx	Automatic Stability Control x (Allwheel)	EAS	Electronic Active Steering Assistant
ASIC	Application Specific Integrated Circuit	EBA	Elektronischer Bremsassistent
ASL	Anhänger-Schlingern-Logik	EBC	Electronic Body Control
ASMS	Autom. Stabilitätsmanagementsystem	EBD	Electronic Brake Distribution
ASR	Antriebsschlupfregelung	EBM	Elektronisches Bremsen-Management
ASTC	Advanced Stability Control	EBS	Electronically Controlled Braking System
ATC	Active Tilt Control	EBV	Elektronische Bremskraftverteilung
ATTC	Active Tire Tilt Control	ECD	Electronic Controlled Deceleration
AUN	Allgemeiner Unebenheitsindex	ECE	Economic Commission for Europe
AWD	All Wheel Drive	ECM	Electronic Chassis Management
AWS	All Wheel Steering	ECU	Electronic Control Unit
AYC	Active Yaw Control	EDC	Elektronik Damper Control
		EDS	Elektronische Differenzialsperre
BAB	Bundesautobahn	E/E	Elektrik/Elektronik
BAS	Bremsassistentz	EHB	Elektrohydraulische Bremse
BASR	Bremsen-Antriebs-Schlupf-Regelung	EGS	Elektronische Getriebesteuerung
BBC	Brake Boost Control	EMB	Elektromechanische Bremse
BbW	Brake by Wire	EMC	Electro Magnetic Compatibility
Bj.	Baujahr	EMF	Elektromechanische Feststellbremse
BKV	Bremskraftverstärker	EMP	Elektronische Parkbremse
BMR	Bremsmomentenregelung	EPS	Electric Power Steering
BBA	Betriebsbremsanlage	ESD	Electrostatic Discharge
		ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
CAD	Computer Aided Design	ETC	Elektronische Traktionskontrolle
CAE	Computer Aided Engineering		

FAS	Fahrerassistenz-Systeme	OEM	Original Equipment Manufacturer
FDR	Fahrdynamikregelung		
FEA	Finite-Elemente-Analyse	PCB	Printed Circuit Board
FEM	Finite-Elemente-Methode	PDC	Park Distance Control
FFT	Fast Fourier Transformation	PDM	Product Data Management
FGR	Fahrgeschwindigkeitsregler	PEP	Produktentstehungsprozess
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse	PM	Projektmanagement
FPDS	Ford Product Development System	PSD	Power Spectral Density
FPM	Fahrpedal-Modul	PTO	Power Take Off
FSR	Fahrstabilitätsregelung		
		RDK	Reifendruckkontrolle
GCC	Global Chassis Control	RIM	Radindividuelle Momentenregelung
GMR	Giermomentenregelung	RLDC	Road Load Data Collections
GM	General Motors	ROP	Roll Over Protection
		RSP	Roll Stability Control
HA	Hinterachse		
HAQ	Hinterachs-Quersperre	SBC	Sensotronic Brake Control
HBA	Hydraulischer Bremsassistent	SbW	Steer by Wire
HBM	Hydraulisches Bremsenmanagement	SE	Simultaneous Engineering
HCU	Hydraulic Control Unit	SiL	Software in the Loop
HDC	Hill Descent Control	SIL	Safety Integrity Level
HECU	Hydraulic Electronic Control Unit	SLS	Self Leveling Suspension
HiL	Hardware in the Loop	SMR	Schleppmomentenregelung
HMI	Human Machine Interface	SOP	Start of Production
HPS	Hydraulic Power Servosteering	SPICE	Software Process Improvement and Capability Determination
		SSP	Strassensimulationsprüfstand
ICC	Intelligent Cruise Control	STC	Stability Traction Control
ICC	Integrated Chassis Control	SUC	Sport Utility Cabriolet
ICCS	Integrated Chassis Control System	SUV	Sport Utility Vehicle
ICD	Intelligent Controlled Damper	SW	Software
ICM	Integrated Chassis Management	S&G	Stop and Go
IDS	Interaktives Dynamisches Fahrsystem		
IR	Individual(Einzelrad)-Regelung	TC(S)	Traction Control (System)
ISAD	Integrated Starter Alternator Damper	THZ	Tandemhauptbremszylinder
ISG	Integrated Starter Generator	TMC	Tandem Main Cylinder
ISO	International Standards Organization	TPMS	Tire Pressure Monitoring System
IWD	Intelligent Wheel Dynamics	TTP	Time Triggered Protocol
		UCL	Under Steer Control Logic
K&C	Kinematics and Compliances	ÜLL	Überlagerungslenkung
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess		
LbW	Leveling by Wire	VA	Vorderachse
LCC	Lane Change Control	VDC	Vehicle Dynamic Control
LIN	Local Interconnected Network	VGRS	Variable Gear Ration Steering
LWS	Lenkwinkelsensor	VPE	Virtual Product Environment
		VSA	Vehicle Stability Assist
MB	Mercedes Benz	VSC	Vehicle Stability Control
MBA	Mechanischer Bremsassistent	VTD	Variable Torque Distribution
MBS	Multi Body System / Simulation (MKS)	VTG	Verteilergetriebe
MBU	Motorbremsmomentunterstützung		
MKS	Multikörpersimulationssystem	xDRIVE	Allrad System
MMI	Man Machine Interface		
MPV	Multi Purpose Vehicle	WSS	Wheel Speed Sensor
MSR	Motor Schleppmomentenregelung		
		μ C/ μ P	Microcomputer / Microprocessor
NVH	Noise Vibration Harshness	4Motion	Permanenter Allradantrieb
OCP	Optimized Contact Patch	4WS	Four Wheel Steering

