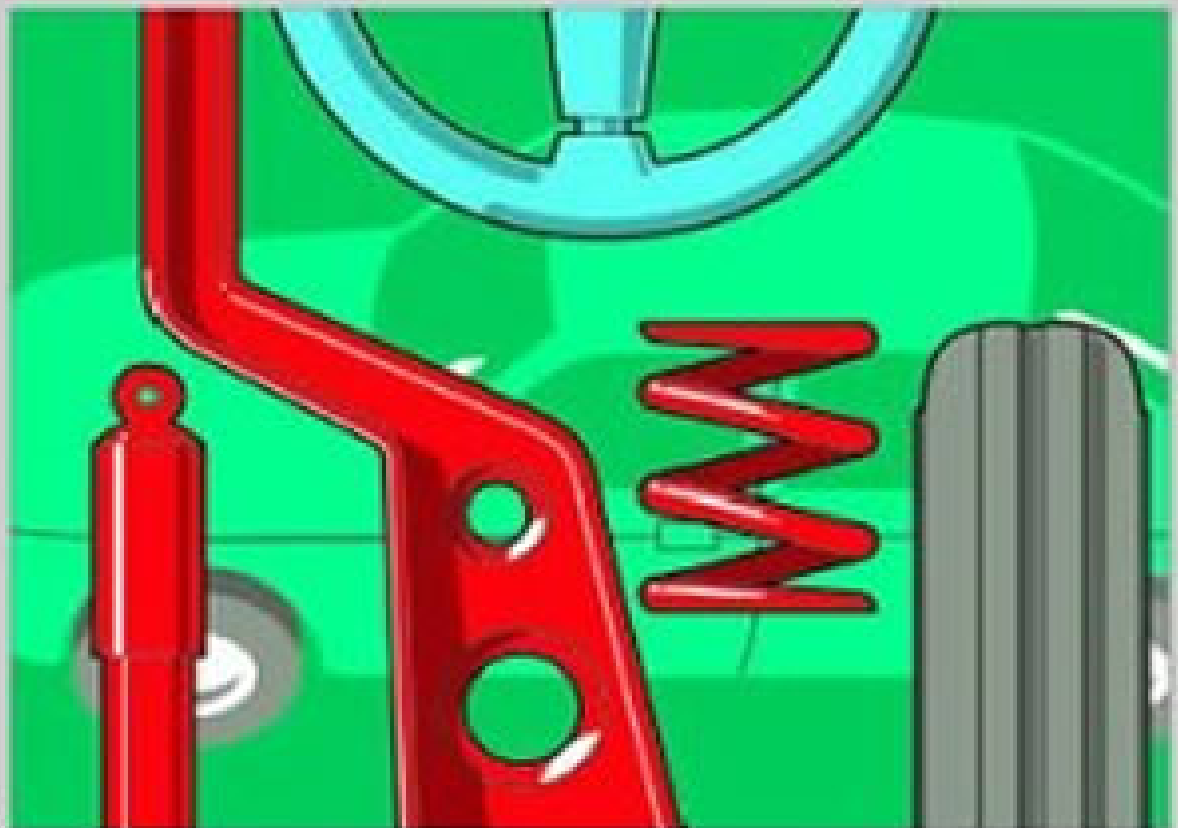


Vogel Fachbuch

Herausgeber: Prof. Dipl.-Ing. Jörnßen Reimpell

Jörnßen Reimpell/Jürgen Betzler

Fahrwerktechnik: Grundlagen



Jörnsen Reimpell/Jürgen W. Betzler
Fahrwerktechnik: Grundlagen

Prof. Dipl.-Ing. Jörnßen Reimpell
Prof. Dr.-Ing. Jürgen W. Betzler

Fahrwerktechnik: Grundlagen

Fahrwerk und Gesamtfahrzeug
Radaufhängungen und Antriebsarten
Achskinematik und Elastokinematik
Lenkanlage – Federung – Reifen
Konstruktions- und Berechnungshinweise

Herausgeber: Prof. Dipl.-Ing. Jürgen W. Betzler

5., überarbeitete Auflage

Vogel Buchverlag

Prof. Dipl.-Ing. JÖRNSEN REIMPELL

Geboren 1919, Abitur 1937, Tätigkeit als Kraftfahrzeug-Mechaniker, Studium an der Technischen Universität Berlin, 1946 Diplom und anschließend eigene Kfz-Reparaturwerkstatt. Ab 1949 Konstrukteur und Versuchsingenieur beim Borgward-Konzern und der Fa. Audi/Auto-Union. 1953 Leiter des Fahrwerksversuchs. Während der Tätigkeit in der Autoindustrie Erfindungen, 17 Patente und 35 Gebrauchsmuster. 1962 Leiter der Stoßdämpferentwicklung bei der Fa. Hoesch; 1963 bis 1981 Dozent für das Fachgebiet Automobilfahrwerke an der Ingenieurschule und später an der Fachhochschule Köln; Ernennung zum Professor; von 1982 bis zu seinem Tod 2003 Tätigkeit als freier Fachschriftsteller.

Prof. Dr.-Ing. JÜRGEN W. BETZLER

Geboren 1955. Nach dem Abitur Studium des Maschinenbaus mit Schwerpunkt Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität Darmstadt; Diplom 1980, anschließend Tätigkeit in der Industrie im Bereich Betriebsfestigkeit sowie Vorentwicklung Nutzfahrzeug-Getriebe und -Antriebsmanagement. Von 1983 bis 1988 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt, Schwerpunkt Fahrverhalten, Fahrzeugsimulation und Unfallursachenermittlung; Promotion zum Thema Fahrverhalten und Fahrbahnbeanspruchung. Bis Ende 1993 technischer Leiter bei einem Kommunalfahrzeughersteller. Seit 1994 Professor für Fahrwerk-/Simulationstechnik am Institut für Fahrzeugtechnik der Fachhochschule Köln, IFK.

Weitere Informationen:
www.vogel-buchverlag.de

ISBN-13: 978-3-8343-3031-4

ISBN-10: 3-8343-3031-0

5. Auflage 2005

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 1986 by Vogel Verlag und Druck GmbH & Co. KG, Würzburg

Umschlaggrafik: Michael M. Kappenstein, Frankfurt/M.

Satz: Fotosatz-Service Köhler GmbH, Würzburg

Vorwort

Der große Erfolg der 4. Auflage macht eine Neuauflage der «Fahrwerktechnik: Grundlagen» früher als geplant erforderlich. Prof. Dipl.-Ing. Jörnßen Reimpell konnte diese Neuauflage nicht mehr erleben. Er verstarb am 9. August 2003 in Köln.

Sein Name ist untrennbar verbunden mit der Beschreibung des Kenntnisstandes auf dem Gebiet der Fahrwerktechnik: Als Autor und Herausgeber zeichnete Reimpell für 23 Fachbücher verantwortlich, die das Thema Fahrwerk und Fahrwerkskomponenten in einzigartigem Umfang beschreiben.

Der inhaltlichen Qualität seiner Bücher kam Reimpells Werdegang zu Gute: Als Autoschlosser und Betreiber einer eigenen Kfz-Werkstatt bestens mit der Praxis vertraut, schlossen sich an das Studium des Maschinenbaus erfolgreiche Jahre – nicht zuletzt dokumentiert durch zahlreiche Patentanmeldungen – als Konstrukteur und Versuchingenieur bei Firmen wie Goliath, Auto-Union – dort als Leiter des Fahrwerke-Versuchs – und Hoesch an, bevor Reimpell 1962 eine Lehrtätigkeit an der heutigen Fachhochschule Köln aufnahm. Seine umfassenden Erfahrungen auf dem Gebiet der Fahrwerke konnte er beim völligen Neuaufbau des dortigen Fahrwerkelabors Mitte der 70er Jahre einsetzen und so die Voraussetzung für seine Arbeiten auf dem Gebiet der Radkinematik und Elastokinematik sowie des Verhaltens von Lenkanlagen, Bremsen und Stoßdämpfern schaffen. Zahlreiche der von ihm entwickelten Prüfstands-aufbauten und Versuchsanordnungen wurden von der Automobilindustrie übernommen; viele seiner Arbeiten auf dem Gebiet der Fahrwerktechnik schufen Grundlagen für moderne Fahrwerke.

Als Hochschullehrer verstand es Jörnßen Reimpell die Studierenden für «seine» Fahrwerktechnik zu begeistern und ihnen – wie auch den Lesern seiner Fachbücher –, bei klarem Blick für das Wesentliche, doch auch im erforderlichen Umfang die oft im Detail liegenden Probleme vor Augen zu führen.

Noch bis kurz vor seinem Tod nahm er regen Anteil an der Entwicklung der Fahrwerktechnik. Mit der ihm eigenen Akribie, dabei von zurückhaltender Wesensart – in seinem hohen Anspruch an die Qualität der eigenen Arbeit aber beharrlich –, übernahm er die Überarbeitung seines Grundlagenwerkes, der 4. Auflage des Fachbuches «Fahrwerktechnik: Grundlagen». Sie erschien – inzwischen in vier Sprachen herausgegeben – zeitgleich zu seinem 80. Geburtstag.

Herausgeber Jürgen W. Betzler

Verlag

Die Fachbuchreihe «Fahrwerktechnik»

(Hrsg.: Prof. Dipl.-Ing. Jörnens Reimpell/Prof. Dr.-Ing. Jürgen W. Betzler)

umfaßt folgende Bände:

Reimpell/Betzler: *Grundlagen*

Stoll: *Lenkanlagen und Hilfskraftlenkungen*

Burckhardt: *Radschlupf-Regelsysteme*

Reimpell/Stoll: *The Automotive Chassis: Engeneering Principles*

Inhaltsgleiche englischsprachige Ausgabe der «Grundlagen (3. Aufl.)»

erschienen im Verlag Arnold, 338 Euston Road, London NW1 3BH, Großbritannien

[ISBN 0 340 61443 9 (hb)]

Da die Fachbuchreihe «Fahrwerktechnik» ein in sich geschlossenes Ganzes mit zahlreichen Querverweisen darstellt, sind folgende vergriffene Titel als pdf.-Dateien auf CD-ROM aus dem Vogel Buchverlag erhältlich:

Reimpell: *Fahrzeugmechanik* (2. Aufl. 1992)

Reimpell: *Lenkung* (1. Aufl. 1984)

Reimpell: *Radaufhängungen* (2. Aufl. 1988)

Reimpell: *Reifen und Räder* (2. Aufl. 1988)

Preukschat/Reimpell: *Antriebsarten* (2. Aufl. 1988)

Burckhardt: *Bremsdynamik* (1. Aufl. 1991)

Stoll: *Stoß- und Schwingungsdämpfer* (2. Aufl. 1989)

Zomotor: *Fahrverhalten* (2. Aufl. 1991)

