

---

Ralf Deußen  
Volkert Schlüter  
Walter Essenreiter  
Edgar Schmidt  
Thorsten Blos

# Meisterwissen im Kfz-Handwerk

7. vollständig bearbeitete Auflage



**Weitere Informationen:**

[www.vogel-professional-education.de](http://www.vogel-professional-education.de)

ISBN 978-3-8343-3544-9

ISBN E-Book 978-3-8343-6325-1

7. Auflage. 2026

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.

Lektorat: Ulrike Klein, Berlin

Druck: Schleunungdruck GmbH,

97828 Marktheidenfeld

Gedruckt mit mineralölfreien Druckfarben

Copyright 2012, 2026 by Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, Würzburg

Vogel Communications Group GmbH & Co. KG

Max-Planck-Straße 7/9

97082 Würzburg

Tel.: +49 931 418-0

Fragen zur Produktsicherheit:

[produktsicherheit@vogel.de](mailto:produktsicherheit@vogel.de)

**RALF DEUSSEN**

Ralf Deußen, Jahrgang 1964, legte 1988 in Köln die Prüfung zum Kfz-Mechanikermeister ab. Bis 2004 arbeitete er in verschiedenen Kfz-Betrieben als Serviceberater und Werkstattmeister. Von 2004 bis 2017 unterrichtete er am Bildungs- und Technologiezentrum Heide Meisterschüler sowie Auszubildende im Kfz-Handwerk in der Theorie wie auch in der Praxis. Seit 2017 erstellt er bei der Vogel Communications Group E-Lektionen und virtuelle Übungen für den autoFACHMANN.

**VOLKERT SCHLÜTER**

Jahrgang 1935, kam nach beruflicher Ausbildung als Kfz-Mechaniker an die Meisterlehrwerkstatt für das Kfz-Handwerk in Heide/Holstein. In der Zeit bis 1960 wurde er für seine spätere Tätigkeit als Lehrkraft in der Meisterlehrwerkstatt (heute Bildungs- und Technologie-Zentrum) bei der Robert Bosch GmbH und bei verschiedenen Automobilherstellern ausgebildet.

Nach abgelegter Meisterprüfung lehrte er an der Meisterlehrwerkstatt bis zu seinem Ruhestand 1998. Er unterrichtete unter anderem auf den Gebieten der Kraftstoffeinspritztechnik für Otto- und Dieselmotoren in Theorie und Praxis sowie Werkstoffkunde. Seit 1969 ist er Fachbuchautor beim Vogel Buchverlag in Würzburg.

**WALTER ESSENREITER**

Walter Essenreiter, geboren 1970 im Allgäu, legte 1995 in Singen die Prüfung zum Kraftfahrzeugmechaniker-Meister und 2009 in Bayreuth die Prüfung zum Betriebswirt (HWK) erfolgreich ab. Er war viele Jahre als Serviceleiter im In- und Ausland tätig, arbeitete als technischer Trainer und nahm am Programm *Train the Trainer* von Volkswagen und Audi teil. Seit 2018 ist er Teil von autoFACHMANN und gibt sein Wissen in Form von E-Learnings an Auszubildende weiter.

**EDGAR SCHMIDT**

Dipl.-Ing (FH) Edgar Schmidt, Jahrgang 1964, absolvierte nach der Realschule eine Ausbildung zum Technischen Zeichner für Elektrotechnik. Nach der Ausbildung holte er an der Fachoberschule Technik in Hannover die Fachhochschulreife nach und studierte am Institut für Fahrzeugbau der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel in Wolfsburg, der heutigen Ostfalia. Seit 1993 arbeitet er in verschiedenen Positionen bei der Vogel Communications Group im Bereich Automedien. Seit 2004 betreut er unter anderem das Thema alternative Antriebe. Außerdem ist er seit 2004 stellvertretender Chefredakteur der Ausbildungsjournale autoFACHMANN und autoKAUFMANN.

**THORSTEN BLOS**

Thorsten Blos. Jahrgang 1976, legte 2002 die Prüfung zum Kfz-Techniker-Meister ab. Bis 2006 arbeitete er als Werkstattmeister, Ausbilder und technischer Betriebsleiter. Ab 2006 führte er Schulungen für Kfz-Werkstätten, Kfz-Ausrüster und Aftermarket-Abteilungen durch und erstellte dafür die erforderlichen Unterlagen. Seit 2016 erstellt er als technischer Redakteur E-Lektionen für den autoFACHMANN bei der Vogel Communications Group. Darüber hinaus gibt er sein Wissen als technischer Trainer im Kfz-Handwerk weiter.

## Grußwort

### **Kfz-Meisterwissen. Orientierung in einer neuen Mobilitätswelt.**

Das Kfz-Handwerk steht nicht vor einem Wandel. Es steht bereits mitten darin.

Mobilität wird digital, elektrisch und vernetzt. Fahrzeuge denken mit. Software entscheidet. Daten werden zum Rohstoff. Die Werkstatt von heute ist längst kein reiner Ort für Reparaturen mehr, sondern Teil eines komplexen Mobilitätssystems.