1 Einleitung und Grundlagen

Wenn in den Fachkreisen der Kraftfahrzeugtechnik über Pkw geredet wird, werden die Wörter wie Mobilität, Antriebsleistung, Verbrauch, Umweltschutz, Fahrzeugklasse, Karosserie, Sicherheit, Fahrkomfort, Fahrdynamik und immer häufiger Elektrik/Elektronik benutzt. Aktuell sind auch die Begriffe wie *aktive Systeme*, *X-by-wire*, *Fahrerassistenz*, *Regelsysteme*, *Hybridantrieb*, *Agilität*, *Infotainment*.

Das Fahrwerk spielt dabei die wesentlichste Rolle, wenn es um Fahrsicherheit, Fahrkomfort, Fahrdynamik und Agilität geht. Elektronische Regelsysteme, wie X-by-wire, Fahrerassistenz, Aktivsysteme findet man mit einem immer steigenden Anteil 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 Karosseriestrukturen das Fahrgestell alleine nicht mehr alle für das Fahren wichtigen Komponenten umfasst. Nur noch bei Pick-ups und Geländefahrzeugen ermöglicht der Chassisrahmen ein fahrbereites Fahrgestell (**Bild 1-1**).

Das Fahrgestell hat Karl Blau 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 Autos und besteht aus Räder, Radträger, Radlager, Bremse, Radaufhängung, Achsträger, Federung inkl. Stabilisator, Dämpfung, Lenkgetriebe, Lenkgestänge, Lenksäule, Fußhebwerk, Aggregateleragerung, Seitenwellen, Achsgetriebe und Fahrwerkregelsysteme (**Bild 1-2**). Diese umfassen in der Grundausstattung eines Mittelklassenfahrzeuges ca. 20 % des Gesamtgewichtes und beanspruchen ca. 15 % der Herstellkosten [2] (**Bild 1-3**).

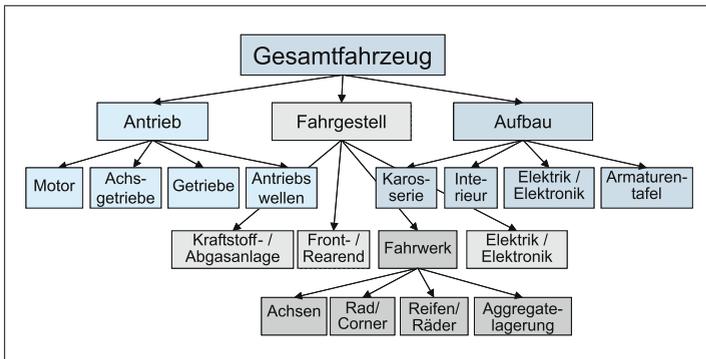


Bild 1-1: Hauptbaugruppen des Gesamtfahrzeugs

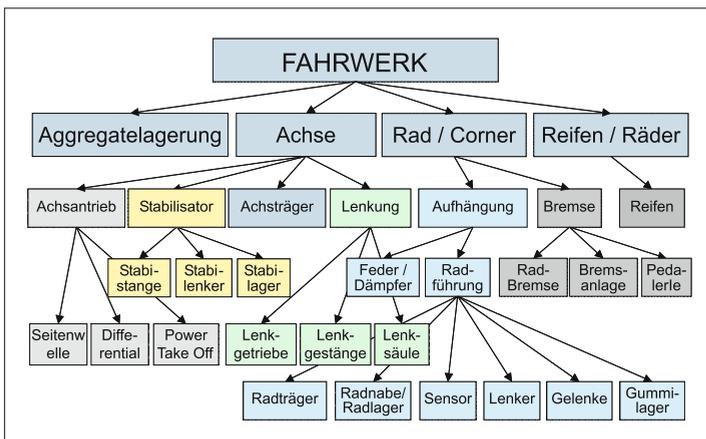


Bild 1-2: Bestandteile eines modernen Fahrwerks

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 (Fahrwiderstand überwinden, Beschleunigen), Bremsen, Kupplung und Gasbetätigen, Lenken, Federn und Dämpfen.

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
Zwischensumme	604	604	550	577	584	39,4
Fahrwerk	233	180	191	187	198	13
Räder + Reifen	94	92	87	97	93	6
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
Zwischensumme	400	366	355	336	364	24,5
Klimaanlage	28	29	26	27	28	2
Elektrik	57	49	40	46	48	3
Zwischensumme	85	77	66	73	75	5,1
Andere	196	210	115	157	170	11
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 vorliegende Buch ist konzipiert als wissenschaftliches Handbuch für die Fachleute aus dem Fahrwerksbereich 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 sehr ausführlich alle Aspekte der „Fahrodynamik“ (Kapitel 2) 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 jedem Fahrwerkbestandteil und ausführlich in Kapitel 7 „Systeme im Fahrwerk“ übergreifend behandelt wird. Mit dem Kapitel 8 „Fahrwerktechnik der Zukunft“ 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**). Der Metallreif sollte 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; sie 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 von der Fahrbahn zu reduzieren [3]. Somit entstand die erste *Aufhängung*. Die ersten *gedederten* 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. Damit war die Fahrzeugmasse in einem *gedederten* und einem *ungefederten* Anteil getrennt; erste Voraussetzung, um die Geschwindigkeit der Wagen über 30 km/h zu erhöhen.