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Radaufhängungen und Antriebsarten	13
1.1 Allgemeine Merkmale von Radaufhängungen	13
1.2 Einzelradaufhängungen, allgemein	19
1.2.1 Anforderungen	19
1.2.2 Doppelquerlenker-Radaufhängungen	20
1.2.3 Radführende Feder- und Dämpferbeine	22
1.2.4 Längslenker-Hinterachsen	27
1.2.5 Schräglenker-Hinterachsen	29
1.2.6 Mehrlenkerachsen	31
1.3 Starr- und Verbundlenkerachsen	34
1.3.1 Starrachsen	34
1.3.2 Verbundlenkerachsen	40
1.4 Standardbauweise, Motor vorn und Antrieb hinten	43
1.4.1 Vor- und Nachteile der Standardbauweise	43
1.4.2 Nichtangetriebene Vorderachsen	48
1.4.3 Angetriebene Hinterachsen	53
1.5 Heck- und Mittelmotorantrieb	55
1.6 Vorderradantrieb	58
1.6.1 Bauarten	58
1.6.2 Vor- und Nachteile des Vorderradantriebs	61
1.6.3 Angetriebene Vorderachsen	69
1.6.4 Nichtangetriebene Hinterachsen	70
1.7 Allradantrieb	76
1.7.1 Vor- und Nachteile	76
1.7.2 Zuschaltbarer Allradantrieb bei Pkw und Kombiwagen	80
1.7.3 Manuell zuschaltbarer Allradantrieb bei Nkw und Geländewagen (Mehrzweck-Pkw)	84
1.7.4 Permanenter Allradantrieb, Basis Pkw mit Motor an Antriebsachse	84
1.7.5 Permanenter Allradantrieb, Basis Pkw in Standardbauweise	92
1.7.6 Übersicht realisierter Allradantriebsvarianten	98
2 Reifen und Räder	99
2.1 Forderungen an die Bereifung	99
2.1.1 Austauschbarkeit	99
2.1.2 Forderungen bei Pkw	100
2.1.3 Forderungen bei Nkw	101
2.2 Reifenausführungen	102
2.2.1 Reifen in Diagonalbauart	102
2.2.2 Reifen in Radial-Gürtelbauart	103
2.2.3 Schlauchlos oder mit Schlauch	105

2.2.4	Höhen-Breiten-Verhältnis	106
2.2.5	Reifenabmessungen und -bezeichnungen	109
2.2.6	Reifentragfähigkeiten und Luftdrücke	111
2.2.7	Reifenkennzeichnung auf der Seitenwand	117
2.2.8	Reifenabrollumfang und Fahrgeschwindigkeit	117
2.2.9	Einfluß des Reifens auf den Geschwindigkeitsmesser	120
2.2.10	Reifenprofile	122
2.3	Räder	122
2.3.1	Begriffe	122
2.3.2	Felgen für Pkw, Leicht-Nkw und deren Anhänger	122
2.3.3	Räder für Pkw, Leicht-Nkw und deren Anhänger	125
2.3.4	Radbefestigungen	128
2.4	Federungsverhalten	129
2.5	Ungleichförmigkeit	131
2.6	Rollwiderstand	133
2.6.1	Rollwiderstand bei Geradeausfahrt	133
2.6.2	Rollwiderstand bei Kurvenfahrt	134
2.6.3	Sonstige Einflußgrößen	136
2.7	Umfangskraftbeiwerte und Reibungszahlen	136
2.7.1	Schlupf	136
2.7.2	Reibungsbeiwerte und -zahlen	137
2.7.3	Fahrbahneinflüsse	138
2.8	Seitenkraftbeiwerte und Reibungszahlen	140
2.8.1	Seitenkräfte, Schräglaufwinkel und Reibungszahl	140
2.8.2	Eigenlenkverhalten von Fahrzeugen	142
2.8.3	Reibungszahlen und Schlupf	144
2.8.4	Seitenführungseigenschaften auf trockener Fahrbahn	145
2.8.5	Einflußgrößen	147
2.9	Resultierender Kraftbeiwert	150
2.10	Reifenrückstellmoment und Reifennachlauf	152
2.10.1	Rückstellmoment, allgemein	152
2.10.2	Reifennachlauf	153
2.10.3	Einflußgrößen an den Vorderrädern	154
2.11	Reifenkippmoment und Kraftangriffspunktverlagerung	156
2.12	Lastwechselreaktionen	158
2.12.1	Lastwechselreaktionen als Folge der Normalkraftänderung	158
2.12.2	Lastwechselreaktionen durch Reifenrückstellmomente	158
2.12.3	Einfluß von Kinematik und Elastokinematik	160
3	Radhub- und Elastokinematik	161
3.1	Zweck der Achseinstellwerte	162
3.2	Radstand	163
3.3	Spurweite	164
3.4	Wankzentrum und Wankachse	174
3.4.1	Begriffsbestimmung	174
3.4.2	Wankachse	176
3.4.3	Wankzentrum bei Einzelradaufhängungen	177
3.4.4	Wankzentrum bei Verbundlenkerachsen	183
3.4.5	Wankzentrum bei Starrachsen	185
3.5	Sturz	187
3.5.1	Sturzwerte und Sturzangaben	187
3.5.2	Kinematische Sturzänderung	189
3.5.3	Zeichnerische Ermittlung der Sturzänderung	192
3.5.4	Wanksturz bei Kurvenfahrt	193

3.5.5	Elastizitätssturz	196
3.6	Vorspur und Eigenlenken	197
3.6.1	Vorspur- und Fahrachswinkel, Zahlenwerte und Toleranzen	197
3.6.2	Vorspur- bzw. Lenkwinkeländerung infolge Radhubkinematik	201
3.6.3	Vorspur- bzw. Lenkwinkeländerung infolge Wankens	203
3.6.4	Vorspur- bzw. Lenkwinkeländerung durch Seitenkräfte	209
3.6.5	Vorspur- bzw. Lenkwinkeländerung durch Längskräfte	213
3.7	Lenkwinkel und Lenkübersetzung	219
3.7.1	Lenkwinkel	219
3.7.2	Spur- und Wendekreis	221
3.7.3	Kinematische Lenkübersetzung	224
3.7.4	Dynamische Lenkübersetzung	228
3.8	Lenkungsrückstellung, allgemein	229
3.9	Spreizung und Lenkrollhalbmesser	231
3.9.1	Zusammenhang Spreizung und Lenkrollhalbmesser	231
3.9.2	Bremskrafthebelarm	236
3.9.3	Längskrafthebelarm	238
3.9.4	Änderung des Lenkrollhalbmessers	240
3.10	Nachlauf	240
3.10.1	Nachlaufstrecke und -winkel	240
3.10.2	Nachlauf und Geradeausfahrt	244
3.10.3	Rückstellmomente bei Kurvenfahrt	245
3.10.4	Spreizungs-, Sturz- und Nachlaufänderung infolge Lenkens	248
3.10.5	Kinematische Nachlaufänderung in Abhängigkeit der Radwege vorn	254
3.10.6	Wegabhängige Drehung des hinteren Radträgers	259
3.10.7	Zerlegung der Hochkraft bei Nachlauf	260
3.10.8	Einstellwerte und Toleranzen	263
3.11	Brems- und Anfahrnickabstützung	264
3.11.1	Begriffsbestimmung	264
3.11.2	Nickpole vorn	264
3.11.3	Nickpole hinten	267
3.12	Fahrwerkvermessung	269
3.12.1	Meß- und Prüfeinrichtungen zur Fahrwerkvermessung	269
3.12.2	Messung der Nachlauf-, Spreizungs-, Sturz- und Vorspuränderung	272
4	Lenkung	275
4.1	Lenkanlage	275
4.1.1	Anforderungen	275
4.1.2	Lenkanlage bei Einzelradaufhängungen	278
4.1.3	Lenkanlage bei Starrachsen	278
4.2	Zahnstangenlenkung	280
4.2.1	Vor- und Nachteile	280
4.2.2	Ausführungsformen	281
4.2.3	Lenkgetriebe, manuell, Seitenabgriff der Spurstangen	283
4.2.4	Lenkgetriebe, manuell, Mittenabgriff der Spurstangen	286
4.3	Kugelumlauf lenkung	286
4.3.1	Vor- und Nachteile	286
4.3.2	Lenkgetriebe	288
4.4	Hilfskraftlenkungen (Servolenkungen)	289
4.4.1	Hydraulische Hilfskraftlenkungen	290
4.4.2	Elektrohydraulische Hilfskraftlenkungen	292
4.4.3	Elektrische Hilfskraftlenkungen	294
4.5	Lenksäule	297
4.6	Lenkungsdämpfer	303

4.7	Lenkkinematik	303
4.7.1	Einfluß von Art und Lage des Lenkgetriebes	303
4.7.2	Lenkviereck und Lenkdreieck	305
4.7.3	Spurstangenlänge und -lage	307
5	Federung	317
5.1	Komfortforderungen	317
5.1.1	Federungskomfort	318
5.1.2	Abrollkomfort	322
5.1.3	Verhindern des «Stuckerns»	322
5.2	Massen, Schwingungszahlen und Federraten	324
5.3	Gewichte und Achslasten	328
5.3.1	Leergewicht und Masse des Fahrzeugs	329
5.3.2	Zulässiges Gesamtgewicht und Gesamtmasse	330
5.3.3	Zulässige Nutzlast	330
5.3.4	Konstruktionsgewicht	333
5.3.5	Zulässige Achslasten	333
5.3.6	Lastverteilung nach ISO 2416	335
5.4	Federungskennlinien	339
5.4.1	Vorderachse	339
5.4.2	Hinterachse	341
5.4.3	Federung nach Kurvenverhalten	346
5.4.4	Schrägfederung	350
5.5	Federnarten	350
5.5.1	Luft- und Gasfedern	351
5.5.2	Stahlfedern	352
5.5.3	Anschläge und Zusatzfedern	356
5.5.4	Stabilisatoren	357
5.6	Stoßdämpfer	358
5.6.1	Einbauarten	359
5.6.2	Zweirohrdämpfer, drucklos	360
5.6.3	Zweirohrdämpfer, druckbelastet	366
5.6.4	Einrohrdämpfer, druckbelastet	367
5.6.5	Einrohrdämpfer, drucklos	374
5.6.6	Dämpfungsdiagramme und -kennlinien	376
5.6.7	Dämpferaufhängungen	378
5.6.8	Anschläge und Zusatzfedern	380
5.7	Federdämpfer	385
5.8	Feder- und Dämpferbeine	385
5.8.1	Federbeinausführungen	385
5.8.2	Zweirohrfederbeine, drucklos	387
5.8.3	Zweirohrfederbeine, druckbelastet	387
5.8.4	Dämpferbeine	391
5.9	Variable Dämpfung	391
6	Fahrwerk und Gesamtfahrzeug	397
6.1	Fahrzeug- und Aufbauswerpunkt	397
6.1.1	Schwerpunkt und Fahrverhalten	397
6.1.2	Ermittlung des Fahrzeugschwerpunktes	398
6.1.3	Achsgewichte und -schwerpunkte	403
6.1.4	Aufbaugewicht und -schwerpunkt	405
6.2	Massenträgheitsmomente	405
6.3	Bremsverhalten	407
6.3.1	Bremsvorgang	408

6.3.2	Bremsstabilität	410
6.3.3	Berechnung des Nickwinkels	414
6.3.4	Einfluß von Nickpolen	418
6.3.5	Bremsnickausgleich und Bremsabstützwinkel	421
6.4	Antriebsverhalten	422
6.4.1	Anfahrvorgang	422
6.4.2	Steigfähigkeit	425
6.4.3	Rutschgrenzen	427
6.5	Plattform-, Baukasten- und Gleichteilsysteme	430
	Formelzeichen mit Benennungen in Deutsch und Englisch	433
	Im Text genannte Automobilfirmen	449
	Im Text genannte Systemlieferanten und Komponentenhersteller	451
	Literaturverzeichnis	453
	Stichwortverzeichnis	455

1 Radaufhängungen und Antriebsarten

Dieses Kapitel behandelt die grundlegenden Zusammenhänge; hier nicht beschriebene Einzelheiten sind in den Bänden [1], [2], [5] und [8] zu finden; die Berechnung von «Radaufhängungen» enthalten die Kapitel 6 und 7 in [3].