Elektromobilität, alternative Antriebe und Hochvolttechnik verändern nicht nur den Antrieb, sondern das gesamte Verständnis vom Fahrzeug. Diagnose ist Analyse geworden, Schrauben allein reicht nicht mehr. Wer Systeme beherrschen will, muss sie verstehen. Wer Verantwortung trägt, braucht Wissen, Sicherheit und Überblick.

Die Fortbildung auf Meisterebene eröffnet hier die Chance, die Zukunft des Kfz-Handwerks aktiv zu gestalten. Die Meisterqualifikation ist nicht nur ein Titel. Sie entspricht dem DQR Niveau 6, vergleichbar mit einem Bachelorabschluss. Wer diesen Weg geht, beweist Fachkompetenz, Führungskraft und Verantwortung auf höchstem Niveau.

Denn Technik ist nur ein Teil der Wahrheit. Der Meister von heute ist Führungskraft, Organisator und Unternehmer. Prozesse müssen funktionieren. Rechtliche Rahmenbedingungen müssen eingehalten werden. Digitalisierung bestimmt den Alltag vom ersten Kundenkontakt bis zur Abrechnung. Das Tablet ersetzt den Werkstattblock. Entscheidungen werden datenbasiert getroffen. Transparenz wird erwartet.

*Kfz-Meisterwissen* verbindet fachliche Tiefe mit Praxisnähe. Es ordnet ein, erklärt Zusammenhänge und liefert Orientierung in einem Berufsfeld, das komplexer geworden ist, aber auch spannender. Es richtet sich an Menschen, die Verantwortung übernehmen wollen. Für Betriebe. Für Mitarbeitende. Für die Zukunft des Handwerks.

Ich wünsche Ihnen Erkenntnisgewinn, Klarheit und den Mut, neue Wege zu gehen. Möge die Lektüre Sie dabei unterstützen, Wissen in Handlung zu verwandeln und das Kfz-Handwerk aktiv weiterzuentwickeln.

Mit handwerklichem Gruß und den besten Wünschen für Ihren Meisterweg

Ihr  
Detlef Peter Grün  
Bundesinnungsmeister  
und Vorsitzender des Zentralverbandes des Deutschen Kraftfahrzeughandwerks / BIV