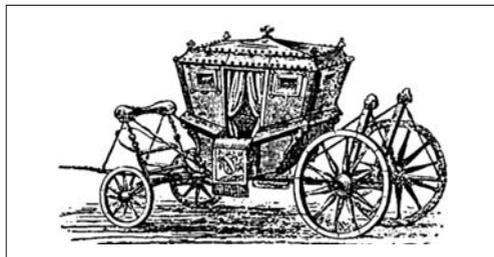


Bild 1-5: Pferddeckutsche mit Aufhängung, Federung, Bremse und Lenkung

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 übernahmen auch die Aufgabe der Längsführung; damit waren die schweren Stützbalken zwischen den Achsen nicht mehr notwendig.

Nach dem Untergang 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 Dampftrieben 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 die Einführung von *Luftrreifen* durch John Boyd Dunlop (1888), basierend auf einer Erfindung von Robert William Thomson (1845), waren die Voraussetzungen für komfortables und schnelles Fahren auf der Straße geschaffen.

Eine andere Erfindung von 1816 ist die Achsschenkelenkung, ein Patent von Georg Lankensperger, Kutschenbauer aus München und sein 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 Steuerwinkel und somit schneiden sich die Drehachsen der beiden Räder. Dieses Prinzip ist als „Ackermann-Prinzip“ immer noch ein wichtiger Parameter für die Lenkungsauslegung (**Bild 1-41**).

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.

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



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

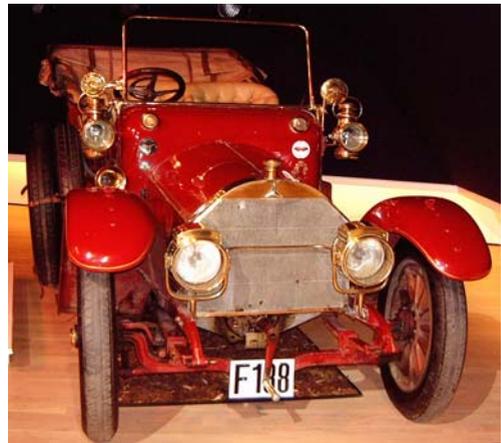


Bild 1-7: Das Automobil mit eigenem, von dem Kutschenimage abgekoppelten Aussehen (Mercedes 1910)

Es entwickelte sich ein Antriebsstrang und eine Fahrwerksanordnung ähnlich dem heutigen Standardantrieb, wie z.B. der Mercedes F 188 aus dem Jahr 1910 zeigt. (**Bild 1-7**).

Die Entwicklungsgeschichte des Fahrwerks ist eng verbunden mit dessen Trennung der Funktionen, die vorher durch dieselben Bauteile erfüllt wurden [7]:

- ◆ Trennung der Karosserie und Fahrgestell,
- ◆ Trennung der gefederten /ungefederten Massen,
- ◆ Trennung der Radführung und Federung,
- ◆ Trennung der Federung und Dämpfung,
- ◆ Trennung der Rad/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, Kugelgelenk, Gummilager, Zahnstangenservolenkung, hydraulische Allradbremung, Scheibenbremse, Trennung von Radführung und Federung, Einzelradaufhängungen, Mehrlenkerachsen, Allradantrieb und elektronische Systeme (z.B. ABS, ASR, EBV, ESP, ACC, ...).

Antriebskonzepte: Die Kutschen besaßen ja keinen Antrieb an den Achsen; sie wurden stets gezogen. Die ersten Automobile hatten den Verbrennungsmotor auf der Hinterachse und den Antrieb unmittelbar auf den Hinterrädern; wegen der Lenkung war das Antreiben der Vorderräder nicht so einfach. Das hatte den Nachteil, dass die Hinterräder deutlich höher belastet waren als die Vorderräder. Eine gleichmäßigere Achslastverteilung war 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 (1898) und Horch (1900) vorgestellt (**Bild 1-8**). Ein Antrieb über die Vorderräder war zu dieser Zeit wegen fehlender Gleichlaufgelenke nicht serienfähig. Frontantriebsfahrzeuge in größeren Stückzahlen wurden erst ab 1931 gebaut (z.B. DKW F1 und 1934 Citroen Traction). Diese Anordnung brachte besonders für kleinere Fahrzeuge sehr wichtige Vorteile: geringes Gewicht, größere Innenräume und vor allem niedrigere Kosten.



Bild 1-8: Der älteste erhaltene Horch, ein so genanntes „Tonneau“ mit Standardantrieb aus dem Jahr 1903

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 Serien-Automobil 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 Dunlop 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 Schwimmaufsattel mit einem nur auf der Innenseite wirkenden Druckkolben beseitigte diese Probleme. Ab 1978 löste der Faustsattel, der eine deutlich höhere Steifigkeit aufweist, den Schwimmaufsattel ab [8].

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 freiprogrammierbarer Elektronik und Raddrehzahlmessung basierende System von Fritz Oswald [7] wurde von Bosch zur Serienreife entwickelt und kam um 1978 bei Mercedes-Benz Modellen in Einsatz. Danach, im Jahre 1987, konnte das *ABS* als *ASR* (Antriebs-Schlupf-Regelung) auch zur Regelung des Antriebschlupfes eingesetzt werden. 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 Achsschenkel lenkung 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. Schon sehr früh, im Jahre 1902, ließ L. Megy, ein Amerikaner, die Zahnstange gleichzeitig als Spurstange arbeiten; damit wurde bereits vor 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 Mar-

les (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.