1.1 Allgemeine Merkmale von Radaufhängungen

An Radaufhängungen moderner Fahrzeuge werden eine Vielzahl von Anforderungen gestellt, die unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Betriebsbedingungen (beladen/unbeladen, Beschleunigen/Bremsen, ebene/unebene Fahrbahn, Geradeaus-/Kurvenfahrt) teilweise in einem Zielkonflikt zueinander stehen:

Die in der Radaufstandsfläche wirkenden Kräfte und Momente müssen in den Aufbau geleitet werden. Hierbei sind für Längskräfte der Lenkrollradius und der Störkraftthebelarm, für Querkkräfte der Nachlauf und für Vertikalkräfte der Hochkraftthebelarm entscheidende Kenngrößen, die in ihren Auswirkungen u. a. aufgrund der Neigung der Lenkachse eine Wechselwirkung haben.

Aus Gründen des *Fahrkomforts* ist ausreichender vertikaler Federweg, möglichst verbunden mit einer horizontalen Bewegungsrichtung des Rades weg von einer Fahrbahnunebenheit (Schrägfederung), sicherzustellen. Ferner soll die Radaufhängung zur Minderung der Abrollhärte der Reifen und kurzhubiger Fahrbahnanregungen in Längsrichtung elastisch sein (elastokinematische Längsfederung, Bild 1.1), ohne jedoch durch diese Nachgiebigkeit den definierten Aufbau von Radseitenkräften und damit die Lenkpräzision, die eine möglichst steife Radaufhängung erzwingen, zu beeinträchtigen oder bei Längskräften aus Antriebs- oder Bremsvorgängen störende Radbewegungen zu verursachen.

Zum Erzielen eines optimalen *Fahrverhaltens* des Fahrzeuges im stationären wie im instationären Bereich müssen die Räder zur Generierung erforderlicher Seitenkräfte eine definierte Radstellung zur Fahrbahn haben. Aufbau und Größe der Radseitenkräfte werden durch gezielte Vorspur- und Sturzveränderungen der Räder in Abhängigkeit von Einfederung und Karosseriebewegung über die Achskinematik (Rollsteuern) und die wirkenden Kräfte (Elastizitätssteuern) vorgegeben. Hierdurch können spezifische Betriebsbedingungen – wie Beladungs- und Traktionszustand – berücksichtigt werden. Ferner ist durch entsprechende Festlegung von Geometrie und Kinematik der Achse das unerwünschte Eintauchen bzw. Ausheben des Aufbaus beim

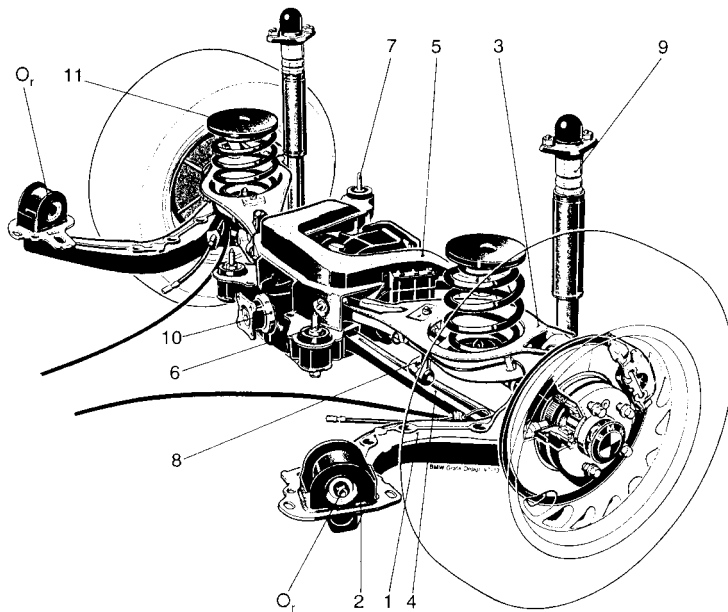


Bild 1.1 *Mehrlenker-Hinterachse*; eine Art Doppelquerlenker-Radaufhängung, die die Schräglenkerachse immer mehr verdrängt und – je Seite – aus mindestens einem Längslenker besteht, der von zwei (bzw. auch drei) Querlenkern geführt wird (Bilder 1.62 und 1.77). Der Längslenker dient gleichzeitig als Radträger und läßt (bei Allradlenkung) die zum Einschlagen der Hinterräder benötigten geringfügigen Winkelbewegungen zu; die Hauptvorteile sind jedoch die günstigen kinematischen und elastokinematischen Eigenschaften (s. hierzu Abschnitt 5.3.6 in [2]; Integrallenkerachse).

BMW nennt die im Bild dargestellte und in die 3er-Reihe (1997) eingebaute Ausführung «Zentralenkerachse». Die Längslenker 1 bestehen aus der Gußeisensorte GGG 40; sie nehmen alle Längskräfte und Bremsmomente auf und geben sie über die Punkte 2 – deren Mitten gleichzeitig die *Nickpole* O_r bilden (Bilder 3.159 und 3.158) – an den Fahrschemel 5 weiter; dieser ist mit vier Gummilagern (Pos. 6 und 7) am Aufbau befestigt. Die am Radaufstandspunkt entstehenden Seitenkräfte stützen sich über die Querlenker 3 und 4 am Fahrschemel 5 ab. Die oberen nehmen gleichzeitig die Minibloçfedern 11 und die Gelenke des Stabilisators 8 auf; dort wird somit der Hauptanteil der Hochkräfte zwischen Achse und Aufbau übertragen.

Die Stoßdämpfer, die oben die Zusatzfedern 9 tragen (Bild 5.50), sind günstig *hinter* der Achsmittle an den Enden der Längslenker befestigt (s. Abschnitt 5.3.2 in [3]). Das Ausgleichsgetriebe 10 ist – aus Geräuschgründen – an drei Punkten elastisch mit dem Fahrschemel 5 verbunden (vorne mit zwei Gummilagern, hinten mit einem Hydrolager).

Die Querlenker liegen (in der Drauf- und Rückansicht) schräg, um – zusammen mit den unterschiedlichen Gummihärten der Lager in den Punkten 2 – die gewünschten elastokinematischen Eigenschaften zu erreichen. Diese sind:

- Vorspur unter Bremskräften (Bilder 3.64 und 3.82),
- Seitenkraftuntersteuern bei Kurvenfahrt (Bilder 3.79 und 3.80),
- Verhindern von Lastwechselreaktionen (s. Abschnitt 2.10.4) sowie
- Spurwechsel- und Geradeauslaufstabilität.

Aus Platzgründen werden die vorderen Augen 2 von oben an die Teile 1 geschraubt; zusätzlich sind Langlöcher vorgesehen, um die Vorspur einstellen zu können.

Bei der Modellreihe E46 (ab 1998) wird aus Gewichtsgründen (Verringerung der ungefederten Massen) der obere Querlenker aus Aluminium hergestellt.

Bremsen bzw. Anfahren zu verhindern und sicherzustellen, daß das Fahrzeug keine Übersteuertendenz zeigt sowie ein für den Fahrer vorhersehbares Übergangsverhalten hat.

Weitere Anforderungen sind

- ❑ die voneinander unabhängigen Bewegungen der Räder einer Achse (bei Starrachsen nicht gewährleistet),
- ❑ geringe ungefederte Massen der Radaufhängung, um die dynamischen Radlastschwankungen so gering wie möglich zu halten (wichtig für die Fahrsicherheit),
- ❑ die kraftflußgünstige Einleitung der Radkräfte in den Aufbau,
- ❑ der erforderliche Bauraum und Bauaufwand unter Berücksichtigung erforderlicher geometrischer und festigkeits- und nachgiebigkeitsmäßiger Toleranzen,
- ❑ die Reparaturfreundlichkeit,
- ❑ das Verhalten unter den Aspekten der passiven Sicherheit für Insassen und andere Verkehrsteilnehmer und
- ❑ die Kosten.

Anforderungen an die Lenkbarkeit einer Achse und die Möglichkeit, Antriebsmomente zu übertragen, bestimmen wesentlich die Achskonstruktionen.

Radaufhängungen werden unterschieden in Starrachsen (mit einer starren Verbindung der Räder einer Achse), Einzelradaufhängungen, bei denen die Räder unabhängig voneinander aufgehängt sind und Verbundlenkerachsen, einer Achsform, die Merkmale der Starrachsen und der Einzelradaufhängungen aufweist.

Bei allen *Starrachsen* (Bild 1.23) bewegt sich der Achskörper über den ganzen Federweg mit; der Platz, der hierfür nach oben zur Verfügung gestellt werden muß, verkleinert hinten den Kofferraum und erschwert außerdem die Unterbringung des Reserverads. Vorn würde sich der Achskörper unter dem Motor befinden; um einen noch ausreichenden Einfederweg zu bekommen, ist ein Anheben des Motors oder ein Verschieben nach hinten unumgänglich. Aus diesem Grund sind starre Vorderachsen nur an Nkw und allradangetriebenen Mehrzweck-Pkw zu finden (Bilder 1.3 und 1.4).