# Inhaltsverzeichnis

|  |            |
|--|------------|
| Grußwort .....   | 7          |
| <b>1 Elektrische Systeme</b> .....   | <b>17</b>  |
| <b>1.1 Grundlagen</b> .....  | <b>17</b>  |
| 1.1.1 Spannung, Strom, Widerstand .....  | 18         |
| 1.1.2 Unterschiede der Spannungserzeugung und Spannungsarten.....                | 21         |
| 1.1.3 Stromarten und Wirkungen des elektrischen Stroms.....                      | 24         |
| 1.1.4 Stromkreis mit mehreren Verbrauchern.....                                  | 25         |
| 1.1.5 Leiterwiderstand .....   | 27         |
| 1.1.6 Kabelquerschnittsbestimmung.....   | 28         |
| 1.1.7 Widerstand und Temperatur.....   | 29         |
| 1.1.8 Halbleiterbauelemente .....  | 29         |
| 1.1.9 Magnetismus .....  | 33         |
| 1.1.10 Hilfsmittel bei der Fehlersuche in elektrischen Anlagen .....             | 36         |
| 1.1.11 Datenübertragung .....  | 54         |
| <b>1.2 Zündanlagen</b> .....   | <b>74</b>  |
| 1.2.1 Grundoszillogramme .....   | 75         |
| 1.2.2 Fehlerhafte Oszillogramme und ihre Auswertung .....                        | 76         |
| 1.2.3 Kontaktlose Transistorzündanlagen .....                                    | 78         |
| 1.2.4 Zweifunken-Zündspulen .....  | 86         |
| 1.2.5 Einzelfunken-Zündspulen .....  | 89         |
| 1.2.6 Fehlersuche am Motormanagement .....                                       | 90         |
| 1.2.7 Zündkerzen .....   | 91         |
| <b>1.3 Batterien für Kraftfahrzeuge</b> .....                                    | <b>98</b>  |
| 1.3.1 Aufbau der Batterie.....   | 98         |
| 1.3.2 Chemische Vorgänge beim Laden und Entladen (vereinfachte Darstellung)..... | 99         |
| 1.3.3 Begriffsbestimmungen und technische Eigenschaften.....                     | 100        |
| 1.3.4 Betriebsverhalten .....  | 102        |
| 1.3.5 Laden von Batterien .....  | 103        |
| 1.3.6 Behandlung von Batterien .....   | 104        |
| 1.3.7 Beurteilung und Prüfen von Batterien .....                                 | 106        |
| 1.3.8 Batteriearten .....  | 107        |
| <b>1.4 Generatoren für Kraftfahrzeuge</b> .....                                  | <b>108</b> |
| 1.4.1 Drehstromgeneratoren .....   | 109        |
| 1.4.2 Begriffsbestimmungen und technische Eigenschaften.....                     | 114        |
| 1.4.3 Regler für Generatoren.....  | 116        |
| 1.4.4 Überprüfen von Generatoren .....   | 118        |
| 1.4.5 Instandsetzen von Generatoren .....  | 120        |
| 1.4.6 Der Batteriesensor.....  | 123        |
| <b>1.5 Starter</b> .....   | <b>125</b> |
| 1.5.1 Starterarten.....  | 125        |
| 1.5.2 Prüfen von Startern mit Starterprüfständen .....                           | 127        |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| <b>1.6</b> | <b>Kabelnetz – Bordnetz</b>               | <b>127</b> |
| 1.6.1      | Schalter                                  | 128        |
| 1.6.2      | Relais                                    | 128        |
| 1.6.3      | Sicherungen                               | 129        |
| 1.6.4      | Störungen im Kabelnetz                    | 130        |
| <b>1.7</b> | <b>Beleuchtungseinrichtungen</b>          | <b>133</b> |
| 1.7.1      | Bauartgenehmigung                         | 133        |
| 1.7.2      | Einbauvorschriften                        | 135        |
| 1.7.3      | Lichttechnische Grundlagen                | 135        |
| 1.7.4      | Scheinwerfersysteme                       | 138        |
| 1.7.5      | Leuchtweitenregulierung (LWR)             | 141        |
| 1.7.6      | Intelligente Lichtsysteme                 | 142        |
| 1.7.7      | Die Scheinwerfereinstellung               | 143        |
| 1.7.8      | Steuerung der Beleuchtung                 | 144        |
| <b>1.8</b> | <b>Sonstige elektrische Einrichtungen</b> | <b>147</b> |
| 1.8.1      | Vorglühanlagen                            | 147        |
| 1.8.2      | Wischermotoren                            | 149        |
| 1.8.3      | Zentralverriegelung                       | 151        |
| 1.8.4      | Wegfahrsperrern                           | 152        |
| 1.8.5      | Diebstahl-Warnanlagen                     | 154        |
| 1.8.6      | Airbagsysteme                             | 156        |
| 1.8.7      | Kfz-Klimaanlage                           | 175        |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| <b>2</b>   | <b>Elektro- und Hybridantriebe</b>             | <b>195</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Hybridantriebe</b>                          | <b>196</b> |
| 2.1.1      | Niedervolt-Hybridantriebe                      | 197        |
| 2.1.2      | Hochvolt-Hybridantriebe                        | 203        |
| <b>2.2</b> | <b>Batterieelektrischer Antrieb</b>            | <b>210</b> |
| 2.2.1      | Komponenten eines Hochvoltantriebs             | 211        |
| 2.2.2      | Das Laden                                      | 217        |
| <b>2.3</b> | <b>E-Motoren</b>                               | <b>227</b> |
| 2.3.1      | Permanenterregte Synchronmotoren PSM           | 228        |
| 2.3.2      | Fremderregte Synchronmotoren FESM              | 229        |
| 2.3.3      | Asynchronmotoren (ASM)                         | 230        |
| 2.3.4      | Synchron-Reluktanzmotor (SynRM)                | 231        |
| 2.3.5      | Positionserfassung des Rotors                  | 232        |
| <b>2.4</b> | <b>Bremssysteme in E-Autos</b>                 | <b>234</b> |
| <b>2.5</b> | <b>Antriebsbatterien</b>                       | <b>237</b> |
| 2.5.1      | Leistungssteigerungen bei Batterien            | 240        |
| 2.5.2      | Lithium-Ionen-Batterien                        | 242        |
| 2.5.3      | Gesundheitszustand von Antriebsbatterien (SoH) | 245        |
| <b>2.6</b> | <b>Das Thermomanagement</b>                    | <b>255</b> |
| 2.6.1      | Temperaturmanagement für den Antrieb           | 256        |
| 2.6.2      | Batteriekühlungen                              | 257        |
| 2.6.3      | Elektrischer Klimakompressor                   | 260        |
| 2.6.4      | Temperaturmanagement mit Wärmepumpe            | 261        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>2.7 Hochvoltautos in der Werkstatt .....</b>       | <b>265</b> |
| 2.7.1 Sicherheit und Organisation der Werkstatt ..... | 265        |
| 2.7.2 Umgang mit Unfallautos .....                    | 282        |
| 2.7.3 Wartung und Diagnose von HV-Fahrzeugen .....    | 287        |
| 2.7.4 Batteriereparatur .....                         | 290        |