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 wendiger ist. Die Vorteile 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 paar Jahren wieder eingestellt wurde, kommen sie heutzutage wieder in Mode.

Zur Geschichte der Lenkung gehören auch die Innovationen wie die verstellbare Lenksäule in den USA und die von Bèla Barény von 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 Mini-blockfeder 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 überträgt in der Kurve die höheren Lasten des kurvenäußeren Rades zum weniger belasteten kurveninneren Rad.

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 jedoch der Entwickler der ersten brauchbaren Kfz-Luftfederung. Citroen hat die hydropneumatische Federung 1954 in der letz-

ten 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 niedrige Hysterese. Sie sprechen daher auch bei sehr kleinen Amplituden 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 konnten aber die Schwingungen mit kleinen Amplituden nicht dämpfen, weil die ruhende (statische) Reibung deutlich größer ist, als die gleitende (dynamische) Reibung und die gewünschte Steigerung der Dämpfungsrate mit der Geschwindigkeit nicht möglich ist. 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 [9]. 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 Jahre 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-Gasdruckstoßdämpfer 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 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 waren aber die ersten Parallelschubführungen der Räder entlang der Achsschenkel, wie 1898 im „Motorwagen Wartburg“ oder die senkrechte (Teleskop-)Vorderradführung, wie 1923 im Lancia Lambda, im Einsatz. Auch das 1952 eingeführte wartungsfreie Kugelgelenk als Ersatz für die Achsschenkellagerung vereinfachte und erleichterte die Radaufhängung.

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-)Vorderachse, die zuerst 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 [7], sind die gängigsten Einzelradaufhängungen. Durch die erste „selbsttragende Karosserie“, die 1934 von Opel patentiert und als erste eingeführt wurde, wurde der Begriff „Achse“ durch Begriff „Radaufhängung“ ersetzt. 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 Autos. Aktuell sind die Mehrlenkerhinterachsen mit einem Längslenker, die deutlich bessere Eigenschaften als die Verbundlenker haben. Sie können auch 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. Ein Stahlkugelzapfen war zwischen zwei Stahlshalen gelagert. Mit der Einführung des Kugelgelenks konnte der Achsschenkel durch einen Radträger ersetzt werden. Die wartungsfreien Kugelgelenke mit Kunststofflager-schale der Firma Ehrenreich sind seit 1952 bekannt.

Die Gummilager wurden zuerst 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 trotz hoher Reibverluste und Spielneigung durch Verschleiß im Einsatz. Nach der Erfindung der Wälzlager mit niedrigen Reibverlusten, Verschleißanfälligkeiten und Spielfreiheiten wurden diese 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 ja als Federungselement nur den Reifen aufweisen. 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 Felgenwulst war sehr umständlich. So kam die abnehmbare „Stepney“-Felge und schließlich das abnehmbare „Rudge-Withworth“-Rad. Die schlechte Abriebfestigkeit des Gummis konnte um den Faktor 10 verbessert werden als die Fa. Goodyear im Jahr 1910 Ruß zum Gummi einmischte.

Wegen den harten Hochdruckreifen ließ der Fahrkomfort auf den schlechten Straßen und bei steigenden Geschwindigkeiten zu wünschen übrig. Mit einem Überdruck von nur 2,5 bar montierte Michelin 1923 an einem Citroen den ersten Niederdruckreifen auf einer Tiefbettfelge, den so genannten „Ballonreifen“. Die diagonale Kordlagenstruktur, eine Erfindung von Palmer aus dem Jahr 1908, vermied die Selbsterhitzung des Reifens, weil der zugfesteste 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 die Reifenwulst am Felgenhorn luftdicht aufliegt. Die ersten schlauchlosen Reifen wurden von

Dunlop 1938 und Goodrich 1948 in den USA eingeführt und lösten nach 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 eine 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 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 Bemühungen, einen Sicherheitsreifen zu entwickeln, der auch bei einem luftleeren Reifen noch weiter betrieben werden kann, in den letzten Jahren ihren Serieneinsatz bei vielen Modellen der Oberklasse.

Räder: Die ersten Räder im Auto 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 im Einsatz, 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 kam die moderne, abnehmbare Tiefbettfelge mit Bolzenzentrierung, auf der ein Niederdruckreifen mit Ventil montiert war, zum Einsatz.

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.

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, so dass 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 [7]. 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 Bildschirm durchzuspielen, sehr schnell Einbau- und Kollisionsuntersuchungen durchzuführen, sondern auch den Änderungs- und Optimierungsaufwand drastisch zu reduzieren.

Die Zunahme des Wissens vom dynamischen Verhalten des Autos und Einführung computergestützter Berechnungs- und Simulationsverfahren während der letzten 20 Jahre sorgte für hohe Fahrsicherheit und enormen 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 Regelektronik ebnet den Weg hin zum „intelligenten“ Fahrwerk. Eine Hauptrolle spielt dabei künftig das „Global Chassis Management“, das beim Zusammenfassen einzelner Systemregelungen zu einem zentralen Regelkreis entsteht.

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 fahren, zu lenken und zu bremsen.

Dies sind Rad/Reifen, Radlagerung, Radträger, Bremsen, Radaufhängung, Feder/Dämpfer, Lenkung, Stabilisatoren, Achsträger, Differenzial, Seitenwellen, Pedalerie, Lenksäule, Lenkrad und alle Regelsysteme zur Unterstützung des Fahrwerks, der Fahrwerksaufgaben sowie Fahrerassistenzsysteme [10].