Zu den nachfolgend aufgelisteten *Einzelradaufhängungen* ist zu bemerken, daß mit größerer Anzahl an Radführungselementen (Lenkern) mit der entsprechenden Zunahme an Lenkerebenen die konstruktiven Gestaltungsmöglichkeiten zur Erfüllung o.g. Anforderungen und einer kraftflußgerechten Konstruktion anwachsen. Im Einzelnen gehören zu Einzelradaufhängungen

- ❑ Längs- und Schräglenkerachsen (McPherson-Federbein), Bilder 1.13 und 1.15, die in der Höhe kaum Platz beanspruchen und dadurch einen breiten Kofferraum mit ebenem Boden zulassen, allerdings eine erhebliche Schrägfederung haben können,
- ❑ radführende Feder- und Dämpferbeine (Bilder 1.8 und 1.57), die zwar eine große Bauhöhe haben, jedoch seitlich – also fahrzeugmittig – wenig Raum benötigen (nutzbar für den Motor oder den Achsantrieb) und den Lenkeinschlag auch ermöglichen,
- ❑ Doppelquerlenker-Radaufhängungen (Bild 1.7) und

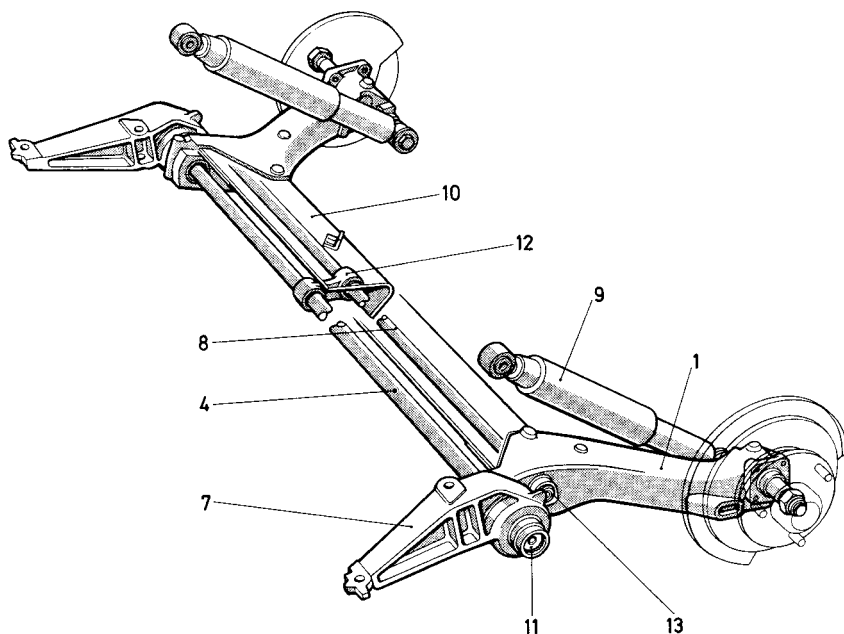


Bild 1.2 Äußerst wenig Raum beanspruchende Vierstab-Verbundlenkerachse von Renault mit zwei Drehstäben sowohl für die linke Achsseite (Pos. 4 und 8) als auch für die rechte. Das V-Profil des Querträgers 10 hat unterschiedlich lange Schenkel, ist biegesteif, jedoch torsionsweich und nimmt sämtliche durch Hoch-, Seiten- und Bremskräfte entstehenden Momente auf; es ersetzt außerdem teilweise den Stabilisator.

Die hinteren Stäbe 8 sind mit 23,4 mm dicker als die vorderen ($\varnothing 20,8$ mm, Pos. 4); außen greift Teil 8 mit dem Kerbzahnprofil 13 in die Längslenker 1 und innen in das Koppelstück 12. Beim Durchfedern der Räder ergibt sich ein reines Drehmoment im Teil 12, das dieses zu den vorderen Stäben 4 weiterleitet und sie damit auch auf Torsion beansprucht. Außen greifen (wie auch in Bild 1.63 zu sehen) die Stäbe mit dem Kerbzahnprofil 11 in die Tragarme 7, von denen zugleich die Längslenker drehbeweglich aufgenommen werden. Die Drehpunkte stellen gleichzeitig ein günstig liegendes Nickzentrum O_r dar (Bild 3.159); mit nur vier Schrauben werden die Tragarme (und damit die ganze Achse) an der Bodengruppe befestigt.

Bei «gleichseitiger» Federung arbeiten alle vier Stäbe, bei «wechselseitiger» dagegen bleibt das Koppelstück 12 in Ruhe, und nur die dicken hinteren Stäbe 8 und der Querträger 10 werden auf Torsion beansprucht.

Durch die Stabanordnung läßt sich somit eine weiche Aufbaufederung erreichen und außerdem eine hohe Wankstabilität, also eine Verringerung der Aufbauneigung bei Kurvenfahrt.

Um einen breiten Kofferraum ohne seitliche Dome zu bekommen, sind die druckbelasteten Einrohrdämpfer 9 schrägliegend angeordnet und können dadurch die Kräfte oben an die Längsträger der Bodengruppe weitergeben.

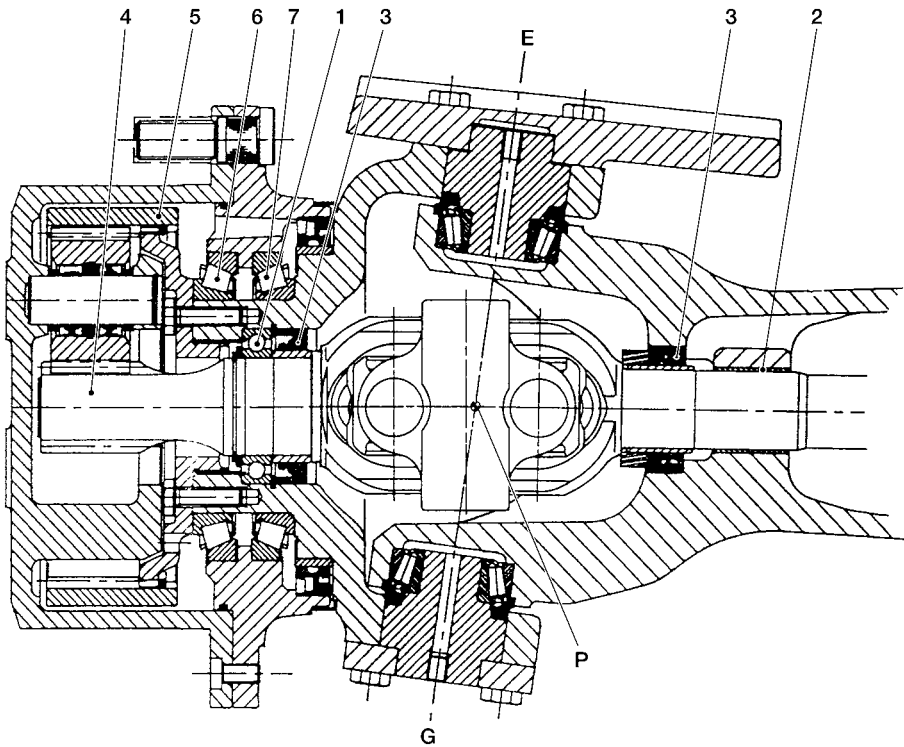


Bild 1.3 Angetriebene, starre Lenkachse mit Doppelgelenk der Firma GKN – Bierfield AG für allradgetriebene Sonderfahrzeuge, Traktoren und Baumaschinen.

Die Zentrierung des Doppelgelenks erfolgt über die Lager 1 und 2 im Bereich der Gabelmitnehmer; diese sind durch die Radialwellendichtringe 3 vor Verschmutzung geschützt. Lager 1 dient als Festlager, Lager 2 als Loslager. Die Antriebswelle 4 ist zugleich Sonnenrad für das Planetengetriebe mit dem Hohlrad 5. Hoch-, Seiten- und Längskräfte werden durch die beiden Kegelrollenlager 6 und 7 übertragen. Gelenkt wird um die Lenkachse EG.

- Mehrlenker-Achsen (Bilder 1.1, 1.18, 1.19), die bis zu fünf Führungslenker pro Rad haben können und den größten Gestaltungsspielraum bezüglich der geometrischen Festlegung von Lenkrollradius, Störkrafthebelarm, Hochkrafthebelarm, dem kinematischen Verhalten im Hinblick auf Vorspur-, Sturz-, Spurweitenänderungen und Brems-/Anfahrnickverhalten sowie der elastokinematischen Eigenschaften bieten.

Bei den *Verbundlenkerachsen* (Bilder 1.2, 1.31 und 1.58) sind die beiden Radseiten über einen biegestarren, jedoch torsionsnachgiebigen Lenker miteinander verbunden. Diese Achsen sind insgesamt sehr raumsparend und kostengünstig, haben jedoch aufgrund der Funktionsüberlagerungen in den Bauteilen ein begrenztes kinematisches und elastokinematisches Abstimmungspotential und erfordern hinreichenden Freiraum im Bereich des Verbindungslenkers. Sie kommen überwiegend bei frontange-

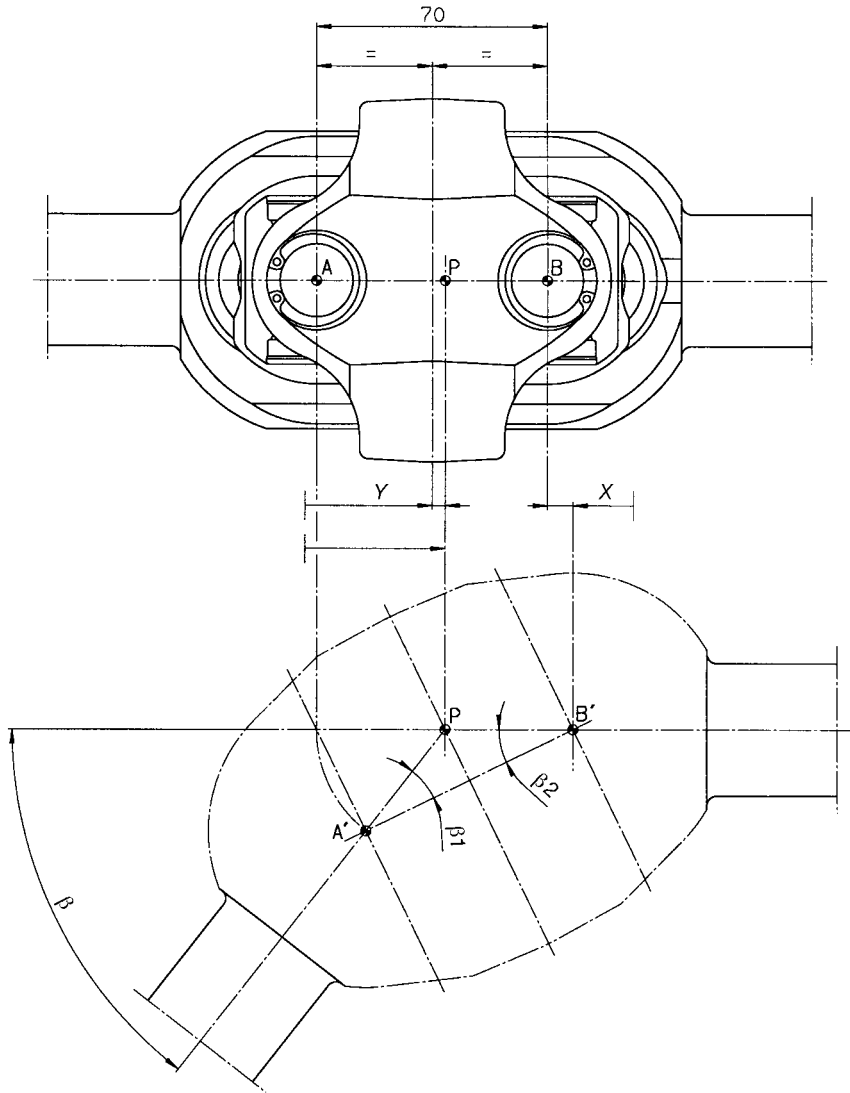


Bild 1.4 Draufsicht des Doppelgelenks (Bild 1.3). Beim Lenken wird der Radkopf der Achse um den Punkt P der Lenkzapfenmitte geschwenkt. Hierbei werden die Einzelgelenke in den Punkten A und B gebeugt, so daß der Punkt A auf die Position A', P auf P' und B längs der Antriebsachse um die Strecke X auf B' verschoben werden. Um die aus der Längsverschiebung des Punktes B folgenden unterschiedlich großen Beugewinkel β anzugleichen, wird der Gelenkmittelpunkt P um die Strecke Y versetzt. Der Korrekturwert Y ist abhängig vom Abstand der Gelenke und dem Lenkwinkel, bei dem Gleichlauf bestehen soll. Bei großen erreichbaren Lenkeinschlägen (bis zu 60°) muß bei maximalem Lenkwinkel Gleichlauf gegeben sein.