### **3 Verbrennungsmotoren 297**

|   |            |
|---|------------|
| <b>3.1 Kurbeltrieb .....</b>                      | <b>309</b> |
| 3.1.1 Kurbelwellen .....                          | 309        |
| 3.1.2 Gleitlager .....                            | 315        |
| 3.1.3 Pleuel .....                                | 320        |
| 3.1.4 Kolben .....                                | 322        |
| 3.1.5 Kolbenringe .....                           | 331        |
| 3.1.6 Kolbenbolzen .....                          | 333        |
| 3.1.7 Schwungscheibe .....                        | 334        |
| 3.1.8 Zylinder .....                              | 334        |
| 3.1.9 Zylinderköpfe .....                         | 337        |
| <b>3.2 Ventiltrieb .....</b>                      | <b>338</b> |
| 3.2.1 Steuerzeiten von Viertaktmotoren .....      | 339        |
| 3.2.2 Variable Nockenwellenverstellung .....      | 349        |
| 3.2.3 Variabler Ventilhub .....                   | 356        |
| 3.2.4 Zylinderabschaltung .....                   | 363        |
| <b>3.3 Arbeitsverfahren bei Kfz-Motoren .....</b> | <b>370</b> |
| 3.3.1 Viertakt-Ottomotor .....                    | 370        |
| 3.3.2 Zweitaktmotor .....                         | 373        |
| 3.3.3 Kompressionsdruckprüfung .....              | 375        |
| 3.3.4 Druckverlusttest .....                      | 376        |
| 3.3.5 Ungleichförmigkeit des Motors .....         | 377        |
| 3.3.6 Drehschwingungsdämpfer .....                | 377        |
| 3.3.7 Zweimassenschwungrad .....                  | 378        |
| 3.3.8 Ausgleichswellen .....                      | 381        |
| 3.3.9 Motoraufhängung .....                       | 382        |
| <b>3.4 Motorleistung .....</b>                    | <b>382</b> |
| 3.4.1 Leistungsbestimmende Faktoren .....         | 384        |
| 3.4.2 Drehmoment .....                            | 384        |
| 3.4.3 Ventiltechnik .....                         | 385        |
| 3.4.4 Schaltsaugrohr .....                        | 387        |
| 3.4.5 Motoraufladung .....                        | 388        |
| 3.4.6 Brennraum .....                             | 397        |
| 3.4.7 Doppelzündung .....                         | 398        |
| 3.4.8 Phasenversetzte Doppelzündung .....         | 398        |
| <b>3.5 Motorschmierung .....</b>                  | <b>399</b> |
| 3.5.1 Schmiersysteme .....                        | 402        |
| 3.5.2 Ölpumpen .....                              | 404        |
| 3.5.3 Kurzschlussventil .....                     | 405        |
| 3.5.4 Öldruckschalter .....                       | 405        |
| 3.5.5 Ölfilter .....                              | 405        |

|             |                                      |            |
|-------------|--------------------------------------|------------|
| 3.5.6       | Ölkühler .....                       | 406        |
| 3.5.7       | Ölwechsel .....                      | 407        |
| <b>3.6</b>  | <b>Motorkühlung .....</b>            | <b>408</b> |
| 3.6.1       | Luftkühlung .....                    | 409        |
| 3.6.2       | Flüssigkeitskühlung .....            | 409        |
| 3.6.3       | Visco-Lüfterkupplung .....           | 415        |
| 3.6.4       | Standheizung .....                   | 416        |
| 3.6.5       | Kennfeldgesteuertes Kühlsystem ..... | 417        |
| <b>3.7</b>  | <b>Kreiskolbenmotor .....</b>        | <b>418</b> |
| <b>3.8</b>  | <b>Abgasanlage .....</b>             | <b>420</b> |
| <b>3.9</b>  | <b>Dichtungselemente .....</b>       | <b>423</b> |
| <b>3.10</b> | <b>Dieselmotoren .....</b>           | <b>425</b> |
| 3.10.1      | Aufbau .....                         | 425        |
| 3.10.2      | Zylinderlaufbuchsen .....            | 425        |
| 3.10.3      | Arbeitsverfahren .....               | 429        |
| 3.10.4      | Kolbenspalzmaß .....                 | 431        |

#### **4 Gemischbildung und Verbrennung bei Ottomotoren 433**

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| <b>4.1</b> | <b>Abgase und Abgasnachbehandlung von Ottomotoren .....</b>                | <b>437</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Abgasnachbehandlung .....</b>   | <b>441</b> |
| 4.2.1      | Lambda-Regelung .....  | 445        |
| 4.2.2      | Spannungssprung-Lambdasonde (Zweipunktsonde nach dem Nernst-Prinzip) ..... | 445        |
| 4.2.3      | Widerstandssprungsonde (Siemens) .....                                     | 449        |
| 4.2.4      | Breitband-Lambdasonde .....  | 450        |
| <b>4.3</b> | <b>Kraftstoffeinspritzung bei Ottomotoren .....</b>                        | <b>454</b> |
| 4.3.1      | Motronic (Bosch) .....   | 456        |
| 4.3.2      | ME-Motronic (Bosch) .....  | 489        |
| 4.3.3      | Bivalentes Einspritzsystem (Benzin/Erdgas, CNG) .....                      | 497        |
| 4.3.4      | Bivalentes Einspritzsystem (Benzin/Flüssiggas, LPG) .....                  | 501        |
| 4.3.5      | Benzin-Direkteinspritzung (wandgeführt) .....                              | 504        |
| 4.3.6      | MED-Motronic (Bosch) .....   | 508        |
| 4.3.7      | Benzindirekteinspritzung (strahlgeführt) .....                             | 521        |