Das vorliegende Handbuch behandelt diese im Kapitel 3 als Bestandteile des Fahrwerks mit Ausnahme des Lenkrads. Das Lenkrad hat sich aufgrund ständig erweiterter Funktionalitäten zu einem äußerst komplexen Bauteil mit zahlreichen Komponenten anderer Systeme (z.B. Rückhaltesystem, Multimedia-Interface, Assistenzsysteme) entwickelt. Eine umfassende und angemessene Beschreibung des Lenkrads hätte den vorgesehenen Umfang des Fahrwerkhandbuchs überschritten.

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 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 wären bei Geradeausfahrt die einzigen Aufgaben des Fahrwerks das Fahrzeuges zu beschleunigen, auf der Spur zu halten und zu bremsen. Auch die Erfüllung dieser Aufgabe wird schwierig, wenn die Fahrgeschwindigkeit steigt. Theoretisch kann ein Auto ohne abzuheben 400 km/h erreichen (Bugatti Veyron mit 736 kW [11]). Die Aufgabe des Fahrwerks ist aber deshalb so schwierig, weil die Fahrbahn weder stets gerade verläuft, eine glatte, griffige Oberfläche ohne Unebenheiten hat, noch frei von Hindernissen bleibt. Je höher die Geschwindigkeit, desto schwieriger werden diese Aufgaben, weil die zu beherrschende Energie (Fahrzeugmasse mal Quadrat der Fahrzeuggeschwindigkeit) exponential steigt.

Der Fahrer beeinflusst die Bewegungen des Fahrzeugs in Längs- und Querrichtung. In senkrechter Richtung zur Fahrbahn folgt das Automobil hingegen dem Straßenverlauf ohne aktiven Eingriff des Fahrers. Um Komfort und Sicherheit beim Fahren zu gewährleisten, sollen die Fahrbahnebenheiten und Fahrbahnunterschiede so wenig wie möglich auf das Fahrzeug übertragen werden [10].

Die Aufgaben des Fahrwerks sind daher vielseitig und lassen sich im Überblick wie folgt auflisten [12]:

- ◆ Das Fahrzeug bewegen, rollen, festhalten.
- ◆ Das Fahrzeug beim Fahren stets in Spur halten.
- ◆ Die Fahrzeugmasse abstützen, federn und ihre Schwingungen dämpfen.
- ◆ Die von der Fahrbahn kommenden Geräusche und Schwingungen dämpfen bzw. isolieren.
- ◆ Die externen Störgrößen (Wind) kompensieren.
- ◆ Das Antriebsmoment auf die Fahrbahn bringen.
- ◆ Die Räder lagern, führen, lenken und bremsen.
- ◆ Dem Fahrer eine sichere und komfortable Fahrzeugführung gewährleisten.

Insgesamt ist das Fahrwerk verantwortlich für das dynamische Fahrzeugverhalten sowie für Fahrsicherheit und Fahrkomfort. Damit gehört es neben Motor und Getriebe zu den wichtigsten und technisch anspruchsvollsten Systemen eines Fahrzeugs.

Das erklärt die Bedeutung und Vielseitigkeit der Fahrwerktechnik. Sie bündelt nicht nur Funktionsgruppen, sondern umfasst auch die Regelung der einzelnen Funktionsgruppen und ihrer Wechselwirkungen untereinander.

Da außer Lenkrad, Rad und Reifen alle Komponenten des Fahrwerks für den Fahrer unsichtbar bleiben, vermitteln sie keine direkten Kaufanreize. Erst bei der ersten Probefahrt, noch wichtiger erst bei einer kritischen Fahrsituation, merkt jeder den hohen Stellenwert des Fahrwerks im Gesamtauto [10]:

- ◆ Ein fahrdynamisch optimal abgestimmtes Auto ist für den Fahrer mit geringem Aufwand zu fahren, weil es die von ihm eingegebenen Befehle unmittelbar, vorhersehbar und präzise umsetzt. Es vermittelt ein Gefühl der Sicherheit. Dieses Gefühl „Freude am Fahren“ ist ein Kaufkriterium für viele Autofahrer.
- ◆ Die Fahrdynamik eines Fahrzeugs bestimmt ganz wesentlich die Möglichkeiten des Fahrers, die kritischen Situationen zu beherrschen oder zu vermeiden.
- ◆ Hoher Fahrkomfort wird nicht nur subjektiv als angenehm empfunden, sondern hat auch einen nachgewiesenen Einfluss auf das physische und psychische Leistungsvermögen des Fahrers.

Die Unfallstatistiken zeigen, dass 36 % aller Unfälle mit Todesfolge entstehen, weil das Fahrzeug (bei Unachtsamkeit des Fahrers, bei überhöhter Geschwindigkeit oder schlechten Straßenverhältnissen) von der Fahrbahn abkommt. Die Wahrscheinlichkeit, dass das Fahrzeug in der Spur bleibt ist größer, je besser und sicherer ein Fahrwerk funktioniert.