Korrekturwert Y und Längsverschiebung X müssen bei der Achskonstruktion berücksichtigt werden.

triebenen Fahrzeugen als hintere Radaufhängung bis zur Mittelklasse, vereinzelt auch oberen Mittelklasse, Beispiel Audi A6 bis 2003, und einigen Großraum-Pkw zur Anwendung.

1.2 Einzelradaufhängungen, allgemein

1.2.1 Anforderungen

Das Fahrwerk eines Pkw soll schneller als der Motor sein. Immer besser werdende Beschleunigungen, höhere Spitzen- und Kurvengeschwindigkeiten und Verzögerungen führen zu stark zunehmenden Anforderungen an sichere Fahrwerke. Eine Hilfe hierbei sind Einzelradaufhängungen mit ihren Hauptvorteilen:

- ❑ geringer Raumbedarf,
- ❑ Möglichkeit einer kinematischen und/oder elastokinematischen Vorspuränderung in Richtung Untersteuern (s. Abschnitt 3.6),
- ❑ leichtere Lenkbarkeit bei vorhandenem Antrieb,
- ❑ geringes Gewicht und
- ❑ keine Beeinflussung der Räder untereinander.

Die beiden letztgenannten Eigenschaften sind für gute Bodenhaftung – ganz besonders in Kurven mit unebener Fahrbahn – wichtig.

Quer- und Längslenker sorgen für das gewünschte kinematische Verhalten der aus- und einfedernden Räder und übernehmen die Weitergabe der Kräfte zum Aufbau (Bild 1.5). Seitenkräfte ergeben zusätzlich ein Moment, das bei ungünstiger Lenkeranordnung – als *Nachteil* – die Wankneigung des Aufbaus in der Kurve verstärkt. Die Lenker benötigen Lagerungen, die unter Belastung nachgeben und außerdem die Federung beeinflussen können: Entweder verhärtet sich diese durch das Verdrehen der Gummi-

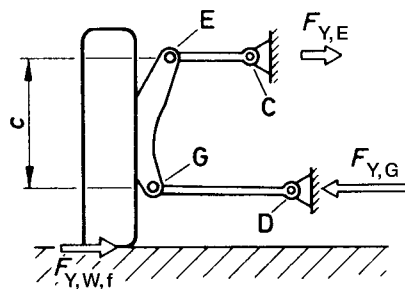


Bild 1.5 Bei vorderen Einzelradaufhängungen bewirkt die Kurvenseitenkraft $F_{Y,W,f}$ die Reaktionskräfte $F_{Y,E}$ und $F_{Y,G}$ in den die Achse mit dem Aufbau verbindenden Lenkern. Sowohl kurvenaußen als auch -innen entstehen dadurch Momente, die die Wankneigung des Aufbaus in nachteiliger Weise unterstützen. Unabhängig hiervon sollte der Wirkabstand c der Punkte E und G bei einer Doppelquerlenker-Radaufhängung so groß wie möglich sein, um kleine Kräfte in Aufbau und Lenkerlagerungen zu bekommen und die Verformung der eingebauten Gummielemente dadurch in Grenzen zu halten. Die Berechnung der «Kräfte» enthält Abschnitt 7.1 in [3].

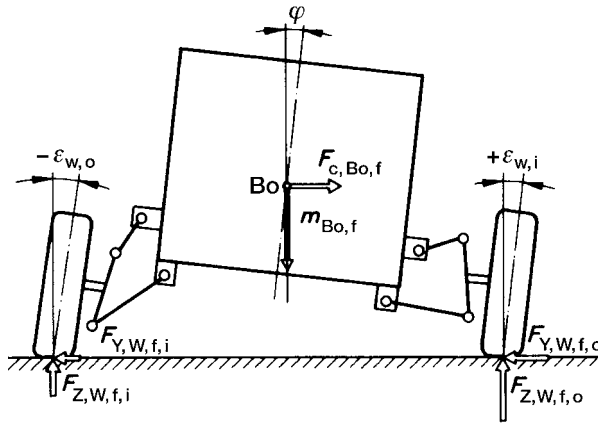


Bild 1.6 Wenn sich der Aufbau in der Kurve um den Winkel φ neigt, geht das äußere, einzeln aufgehängene Rad in positiven Sturz $+\varepsilon_{w,o}$ und das innere in negativen $-\varepsilon_{w,i}$. Die Möglichkeit der Reifen, die Seitenkräfte $F_{Y,W,f,i}$ bzw. $F_{Y,W,f,o}$ zu übertragen, läßt nach mit der Folge größerer erforderlicher Schräglaufwinkel (Bild 3.53 und Gleichung 2.16). $m_{Bo,f}$ ist der Gewichtsanteil des Aufbaus über der Vorderachse und $F_{c,Bo,f}$ die in Höhe des Schwerpunktes Bo angreifende Fliehkraft. Ein Rad federt aus und das andere ein, d.h., es handelt sich um eine «wechselseitige Federung», und es ist:

$$F_{Z,W,f,o} = F_{Z,W,f} + \Delta F_{Z,W,f} \quad F_{Z,W,f,i} = F_{Z,W,f} - \Delta F_{Z,W,f}$$

teile in den Lagerelementen, oder aber die «Reibung» wird durch sich gegeneinander verschiebende Teile größer (Bild 1.11), und der «Abrollkomfort» läßt nach.

Die Räder neigen sich mit dem Aufbau (Bild 1.6); das kurvenäußere Rad, das den höheren Seitenkraftanteil übernehmen muß, geht in positiven Sturz und das innere in negativen: Die Seitenführungseigenschaften der Reifen lassen nach. Um das zu vermeiden, sollte die kinematische Sturzänderung diesem Verhalten angepaßt sein (s. Abschnitt 3.5.4) und außerdem die Wankneigung des Aufbaus in der Kurve so klein wie möglich gehalten werden. Erreichen läßt sich dies mit einer härteren Federung, zusätzlichen Stabilisatoren oder hochliegenden Wankzentren (s. Abschnitte 3.4.3 und 5.4.3).

1.2.2 Doppelquerlenker-Radaufhängungen

Ganz besonders die letztgenannten Eigenschaften lassen sich mit einer Doppelquerlenker-Radaufhängung am ehesten erreichen (Bild 1.7). Diese besteht aus zwei Querlenkern je Fahrzeugseite, die am Rahmen, Fahrschemel oder Aufbau drehbar gelagert und – falls es sich um eine Vorderachse handelt – außen über Kugelgelenke mit den Radträgern bzw. Schwenklagern verbunden sind. Je größer der Wirkabstand c zwischen den Querlenkern sein kann (Bild 1.5), um so kleiner werden die Kräfte in den Lenkern und deren Lagerungen, d.h., um so geringer ist die Verformung aller Bauteile und um so exakter die Radführung.

Die Hauptvorteile der Doppelquerlenker-Aufhängung sind ihre kinematischen Möglichkeiten; durch die Lage der Lenker zueinander – also die Größe der Winkel α

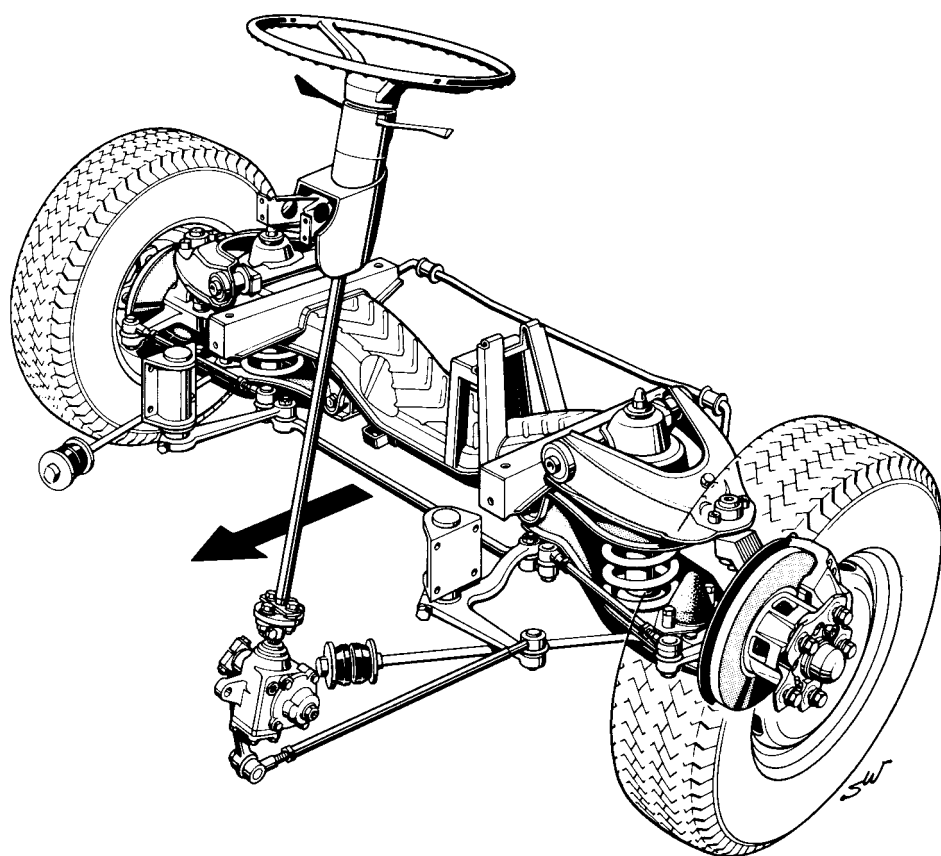


Bild 1.7 Vorderachse des VW-Leicht-Nkw LT 28 bis 35 mit gegenläufigem Lenkviereck. Ein Querträger dient als Fahrstachel und ist von unten an den Rahmen geschraubt. An diesem «Kraftzentrum» stützen sich Federn, Anschläge, Stoßdämpfer und beide Lenkerpaare ab. Lediglich Stabilisator, Lenkgetriebe, Lenkzwischenhebel und Zugstreben der unteren Lenker sind an den Rahmenlängsträgern befestigt. Die Streben tragen vorn längselastische Gummilager, die die Abrollhärte der Gürtelreifen und kurzhubige Fahrbahnregungen mindern.

und β (Bild 3.24) – kann sowohl die Höhe des *Wankzentrums* als auch die des Nickpols bestimmt werden (Winkel α und β , Bild 3.150). Hinzu kommt, daß sich durch unterschiedliche Lenkerlängen die Winkelbewegungen der aus- und einfedernden Räder beeinflussen lassen, d.h. die Sturzänderung und (in Grenzen) unabhängig davon auch die Spurweitenänderung (Bilder 3.50 und 3.7). Bei kürzeren oberen Lenkern gehen die einfedernden Räder in negativen Sturz und die ausfedernden in positiven; dadurch läßt sich der durch die Wankneigung des Aufbaus hervorgerufene Sturzänderung entgegenwirken (Bild 1.6). Der in Bild 6.16 eingezeichnete Nickpol O befindet sich an der Vorderachse hinter den Rädern und liegt dementsprechend an der Hinter-

achse davor. Kann O_r über der Radmitte angeordnet sein (Bild 3.161), ergibt sich nicht nur eine günstigere Bremsnickabstützung, sondern auch eine Verringerung des Anfahrreinsinkens bei angetriebenen Hinterachsen (bzw. des -anhebens vorn). Das sind auch die Gründe, warum die Doppelquerlenker-Radaufhängung – unabhängig von der Antriebsart – als Hinterachse an immer mehr Pkw zu finden ist und die Schräglenkerachse ersetzt (Bilder 1.1, 1.62 und 1.77).