#### **5 Gemischbildung und Verbrennung bei Dieselmotoren 525**

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| <b>5.1</b> | <b>Abgase und Abgasnachbehandlung von Dieselmotoren .....</b>   | <b>527</b> |
| 5.1.1      | Abgaszusammensetzung .....                                      | 527        |
| 5.1.2      | Schadstoffentstehung .....                                      | 527        |
| 5.1.3      | Schadstoffminderung .....                                       | 528        |
| 5.1.4      | Abgasrückführung bei Dieselmotoren .....                        | 529        |
| 5.1.5      | Abgasnachbehandlung bei Pkw-Dieselmotoren .....                 | 530        |
| 5.1.6      | Dieselpartikelfilter .....                                      | 532        |
| 5.1.7      | Abgasnachbehandlung – Selective Catalytic Reduction (SCR) ..... | 535        |
| <b>5.2</b> | <b>Diesel-Einspritzverfahren .....</b>                          | <b>538</b> |
| 5.2.1      | Direkteinspritzverfahren (DI) .....                             | 538        |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| <b>5.3</b> | <b>Dieseleinspritzsysteme mit elektronischer Regelung (EDC)</b> .....  | <b>539</b> |
| 5.3.1      | Bosch-Einspritzsystem mit Pumpe-Düse-Einheit (PDE) .....               | 540        |
| 5.3.2      | Pumpe-Düse-Einheit mit Piezo-Ventil (VW/Siemens VDO) .....             | 578        |
| 5.3.3      | Bosch-Einspritzsystem Pumpe-Leitung-Düse (PLD) .....                   | 586        |
| 5.3.4      | Bosch-Einspritzsystem Common Rail (CR) .....                           | 600        |
| 5.3.5      | Bosch-Einspritzsystem Common Rail (CR) mit Piezo-Inline-Injektor ..... | 625        |

## **6 Kraftübertragung** **631**

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| <b>6.1</b> | <b>Kupplung</b> .....  | <b>633</b> |
| 6.1.1      | Aufgaben.....  | 634        |
| 6.1.2      | Kupplungsarten .....   | 634        |
| 6.1.3      | Kupplungsscheiben .....  | 639        |
| 6.1.4      | Ausrücklager.....  | 641        |
| 6.1.5      | Die selbstnachstellende Kupplung (SAC).....  | 644        |
| 6.1.6      | Lamellenkupplung.....  | 646        |
| 6.1.7      | Kupplungsbetätigung.....   | 648        |
| 6.1.8      | Elektronisch gesteuerte Kupplungen.....  | 652        |
| 6.1.9      | Kupplungen für Hybridantriebe .....  | 654        |
| 6.1.10     | Kupplungsfehler und deren Ursachen.....  | 654        |
| <b>6.2</b> | <b>Wechselgetriebe</b> .....   | <b>657</b> |
| 6.2.1      | Gleichachsige Getriebe.....  | 658        |
| 6.2.2      | Ungleichachsige Getriebe.....  | 661        |
| 6.2.3      | Schieberadgetriebe .....   | 662        |
| 6.2.4      | Allklauengertriebe .....   | 663        |
| 6.2.5      | Zähneanzahl und Übersetzungen .....  | 663        |
| 6.2.6      | Synchrongetriebe .....   | 665        |
| 6.2.7      | Schaltsperrung und Schaltarretierung .....   | 672        |
| 6.2.8      | Schaltgetriebe für Front- und Heckantrieb .....  | 673        |
| <b>6.3</b> | <b>Automatikgetriebe</b> .....   | <b>681</b> |
| 6.3.1      | Hydrodynamische Kupplung.....  | 682        |
| 6.3.2      | Hydrodynamischer Drehmomentwandler.....  | 683        |
| 6.3.3      | Wandlerüberbrückungskupplung .....   | 687        |
| 6.3.4      | Planetengetriebe .....   | 688        |
| 6.3.5      | Übersetzungen von Planetengetrieben .....  | 691        |
| 6.3.6      | Schalten der Planetengetriebe .....  | 694        |
| 6.3.7      | Mechanisch gesteuerte Automatikgetriebe.....   | 698        |
| 6.3.8      | Hydraulikeinrichtung im Automatikgetriebe.....   | 702        |
| 6.3.9      | Elektronisch-hydraulische Steuerung (ZF 4 HP 22 EH) im<br>4-Gang-Automatikgetriebe ..... | 706        |
| 6.3.10     | Adaptive Getriebesteuerung (AGS).....  | 707        |
| 6.3.11     | 6-Gang-Stufenautomatikgetriebe 6 HP 26.....  | 708        |
| 6.3.12     | 7-Gang-Automatikgetriebe .....   | 710        |
| 6.3.13     | 8-Gang-Automatikgetriebe .....   | 711        |
| 6.3.14     | 9-Gang-Automatikgetriebe .....   | 714        |
| 6.3.15     | 8-Gang-Automatikgetriebe mit Hybridantrieb .....   | 717        |
| 6.3.16     | Stufenloses Automatikgetriebe (CVT = Continuously Variable Transmission).....            | 718        |