Das Fahrwerk hat aber auch einen wesentlichen Einfluss auf Raumausnutzung, Gewicht, Aerodynamik und die Gesamtkosten des Fahrzeugs. Der Leichtbau spielt beim Fahrwerk eine wesentlich

größere Rolle als bei allen anderen Baugruppen, da die gesamte ungefederte Masse des Fahrzeuges (Räder, Reifen, Radträger, Radlagerung, Bremse, anteilig Feder, Dämpfer, Radaufhängung) sich im Fahrwerk befindet. Durch die Reduzierung dieser Masse können die Fahreigenschaften deutlich beeinflusst werden. Je kleiner die ungefederten Massen sind, desto weniger wird der Aufbau von Radschwingungen beeinflusst und desto einfacher wird das ständige in Kontakt halten des Fahrzeugs mit der Fahrbahn. Es entstehen so weniger Störgrößen, welche die Fahr-sicherheit und den Fahrkomfort beeinträchtigen.

1.2 Fahrwerk Aufbau

Bevor der Fahrwerk Aufbau beschrieben wird, sind zwei übergeordnete Klassifizierungen des Pkw, nämlich Fahrzeugklassen und -antriebskonzepte zu erläutern,

weil diese eine wesentliche Rolle bei der Festlegung und Diskussion des Fahrwerks spielen.

1.2.1 Fahrzeugklassen

Pkw-Klassen werden nach deren Einsatz und Außenabmessungen definiert. Schon vor 25 Jahren waren es nur wenige unterschiedliche Typen: Limousinen der Kompaktklasse, Mittelklasse und Oberklasse. Dazu kamen einige Derivate wie Kombi, Fließheck, Coupe, Cabriolet, Sportwagen.

Heute ist es nicht mehr so übersichtlich, weil jedes Jahr neue Modellvarianten und so genannte „Cross overs“ entstehen (Bild 1-9). Dementsprechend gibt es unterschiedlich detaillierte Klassifizierungen. Eine von denen, die in diesem Buch benutzt bevorzugt wird, ist in der Tabelle 1-1 aufgelistet.

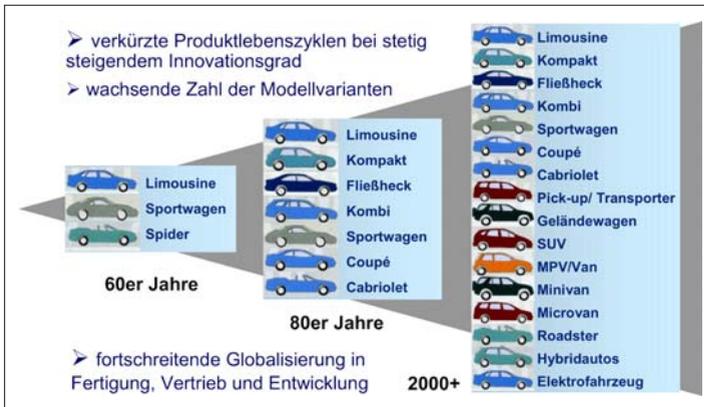


Bild 1-9: Wachsende Anzahl der Fahrzeugmodelle

Tabelle 1-1: Fahrzeugklassen

Segment	Fahrzeugbeispiele
1	MINI Citroen-C1, DC-Smart, Fiat-Panda, Renault-Twingo, Seat Aroso, Toyota Aygo,VW-Lupo
2	SMALL Audi A2, Fiat Uno, Ford-Fiesta, Opel-Corsa, Renault-Clio, Peugeot-207, Toyota Yaris, VW-Polo
3	LOWER MEDIUM BMW-1'er, Ford-Focus, DC-A,B Klasse, Opel-Astra, Renault-Megane, Toyota Corolla,VW-Golf
4	MEDIUM Alfa 156, Audi-A4, BMW-3'er, Ford-Mondeo, C-Klasse, Citroen C5, Opel-Vectra, VW-Passat
5	UPPER MEDIUM Alfa 167, Audi-A6,BMW-5'er, Opel-Signum, DC-E-Klasse, Renault-Vel Satis, Volvo S80
6	LUXURY Audi-A8, BMW-7'er, DC-S-Klasse, Maybach, Rolls Royce, VW-Phaeton, Bentley
7	SPORT Audi TT, BMW- Z8, 6'er,DC-SL, SLK, Porsche 911, Boxster, Opel-Tigra, VW-EOS
A	VAN DC-V-Klasse, Opel-Combo, VW-Multivan
B	MINIVAN Citroen-Berlingo, Fiat-Doblo, Opel-Combo, Renault-Kangoo, Toyota-Hijet, VW-Caddy
D	TRANSPORTER DC-Sprinter, Fiat-Ducato, Ford-Transit, Opel-Vivaro, Toyota Hiace, Peugeotot-Boxer, VW-T5
F	SUV Audi-Q7, BMW-X3, X5, DC-M Klasse, Toyota-RAV, Land Rover, VW-Touareg
G	PICK-UP Ford F-series, Ranger, Toyota-Hilux, Dodge-Ram, Dakota
M	MPV DC-M Klasse, Fiat-Ulysse, Ford-Galaxy, Peugeot-807, Renault Espace, VW-Sharan

Damit nicht für jede dieser Variante ein komplett neues Fahrwerk entwickelt werden muss, wurden Modul- oder Plattformstrategien eingeführt; jeder OEM hat weltweit nur eine begrenzte Anzahl unterschiedlicher Antriebs- und Fahrwerkkonzepte, die er dann mit Anpassungen an die modellspezifische Spur, den Radstand und die Radlasten als ein Baukastensystem bei allen seinen Modellen anwenden kann. Die Konzepte für Module oder Plattformen richten sich in erster Linie nach den Baureihen und deren Marktpreis.