1.2.3 Radführende Feder- und Dämpferbeine

Das radführende Federbein stellt eine Weiterentwicklung der Doppelquerlenker-Radaufhängung dar. Den oberen Lenker ersetzt ein Anlenkpunkt am Kotflügel-Innenblech, der das Ende der Kolbenstange und die Schraubenfeder aufnimmt. An diesem Punkt stützen sich Kräfte in allen Richtungen ab, die ihrerseits eine Biegebeanspruchung in der Kolbenstange verursachen. Um nachteilige elastische Sturz- und Nachlaufänderungen zu vermeiden, muß der Stangendurchmesser von 11 mm (im Stoßdämpfer) auf mindestens 18 mm heraufgesetzt werden; bei gleichbleibendem Kolbendurchmesser arbeitet die Dämpfung nach dem «Zweirohrsystem» – und zwar drucklos oder druckbelastet (s. Abschnitt 5.8).

Der *Hauptvorteil* des radführenden Federbeins ist, daß alle die Federungsarbeit und Radführung übernehmenden Teile in einer Baueinheit zusammengefaßt werden können. Wie in Bild 1.8 zu sehen, handelt es sich hierbei um

- den Teller 3 zur Aufnahme der Schraubenfederunterseite,
- die Zusatzfeder 11 oder einen Druckanschlag (s. hierzu Bild 5.49),
- den Zuganschlag (Bild 5.54),
- den Pendelstabilisator (7) über das Gestänge 5 und
- den Radträger.

Dieser kann durch Schweißen oder Hartlöten fest mit dem Außenrohr verbunden (Bild 5.53) oder angeschraubt sein (Bild 1.56). Die weiteren Vorteile sind:

- geringere Kräfte in den aufbauseitigen Befestigungsstellen E und D durch einen großen Wirkabstand c (Bild 1.5),
- eine nur kleine Entfernung b zwischen den Punkten G und W (Bild 3.30),
- lange Federwege,
- der Entfall von drei Lagerstellen,
- bessere Gestaltungsmöglichkeit der vorderen Knautschzone,
- seitlich viel Platz und dadurch einen breiten Motorraum ermöglichend, in den sich
- Quermotoren günstig einbauen lassen (Bild 1.50).

Konstruktive Maßnahmen haben inzwischen dafür gesorgt, daß die den Vorteilen gegenüberstehenden, unvermeidbaren *Nachteile* an der Vorderachse nicht mehr so stark in Erscheinung treten:

- ungünstigere kinematische Eigenschaften (Abschnitte 3.3 und 3.5.2),
- Einleitung der Kräfte und Schwingungen in die Kotflügelinnenbleche und damit in einen relativ elastischen Bereich des Vorderwagens,

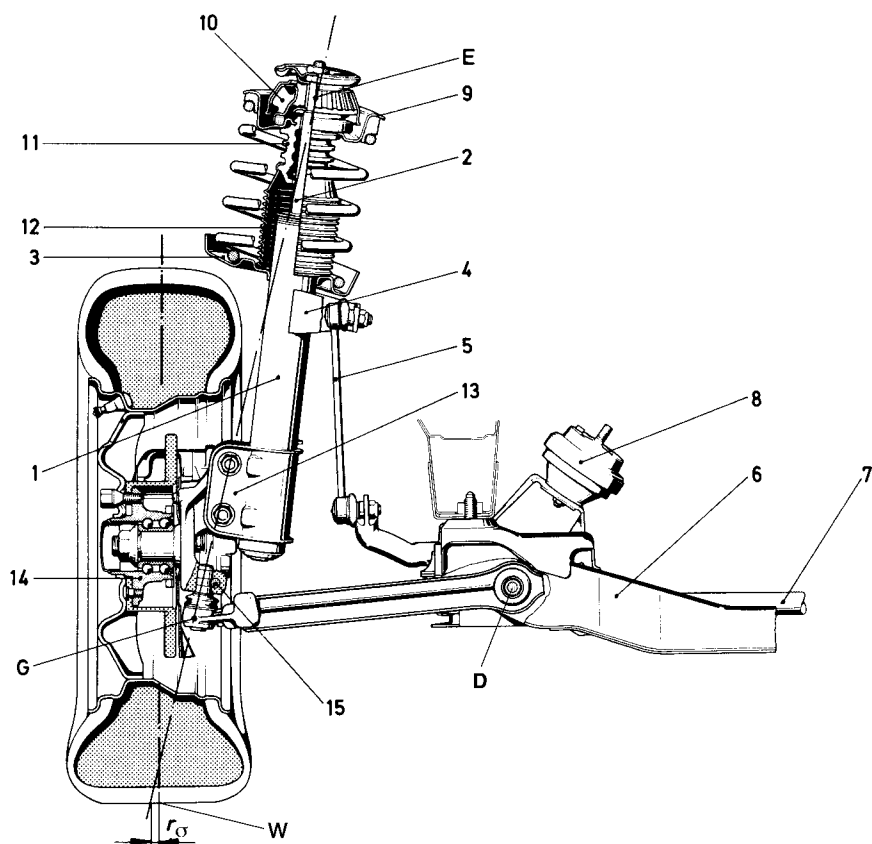


Bild 1.8 Ansicht von hinten auf die linke Seite der Federbein-Vorderachse des Opel Omega (1999) mit negativem Lenkrollhalbmesser r_σ und Pendelstabilisator; die Schraubenfeder ist zur Federbeinachse versetzt, um die Reibung zwischen Kolbenstange 2 und Führung zu vermindern. Im Punkt E sind das Teil 2 und der obere Federteller 9 über das entkoppelte Stützlager 10 am Kotflügelinnenblech befestigt.

Die Zusatzfeder 11 aus Elastomer wird von innen in den Teller 9 geknüpft; an der Unterseite trägt sie die Schutzmanschette 12, die am Federteller 3 anliegt und die verchromte Stange 2 schützt. Beim Einfedern des Rades stützt die Zusatzfeder sich an der Verschlusskappe des Tragrohrs 1 ab. Mit dem Teil 1 sind der Halter 4 verschweißt – an dem das obere Kugelgelenk des Stabilisatorgestänges 5 von innen befestigt ist – und der Bügel 13; dieser nimmt zwischen den U-förmig gebogenen Schenkeln den Radträger auf.

Die obere Bohrung des Bügels wurde als Langloch ausgebildet, um den Sturz werkseitig genau einstellen zu können (s. hierzu Bild 3.102). Die Radführung übernimmt ein zweireihiges Schrägkugellager der zweiten Generation (Pos. 14).

Der Kugelzapfen des Führungsgelenkes G wird durch Klemmen mit dem Radträger verbunden. Die quersitzende Schraube 15 greift dabei in eine Ringnut des Zapfens und verhindert das Herausrutschen im Falle eines unvorhergesehenen Nachlassens des Schrauben-Anzugsmomentes.

Zur Befestigung am Aufbau dient der Hilfsrahmen 6, der außer den Querlenkern auch die (in [5], Abschnitt 10.4, näher beschriebenen) Motorlager 8 und den Rücken des Stabilisators 7 aufnimmt. Die Tiefbettfelge ist unsymmetrisch, um Platz für den (nicht dargestellten) Bremsattel und damit eine größere «Bremscheibe» zu bekommen (Bilder 2.10, 2.11 und 2.23).

- ❑ schwierigere Isolation der Fahrbahngeräusche – ein Stützlager ist erforderlich (Bild 1.9), das möglichst entkoppelt sein sollte (Bild 1.10 sowie Pos. 10 in Bild 1.8 und Pos. 6 in Bild 1.56),
- ❑ die die Federungswirkung verschlechternde Reibung zwischen Kolbenstange und -führung, die durch Verkürzen der Strecke b verringert werden kann (Bilder 1.11 und 3.30),
- ❑ bei obenliegender Zahnstangenlenkung lange Spurstangen und damit aufwendigere Lenkanlage (Bilder 1.57 und 4.1); hinzu kommt eine ungünstige Einleitung der Spurstangenkräfte in Mitte des Federbeins (s. Abschnitt 4.2.4), verbunden mit einer zusätzlichen Lenkelastizität,
- ❑ größere Empfindlichkeit der Vorderachse gegen Reifenunwucht und -rundlaufabweichungen (s. Abschnitt 2.5 sowie [1] und [4]),
- ❑ großer Bauraumbedarf in die Höhe und
- ❑ der manchmal nur geringe Platz zwischen Reifen und Dämpfungsteil (Bild 1.41).