|             |  |            |
|-------------|--|------------|
| 6.3.17      | Multitronic – stufenloses Automatikgetriebe.....                                 | 720        |
| 6.3.18      | Automatisierte Schaltgetriebe.....   | 725        |
| 6.3.19      | Automatisierte Schaltgetriebe im Nutzfahrzeug.....                               | 731        |
| 6.3.20      | Doppelkupplungsgetriebe (Dual-Tronic oder DSG-Direktschaltgetriebe).....         | 733        |
| 6.3.21      | Getriebe in Motorrädern .....  | 745        |
| <b>6.4</b>  | <b>Verteilergetriebe .....</b>   | <b>746</b> |
| <b>6.5</b>  | <b>Viscokupplung/Viscosperre .....</b>   | <b>749</b> |
| <b>6.6</b>  | <b>Torsen-Sperrdifferenzial (Audi/Subaru) .....</b>                              | <b>750</b> |
| <b>6.7</b>  | <b>Haldex-Allrad-Kupplung .....</b>  | <b>752</b> |
| 6.7.1       | Haldex-Kupplung Generation IV.....   | 754        |
| 6.7.2       | Haldex-Kupplung Generation V .....   | 754        |
| <b>6.8</b>  | <b>Kardan- oder Gelenkwellen .....</b>   | <b>755</b> |
| 6.8.1       | Gelenkwellen mit Kreuzgelenken .....   | 756        |
| 6.8.2       | Gelenkwellen mit Gleichlaufgelenken.....   | 757        |
| 6.8.3       | Tripodegelenke.....  | 759        |
| 6.8.4       | Trockengelenke.....  | 760        |
| <b>6.9</b>  | <b>Winkelgetriebe (Achsantriebe) .....</b>                                       | <b>760</b> |
| 6.9.1       | Verzahnungsarten von Kegelradgetrieben .....                                     | 762        |
| 6.9.2       | Grundsätzliches zur Einstellung von Kegelradgetrieben.....                       | 763        |
| 6.9.3       | Einstellen von Kegel- und Tellerrad .....  | 763        |
| <b>6.10</b> | <b>Aufbau und Funktion von Ausgleichsgetrieben (Kegelrad-Differenzial) .....</b> | <b>766</b> |
| 6.10.1      | Stirnrad-Differenzial (Leichtbau-Differenzial).....                              | 768        |
| 6.10.2      | Schaltbare Differenzialsperre (schaltbare Ausgleichsperren).....                 | 769        |
| 6.10.3      | Lamellenselbstsperrdifferenzial oder Festwertsperr (ZF Lok-O-Matic).....         | 770        |
| 6.10.4      | Variable Differenzialsperre .....  | 773        |
| 6.10.5      | Torque Vectoring .....   | 774        |
| 6.10.6      | Verteilergetriebe Twinster-Differenzial.....                                     | 776        |
| 6.10.7      | Kronenrad-Differenzial .....   | 777        |
| <b>6.11</b> | <b>Allradantriebe .....</b>  | <b>778</b> |
| 6.11.1      | Zuschaltbarer Allradantrieb.....   | 778        |
| 6.11.2      | Permanenter Allradantrieb.....   | 779        |
| 6.11.3      | X-Drive-Allradkonzept BMW.....   | 780        |
| 6.11.4      | SH-AWD-Allradkonzept (Honda).....  | 781        |
| 6.11.5      | Allradkonzept VW Touareg.....  | 782        |
| 6.11.6      | Porsche Allradantrieb Carrera 4.....   | 783        |
| 6.11.7      | ECOnnect-Allradantrieb ZF.....   | 784        |
| 6.11.8      | Audi Allradantrieb Quattro Ultra .....   | 784        |

## **7 Fahrwerk 787**

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| <b>7.1</b> | <b>Grundlagen der Fahrdynamik .....</b>    | <b>787</b> |
| 7.1.1      | Fahrwiderstände .....                      | 788        |
| 7.1.2      | Die Fahrzeugmasse .....                    | 789        |
| 7.1.3      | Rotationsachsen .....                      | 791        |
| 7.1.4      | Reifenkräfte .....                         | 796        |
| 7.1.5      | Eigenlenkverhalten .....                   | 800        |
| <b>7.2</b> | <b>Achsgeometrie .....</b>                 | <b>803</b> |
| 7.2.1      | Die Grundmaße .....                        | 804        |
| 7.2.2      | Lenkinematik .....                         | 808        |
| 7.2.3      | Lenkrollradius und Störkrafthebelarm ..... | 812        |