Es gibt am unteren Ende ein kostengünstig herstellbares Konzept (meist für Frontmotor/Frontantrieb, vorne McPherson, hinten Verbundlenkerachse) und am oberen Ende ein technisch aufwändiges, luxuriöses und teures Konzept (Allradantrieb, vorne und hinten Mehrlenkerachsen wahlweise mit Luftfederung und aktiven Systemen).

Die Analyse der Maßvergleiche unterschiedlicher Fahrzeugklassen zeigt, dass diese im Wesentlichen durch die Komfortmasse definiert werden [10]:

- ◆ Schulterbreite vorne,
- ◆ Fußraum hinten,
- ◆ Innenraumlänge (Komfortmaß),
- ◆ Kofferraumvolumen.

Die restlichen Maße ergeben sich durch die ergonomischen Grundanforderungen, die in jedem Fahrzeug erfüllt werden müssen.

Sport Utility Fahrzeuge (SUVs, MPVs Geländefahrzeuge) zeichnen sich durch eine min. 50 mm größere Bodenfreiheit, Böschungswinkel bis zu 40° und Allradantrieb aus. Auch innerhalb der SUVs gibt es drei unterschiedliche Größen.

VANs sind die Derivate aus den Limousinen, die besonders durch die großen komfortablen Innenmaße und durch die Möglichkeit, mehr als 5 Personen zu transportieren gekennzeichnet sind. Auch hier gibt es Mikro-, Mini-, Mittelklasse- und sogar Oberklasse-VANs.

In den letzten Jahren sind aus fast allen Volumenmodellen der Kompaktklasse durch die Höherlegung des Fahrzeugbodens und durch die vergrößerte Kopffreiheit neue Derivate entstanden, die besonders für Familien mit Kindern geeignet sind.

Die Transporter bieten in erster Linie viel Platz für Passagiere, aber auch für den kommerziellen Transport von Lasten und umgehen damit die Geschwindigkeitseinschränkungen von Lkws. Sie sind schnell, wendig und kostengünstig, bieten jedoch entsprechend weniger Komfort.

Die US-Alternative zum europäischen Transporter sind die Pick-ups, die neben den 3 Passagieren auch mittels einer großen, offenen Ladefläche sperrige und schwere Gegenstände transportieren können.

Obwohl es keine strikten Regeln gibt, die bestimmen, welche Fahrzeugklassen welche Fahrwerkkonzepte haben müssen, existieren sinnvolle Zuordnungen zwischen Fahrzeugklassen und Fahrwerkkonzepten.

1.2.2 Antriebskonzepte

Der zweitwichtigste, Fahrwerk bestimmende Faktor ist das Antriebskonzept, das die Lage des Motors (Antriebsaggregat) und der angetriebenen Achsen vorgibt.

Es gibt drei grundsätzliche Anordnungen [13]:

- ◆ Frontmotoranordnung,
- ◆ Mittelmotoranordnung,
- ◆ Heckmotoranordnung,

zwei Motoreinbauvarianten:

- ◆ Längseinbau,
- ◆ Quereinbau

sowie drei Möglichkeiten der Antriebsachsen:

- ◆ Antreiben der Vorderräder (Frontantrieb),
- ◆ Antreiben der Hinterräder (Heckantrieb) und
- ◆ Antreiben aller Räder (Allradantrieb).

Daraus ergeben sich $3 \times 2 \times 3 = 18$ Möglichkeiten. Davon machen viele jedoch weder wirtschaftlich noch technisch einen Sinn. Die in den Serienautomobilen zu findenden Kombinationen sind:

1. Front-Quer-Motoranordnung mit Frontantrieb,
2. Front-Quer-Motoranordnung mit Allradantrieb,
3. Front-Längs-Motoranordnung mit Frontantrieb,
4. Front-Längs-Motoranordnung mit Heckantrieb,
5. Front-Längs-Motoranordnung mit Allradantrieb,
6. Heck-Quer-Motoranordnung mit Heckantrieb,
7. Heck-Längs-Motoranordnung mit Heckantrieb,
8. Heck-Längs-Motoranordnung mit Allradantrieb,
9. Mitte-Längs-Motoranordnung mit Heckantrieb.

Aktuell werden nur sechs der obigen 9 Antriebskonzepte bevorzugt und verstärkt eingesetzt (**Bild 1-10**):

- ◆ Front-Quer-Motoranordnung mit Frontantrieb bei Fahrzeugen bis zur Mittelklasse, wegen der Wirtschaftlichkeit, Fahrstabilität, Gutmütigkeit, winter- und sommerlichem Fahrverhalten und Raumökonomie,
- ◆ Front-Längs-Motoranordnung mit Frontantrieb bei Fahrzeugen ab der Mittelklasse wegen der Fahrstabilität, Gutmütigkeit, winter- und sommerlichem Fahrverhalten und Raumökonomie, Einbaumöglichkeit von 8- oder Mehrzylinder-Motoren,
- ◆ Front-Längs-Motoranordnung mit Heckantrieb bei Fahrzeugen ab der oberen Mittelklasse wegen der Fahrsicherheit, Fahrdynamik, von Beladung unempfindlicher 50/50 Achslastverteilung, des vom Antriebsmoment unabhängigen Lenkverhaltens und schließlich der Einbaumöglichkeit von 8- oder Mehrzylinder-Motoren,
- ◆ Allradversionen der drei oberen Anordnungen wegen der Benutzung der gleichen Plattform in mehreren Modellen insbesondere SUVs und Reduzierung der Nachteile des Einachsenantriebs,