Dieser ist jedoch nur bei Vorderradantrieb von Bedeutung, weil sich keine *Schneeketten* mehr aufziehen lassen. Bei nicht angetriebenen Rädern verbietet der fehlende

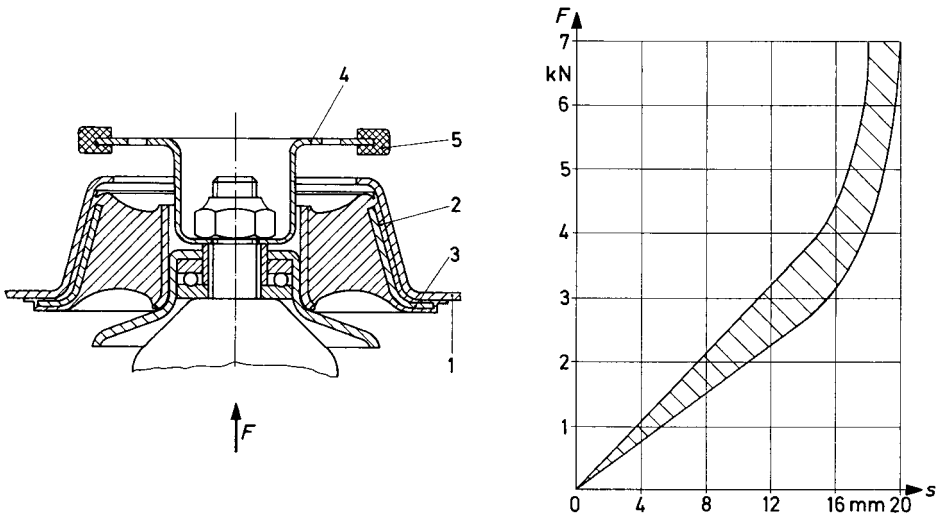
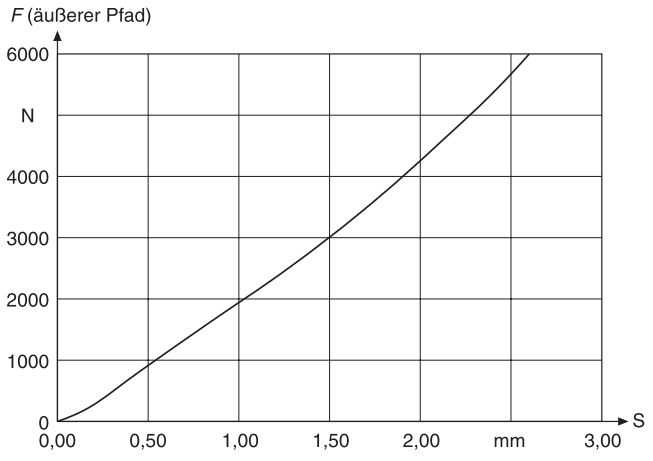
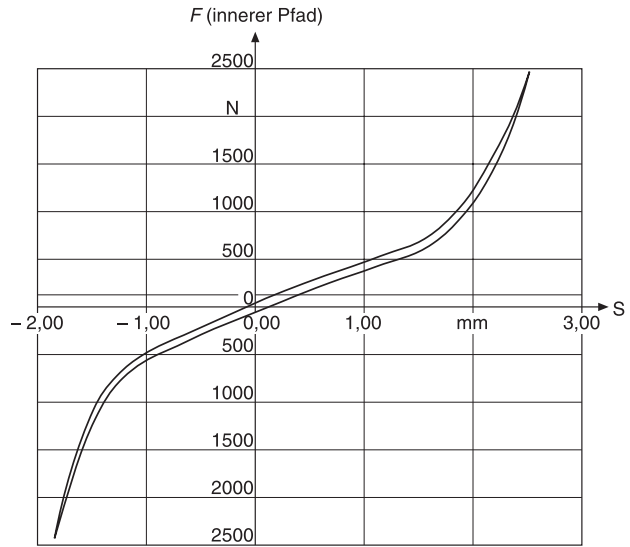
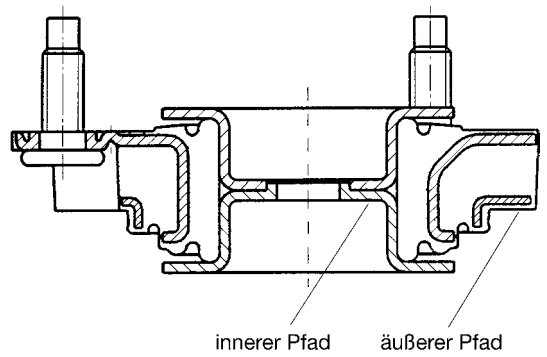


Bild 1.9 Federbein-Stützlager des VW Golf III mit Axialkugellager, das die Drehbewegung des Federbeins aufnimmt; das Gummitteil dient zur Geräuschisolation. Die Einfederungskurve bleibt anfänglich linear und wird im Hauptarbeitsbereich – zwischen 3 kN und 4 kN – stark progressiv; eingezeichnet ist der Streubereich. Feder- und Dämpferkräfte werden gemeinsam aufgenommen; das Stützlager ist also nicht «entkoppelt» (wie in Bild 1.10 zu sehen).

Am Hauptmontageband wird das vollständige Stützlager in eine kegelige Bohrung des Kotflügelinnenblechs 1 gedrückt. Die außen am Lager sitzende Gummischicht 2 sorgt für einen festen Sitz und der Rand 3 für den erforderlichen Halt in Hochrichtung. Der auf den Teller 4 geklemmte Gummiring 5 kommt beim völligen Ausfedern des Rades am Blech 1 zur Anlage und stellt dadurch die erforderliche Sicherung her (Werkbild Fa. Lemförder Fahrwerktechnik AG).

Bild 1.10
 Zwei-Pfad-(«Dual Path»)-
 Federbein-Stützlager des Ford
 Focus (1998), hergestellt von
 der Fa. ContiTech Formteile
 GmbH. Die Kräfte von Auf-
 baufeder und Dämpfer werden
 über zwei unterschiedlich steife
 «Pfade» in den Aufbau einge-
 leitet. Hierdurch ist es möglich,
 das Dämpferlager (innerer
 Pfad) im Bereich kleiner Amplitu-
 den mit geringer Steifigkeit
 auszuführen und so eine gute
 Isolierung von Schwingungen
 und Geräuschen zu erreichen
 sowie das Rollverhalten des
 Aufbaus zu verbessern. Bei
 größeren Kräften ab ca. 700 N
 kommen Progressionsnocken
 zur Anlage, die zu einer Ver-
 steifung des Lagers führen. Aus
 Komfortgründen ist der konti-
 nuierliche Übergang zwischen
 beiden Steifigkeiten wichtig.
 In Querrichtung muß das Lager
 eine hohe Steifigkeit haben, da-
 mit es zu keinen unerwünschten
 Verschiebungen und damit
 Radstellungsänderungen
 kommt. Die Kräfte der Aufbau-
 feder werden über den äußeren
 Pfad geführt, der eine wesent-
 lich höhere Steifigkeit aufweist.



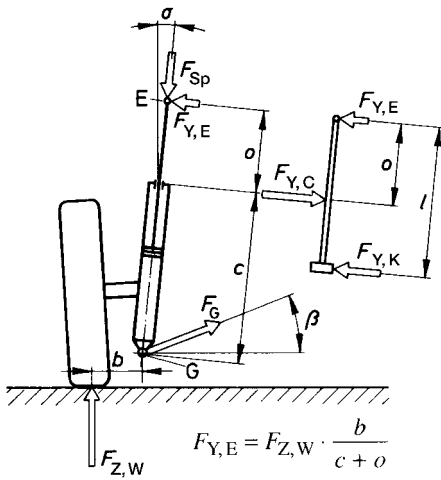


Bild 1.11

Hat die Kraft $F_{Z,W}$ einen Hebelarm b um das Führungsgelenk G , wirkt – hervorgerufen durch die Kraft F_{Sp} – im aufbauseitigen Befestigungspunkt E des Federbeins dauernd die Querkraft $F_{Y,E}$. Diese ruft die Reaktionskräfte $F_{Y,C}$ und $F_{Y,K}$ an Kolbenstangenführung und Kolben hervor. Es ist

$$F_{Y,C} = F_{Y,E} + F_{Y,K}$$

und je größer diese Kraft wird, um so weiter geht die Reibkraft F_{fr} in der Kolbenstangenführung hinauf und dementsprechend höher muß die zum Losreißen erforderliche Hochkraftänderung sein.

Der Kolben hat einen größeren Durchmesser und gleitet außerdem in Öl; hier spielt also die Querkraft $F_{Y,K}$ nur eine untergeordnete Rolle (zu sehen in Bild 5.54). Durch einen Winkelversatz der Feder und Verkürzen der Strecke b läßt sich $F_{Y,C}$ verringern (s. Bilder 1.56 und 3.30 sowie Gleichung 3.4 a).

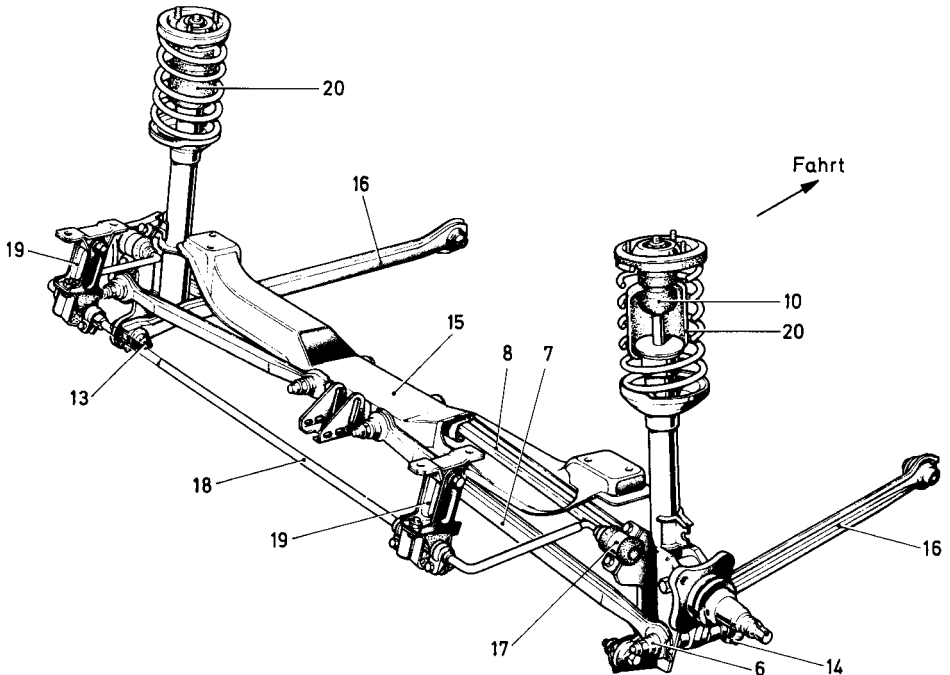


Bild 1.12 Federbein-Hinterachse des Lancia Delta mit gleich langen, weit innen am Querträger 15 befestigten und aus Blechprofil bestehenden Querstreben 7, 8; erforderlich für einwandfreien Geradeauslauf ist ein möglichst großer Abstand der Punkte 6 und 14 am Radträger. Die Befestigungsstellen 13 der Längsstreben 16 liegen hinter den Radmitten, genau wie die Anlenkpunkte 17 des Stabilisators 18. Der Rücken dieses Teils ist über die Laschen 19 gelenkig mit dem Aufbau verbunden. Die Zusatzfedern 10 kommen oben auf den Dämpferbeinen zur Anlage und werden durch das Schutzrohr 20 abgedeckt. Mit Hilfe des Querträgers 15 erfolgt die Befestigung der Baugruppe am Aufbau. Wichtiges Dimensionierungskriterium des Lenkers 16 ist die Rückwärtsfahrt gegen ein Hindernis.

Platz höchstens die Montage breiterer Reifen. Sind diese unbedingt notwendig, werden Scheibenräder mit kleinerer Einpreßtiefe e erforderlich, die dann in nachteiliger Weise einen größeren positiven bzw. kleineren negativen Lenkrollhalbmesser r_o zur Folge haben (Bilder 2.8 und 3.102).