|             |  |             |
|-------------|--|-------------|
| 7.2.4       | Sturz und Spreizung .....                            | 814         |
| 7.2.5       | Der Nachlauf .....                                   | 817         |
| 7.2.6       | Die Spur .....                                       | 818         |
| 7.2.7       | Die Achsvermessung .....                             | 825         |
| <b>7.3</b>  | <b>Lenkanlagen .....</b>                             | <b>828</b>  |
| 7.3.1       | Lenkgetriebe .....                                   | 835         |
| 7.3.2       | Hilfskraftlenkungen .....                            | 843         |
| 7.3.3       | Elektromechanische Servolenkung (EPS) .....          | 854         |
| 7.3.4       | Aktive Lenksysteme .....                             | 872         |
| <b>7.4</b>  | <b>Achsen am Kraftfahrzeug .....</b>                 | <b>884</b>  |
| 7.4.1       | Starrachsen .....                                    | 885         |
| 7.4.2       | Halbstarre Achsen .....                              | 888         |
| 7.4.3       | Einzelradaufhängung .....                            | 890         |
| <b>7.5</b>  | <b>Federn (Federelemente) am Kraftfahrzeug .....</b> | <b>899</b>  |
| 7.5.1       | Blattfeder .....                                     | 900         |
| 7.5.2       | Schraubenfedern .....                                | 901         |
| 7.5.3       | Torsions- oder Drehstabfedern .....                  | 903         |
| 7.5.4       | Luftfederung .....                                   | 903         |
| 7.5.5       | Gashydraulische (hydropneumatische) Federung .....   | 904         |
| <b>7.6</b>  | <b>Querstabilisierung .....</b>                      | <b>905</b>  |
| 7.6.1       | Der mechanische Stabilisator .....                   | 905         |
| 7.6.2       | Die elektromechanische Wankstabilisierung .....      | 909         |
| <b>7.7</b>  | <b>Stoßdämpfer .....</b>                             | <b>911</b>  |
| 7.7.1       | Zweirohrstoßdämpfer .....                            | 912         |
| 7.7.2       | Einrohrstoßdämpfer .....                             | 913         |
| 7.7.3       | Variable Dämpfung .....                              | 914         |
| 7.7.4       | Prüfen von Stoßdämpfern .....                        | 916         |
| <b>7.8</b>  | <b>Räder und Reifen am Kraftfahrzeug .....</b>       | <b>917</b>  |
| 7.8.1       | Die Bereifung .....                                  | 917         |
| 7.8.2       | Räder .....  | 939         |
| <b>7.9</b>  | <b>Reifendruckkontrollsysteme .....</b>              | <b>951</b>  |
| 7.9.1       | Indirekt messende Reifendruckkontrollsysteme .....   | 952         |
| 7.9.2       | Direkt messende Reifendruckkontrollsysteme .....     | 954         |
| <b>7.10</b> | <b>Fahrzeugsbremsen .....</b>                        | <b>957</b>  |
| 7.10.1      | Grundlagen .....                                     | 959         |
| 7.10.2      | Radbremzen .....                                     | 969         |
| 7.10.2.1    | Scheibenbremsen .....                                | 969         |
| 7.10.2.2    | Trommelbremsen .....                                 | 990         |
| 7.10.2.3    | Feststellbremse .....                                | 1003        |
| 7.10.3      | Die Übertragungseinrichtung .....                    | 1006        |
| 7.10.4      | Bremskraftverstärker .....                           | 1014        |
| <b>8</b>    | <b>Assistenz- und Fahrdynamikregelsysteme .....</b>  | <b>1021</b> |
| <b>8.1</b>  | <b>Fahrdynamikregelsysteme .....</b>                 | <b>1021</b> |
| 8.1.1       | Das ABS .....  | 1021        |
| 8.1.1.1     | Systemübersicht .....                                | 1022        |
| 8.1.1.2     | Das ABS-Steuergerät .....                            | 1023        |
| 8.1.1.3     | Raddrehzahlsensoren .....                            | 1023        |

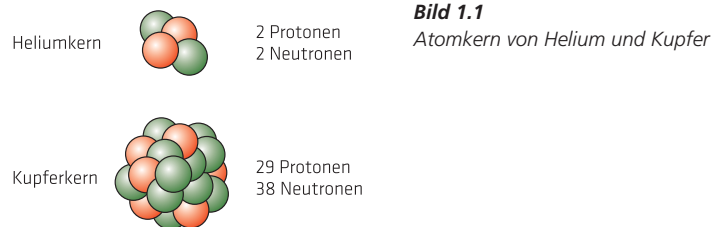
## 1

# Elektrische Systeme

Die Entwicklung der Elektrik/Elektronik in Fahrzeugen nimmt weiterhin rapide zu. Die Grundlagen der Elektrik sind unabdingbare Voraussetzung für ein erfolgreiches Arbeiten an allen Systemen.

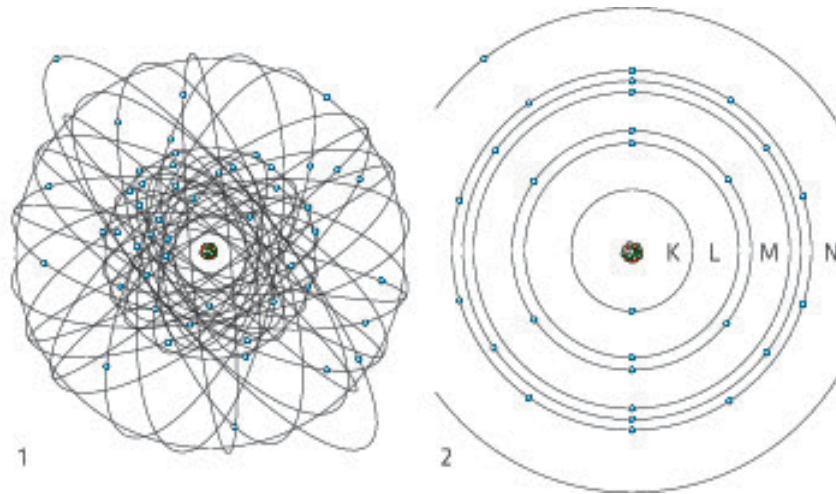
## 1.1 Grundlagen

Zum Einstieg in die Elektrizität und zum besseren Verständnis nehmen wir den Weg über das Atom. Jedes Atom besteht im Inneren aus einem Atomkern mit positiv geladenen Protonen und ungeladenen Neutronen. Als Beispiel werden zwei Elemente dargestellt, der Heliumkern und Kupferkern (Bild 1.1).