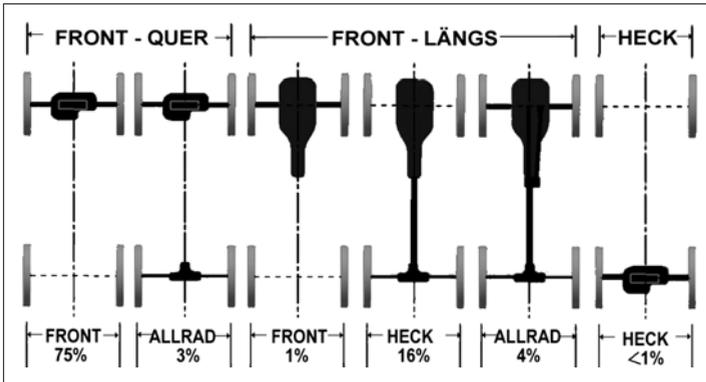


Bild 1-10:

Gegenüberstellung der Antriebsarten und deren weltweiten prozentualen Marktanteile in 2005

- ♦ Längseinbau von Mittel oder Heckmotoren mit Heckantrieb bei kleinen, sportlichen Fahrzeugen zur Steigerung der Traktion und Fahreigenschaften. Wegen der Einschränkungen an Variabilität und der hohen Kosten ist diese Variante nicht als Weltplattform geeignet.

Der Bestand heutiger Fahrzeuge wird hauptsächlich durch drei Antriebsarten und die dazugehörigen Fahrwerkskonzepte geprägt: Front-Quer-Motor mit Frontantrieb (weltweit 75 % aller Fahrzeuge), Front-Längs-Motor mit Heckantrieb (16 %) und der Allradantrieb (7 %). Alle anderen Konzepte liegen weit unter 2 % [1].

Front-Quer-Motor mit Frontantrieb (Bild 1-11):

Insgesamt wird diese Kombination mit Abstand in den meisten Fahrzeugen eingebaut. Die Vorteile sind: niedrige Kosten, kompakte, leichte Bauweise, stabiles und gutmütiges Fahrverhalten und gute Traktion auch auf schlechten, winterlichen Straßen.

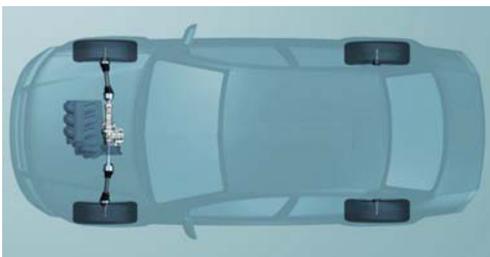


Bild 1-11: Front-Quer-Motor mit Frontantrieb

Als Fahrwerk hat dieses Konzept vorne fast ausschließlich ein McPherson-Federbein, weil dieses, ähnlich wie das Antriebskonzept, kostengünstig, Platz sparend und mit guten Fahreigenschaften gebaut werden kann. Die kinematischen Nachteile bei stärkeren Motorvarianten lassen sich durch die Auflösung der unteren 3-Punkt-Lenker und die zweiteilige Gestaltung der Radträger (drehbar/nicht drehbar) reduzieren.

An der Hinterachse passt die kostengünstigste und Platz sparende Verbundlenkerachse am besten dazu. Die fahrtechnischen Grenzen des Verbundlenkers werden ab der unteren Mittelklasse häufig durch Verwendung von Mehrlenkerachsen (ein Längslenker und drei Querlenker oben und unten) ausgeglichen, jedoch mit Kosten- und Raumeinbußen.

Front-Längs-Motor mit Heckantrieb (Bild 1-12):

Diese Kombination wird häufig für die Fahrzeuge ab der Mittelklasse verwendet. Sie ist ab der oberen Mittelklasse als Standard zu sehen, weil sie ihre Vorzüge in der zwanglosen Unterbringung von großvolumigen Motoren und fast beliebigen Schalt- und Automatikgetriebevarianten voll zur Geltung bringt. Durch die Trennung von gelenkten und angetriebenen Rädern ergeben sich Vorteile im Lenkverhalten. Ausgewogene Gewichts- und Komfortverhältnisse und gute Traktion auf trockenen Fahrbahnen mit Volllast oder in Anhängerbetrieb sind weitere Vorteile.

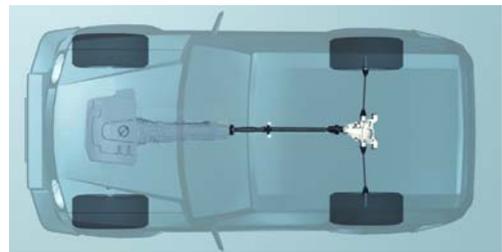


Bild 1-12: Front-Längs-Motor mit Heckantrieb

Als Fahrwerk hat dieses Konzept oft Doppelquerlenker an der Vorderachse, z.T. mit der oberen Lenkerebene oberhalb des Reifens und unten mit aufgelösten Lenkern (Trag- und Führungslenker getrennt).

An der Hinterachse sind Mehrlenkerachsen in unterschiedlichen Varianten zu finden; mit fünf Lenkern, mit einem 4-Punkt-Trapezlenker plus je einem oberen Querlenker und unterem Schräglenker, alle gelagert auf einem Achsträger, um den Komfort zu steigern.