Im Laufe der letzten Jahre haben sich die radführenden Feder- und Dämpferbeine als Vorderachse durchgesetzt; aber auch als hintere Radaufhängung werden sie bei Fronttrieblern eingebaut (z.B. Ford Mondeo Sedan). Das aus aerodynamischen Gründen hochgezogene Fahrzeugheck läßt eine größere Führungslänge zwischen Kolbenstangenführung und Kolben zu. An der *Hinterachse* (Bild 1.12)

- ❑ entfällt oben das Stützlager, da keine Lenkbewegungen gegeben sind,
- ❑ können längere, fast bis zur Fahrzeugmitte reichende Querstreben Verwendung finden, die eine günstigere Sturz- und Spurweitenänderung (Bilder 3.15 und 3.48) und außerdem ein bei Beladung weniger absinkendes Wankzentrum (Bild 3.30) bewirken,
- ❑ lassen sich die äußeren Punkte der Streben weit ins Rad ziehen und damit eine kleinere Strecke b erreichen und
- ❑ kann der Kofferraum tiefergelegt und – bei Dämpferbeinen – verbreitert werden,
- ❑ muß jedoch durch Gummihärte und einen entsprechenden Abstand der Strebenbefestigungspunkte an den Radträgern (Punkte 6 und 14 in Bild 1.12) sichergestellt sein, daß kein ungewolltes elastisches Eigenlenken erfolgen kann (Bilder 3.79 und 3.80).

1.2.4 Längslenker-Hinterachsen

Diese Radaufhängung – auch Kurbelachse genannt – besteht je Fahrzeugseite aus einem in Fahrtrichtung liegenden Längslenker, der drehbar an einem Fahrschemel oder am Aufbau gelagert ist (Bilder 1.13 und 1.63). Der Lenker muß Kräfte in allen Richtungen aufnehmen und wird auf Biegung und Torsion hoch beansprucht (Bild 1.14); hinzu kommt, daß durch Hoch- und Seitenkräfte keine Sturz- und Vorspuränderung eintreten darf.

Die Längslenker-Radaufhängung ist verhältnismäßig einfach und wird bei Fronttrieblern gern verwendet; sie bietet den Vorteil, daß der Karosserieboden glatt durchgezogen und der Kraftstoffbehälter bzw. das Reserverad zwischen den Lenkern angeordnet werden kann. Liegen die Drehachsen parallel zum Boden, so erfahren die ein- und ausfedernden Räder keinerlei Spurweiten-, Sturz- und Vorspuränderung; lediglich der Radstand verkürzt sich geringfügig. Mit der Lenkerlänge läßt sich bei Verwendung von Drehstäben die Progressivität der Federung beeinflussen, also ein günstigeres Schwingungsverhalten bei Beladung erreichen. Die Lenkerdrehpunkte ergeben gleichzeitig die Nickpole O, d. h., beim Bremsen wird das Heck an dieser Stelle heruntergezogen (Bild 3.159).

Nachteilig sind die Übersteuertendenz aufgrund der Längslenkerverformung unter Seitenkraft, das in Bodenhöhe liegende Wankzentrum (Bild 3.33), die äußerst geringen Möglichkeiten kinematischer und elastokinematischer Radstellungsbeeinflussung und die Neigung der Räder bei Kurvenfahrt entsprechend der Aufbauneigung (unerwünschter positiver Sturz kurvenaußen).



Bild 1.13 Längslenker-Hinterachse der Mercedes Benz A-Klasse (1997). Zur Minimierung des Bauraums stützen sich Schraubenfeder und Einrohr-Gasdruck-Stoßdämpfer direkt am Fahrschemel ab. Das Verbindungsrohr ist beanspruchungsgerecht oval gestaltet, um die im Fahrbetrieb auftretenden hohen Biegemomente aus Radlängs- und -seitenkräften aufzunehmen. Der Drehstabilisator greift aus Gewichts- und Montagegründen direkt an der Stoßdämpferbefestigung an. Bei der Ermittlung der Feder-/Dämpfereigenschaften ist die sich mit dem Radhub veränderte Wirklinie der Kräfte zu beachten, da es zu einem unerwünschten degressiven Kraftverlauf beim Einfedern kommen kann. Die beiden vorderen Fahrschemellager sind zum Erreichen eines guten Komfortverhaltens hydraulisch gedämpft (Hydrolager); der Fahrschemel kann geringe elastokinematische Steuerbewegungen ausführen. Bei der Gestaltung der Fahrschemellager muß sichergestellt werden, daß sie ihre definierten Festigkeits- und Geometrieigenschaften auch bei widrigen Einsatzbedingungen (z.B. tiefen Temperaturen) und über eine ausreichend lange Lebensdauer behalten, da Abweichungen vom Auslegungszustand unmittelbar das Fahrverhalten beeinflussen. Die in Kegelrollenlagern geführten Längslenker, die sowohl auf Biegung als auch auf Torsion beansprucht werden, sind als Gelenk-Viereck ausgeführt; hierdurch wird laut Werksangabe der Prinzipnachteil einer Längslenkerachse, die unerwünschte Vorspuränderung infolge Lenkerverformung bei Seitenkraft, um 75 % verringert.

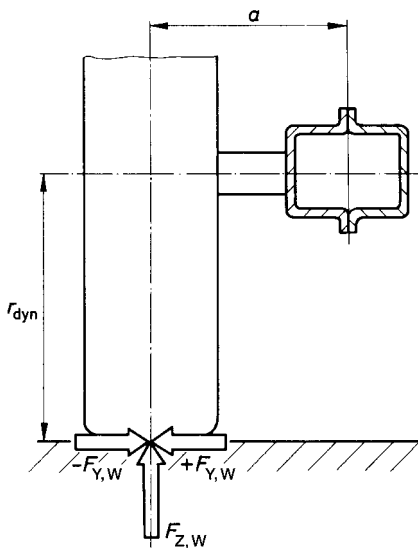


Bild 1.14 An Hinterachs-Längslenkern bewirkt die Hochkraft $F_{Z,W}$ zusammen mit den Seitenkräften $\pm F_{Y,W}$ Beanspruchungen auf Biegung und Torsion; ein entsprechendes (Hohl-)Profil – z. B. Kastenprofil – wird erforderlich. Das größte Torsionsmoment bewirkt eine Seitenkraft von innen (s. Kapitel 4 in [3]):

$$T = F_{Z,W} \cdot a + F_{Y,W} \cdot r_{dyn}$$

1.2.5 Schräglenker-Hinterachsen

Hierbei handelt es sich eigentlich um eine Längslenker-Radaufhängung, die vorwiegend in hinter- und allradangetriebene Pkw eingebaut wird (Bild 1.15), aber auch bei Fronttrieblern zu finden ist (Bild 1.16). Die Lenkerdrehachse EG (Bild 3.36) liegt in der Draufsicht um den Pfeilungswinkel $\alpha = 10^\circ$ bis 25° schräg; hinzu kann in der Rückansicht noch ein Dachwinkel von $\beta \leq 5^\circ$ kommen; Pfeilungs- und Dachwinkel bestimmen die Wanklenkeigenschaften. Beim Ein- und Ausfedern der Räder erfolgt

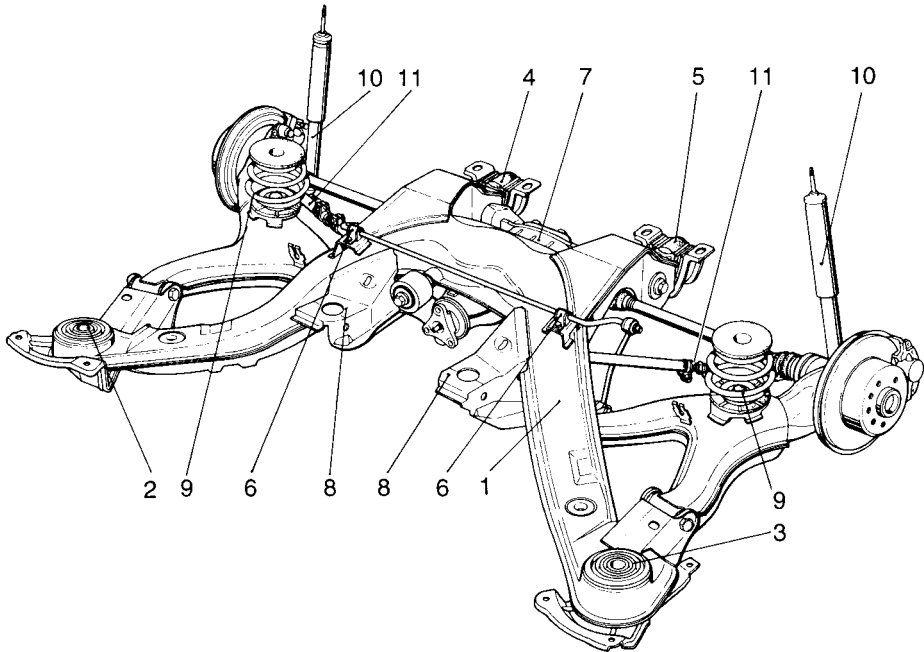


Bild 1.15 Schräg-(Mehr-)lenker-Hinterachse des Opel Omega (1999), eine Weiterentwicklung der Schräglenkerachse. Das Differentialgehäuse des Hinterachsantriebs ist über drei elastische Lager geräuschisoliert mit dem Fahrschemel 1 verbunden und dieser wiederum mit vier speziell ausgebildeten Elastomerlagern am Aufbau (Pos. 2 bis 5). Oben auf dem Teil 1 sitzen die Lager 6 für den Stabilisatorrücken; die beiden Ausleger 8 nehmen die inneren Lager der Schräglenker auf, die die tonnenförmigen Schraubenfedern 9 tragen. Um einen flachen Kofferraumboden zu bekommen, wurden diese vor die Antriebswellen verlegt; die Übersetzung i_{sp} (Rad zu Feder, s. Gleichung 5.17 und Abschnitt 5.3.2 in [3]) wird mit 1,5 dadurch verhältnismäßig groß. Die Stoßdämpfer 10 sitzen hinter der Achsmittle; die Übersetzung ist mit $i_D = 0,86$ günstig.

Der Pfeilungswinkel der Schräglenker beträgt $\alpha = 10^\circ$ (Bild 3.36) und der Dachwinkel $\beta = -1^\circ 35'$. Beide Winkel verändern sich dynamisch unter dem Einfluß der Zusatzlenker 11. Diese stützen die vom Radträger kommenden Seitenkräfte direkt am Fahrschemel 1 ab. Sie erhöhen die Querstabilität des Fahrzeugs und sorgen für ein absolut neutrales Elastizitätslenken unter Seitenkräften und dafür, daß im Fahrbetrieb günstige Vorspuränderungen beim Einfedern, und damit auch unter Beladung, auftreten (Bild 3.20). Die in Abschnitt 2.12 beschriebene Lastwechselreaktion verschwindet – in Zusammenhang mit der Anordnung und Abstimmung der Lager 2 bis 5 – fast völlig.