Um den Atomkern kreisen mit einer sehr hohen Geschwindigkeit negativ geladene Elektronen. Sie formieren sich dabei je nach Anzahl der Elektronen zu einer oder auch zu mehreren Schalen, die in unterschiedlichen Abständen (Bahnen) den Atomkern umkreisen. In einem vollständigen Atom ist die Anzahl der Protonen und Elektronen immer im Gleichgewicht und dadurch ist das Atom auch elektrisch neutral.

Ein Atom unterscheidet sich in seiner Größe dadurch, wie viele Protonen im Kern vorhanden sind und wie viele entsprechende Elektronen um den Kern kreisen. Das im Aufbau einfachste (leichteste) Atom ist das Wasserstoffatom. Es besitzt im Kern nur eine positive Ladung, also ein Proton, und auf der Schale ebenfalls nur eine negative Ladung, ein Elektron.



**Bild 1.2** Das Bohr'sche Atommodell von Kupfer (1), Darstellung der Schalenbelegung mit Elektronen (2)

Ein Atom, das sehr häufig in der Elektrik vorkommt, ist das Kupferatom. Es besitzt in seinem Kern 29 positive Ladungen, also Protonen, und auf der Schale ebenfalls 29 negative Ladungen, die Elektronen (Bild 1.2).

Über die Änderung der sich in der äußeren Schale befindlichen Elektronenanzahl wird ein Atom „umgebaut“. Das bedeutet: Wenn ein negativ geladenes Elektron hinzugefügt wird, überwiegt die negative Ladung in diesem Atom, und es wird negativ. Wird ein negativ geladenes Elektron entfernt, dann überwiegt die positive Ladung in diesem Atom, und es wird positiv. In leitenden Flüssigkeiten oder Gasen werden diese Atome als Ionen bezeichnet. Elektrisch negative Atome sind negative Ionen (Anion), und die elektrisch positiven Atome sind positive Ionen (Kation).

Wie beim Magnetismus gilt hier die Grundregel: Ungleiche Ladungen ziehen sich an, und gleiche Ladungen stoßen sich ab. In einem elektrischen Leiter, in dem mehrere Elektronenbahnen den Atomkern umkreisen, reicht die Anziehungskraft der Protonen aber nicht aus, um die äußeren Elektronen an sich zu binden.

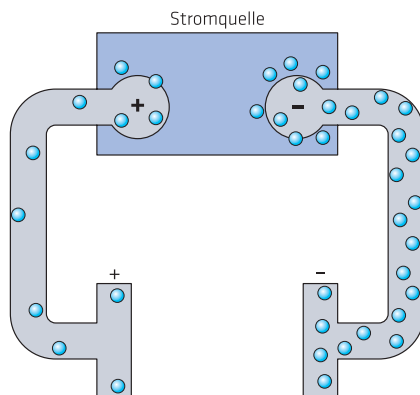
Diese äußeren Elektronen, die sich in der Elektronenbahn befinden, sind dann die „freien“ Elektronen (Valenzelektron). Sie werden auch als „quasifreie“ Elektronen bezeichnet, weil sie sich innerhalb des Leiters frei bewegen, aber ohne eine zugeführte Energie diesen Leiter nicht verlassen können.

Diese „freien“ (quasifreien) Elektronen sind die Träger der elektrischen Energie. Ein Werkstoff mit vielen freien Elektronen ist ein guter Leiter, z.B. alle Edelmetalle oder Kupfer. Ein Werkstoff mit sehr wenigen oder keinen freien Elektronen ist ein schlechter Leiter oder sogar ein Nichtleiter, ein Isolator. Als Beispiel sollen hier Gummi, Pertinax und Porzellan genannt sein.

## 1.1.1 Spannung, Strom, Widerstand

### Spannung

Die im Kraftfahrzeug befindliche Spannungsquelle ist die Batterie. Eine gut geladene Batterie hat zwischen den beiden Polen eine große Potenzialdifferenz. Das bedeutet, dass am Minuspol ein Elektronenüberschuss vorhanden ist und am Pluspol ein Elektronenmangel herrscht (Bild 1.3).

**Bild 1.3**

*Unterbrochener Stromkreis: Elektronenüberschuss auf der Minusseite und Elektronenmangel auf der Plusseite*

Diese unterschiedlichen Ladungen sind voneinander getrennt, und somit besteht ein gewisser „elektrischer Druck“, der fachlich richtig elektrische Spannung heißt.

Reduziert sich in der Energiequelle die Potenzialdifferenz, dann wird logischerweise auch die Spannung geringer. In umgekehrter Logik bedeutet das, dass beim Laden einer Batterie die Potenzialdifferenz zunimmt und deshalb die Spannung erhöht wird.

Die Maßeinheit für die elektrische Spannung ist Volt mit dem Kurzzeichen „V“. Das Formelzeichen für die elektrische Spannung ist „U“.

Ein Volt bewirkt, dass durch einen Widerstand von 1 Ohm ein Strom von 1 Ampere fließt.

### Strom

Der elektrische Strom ist die Anzahl der Elektronen pro Zeitraum; er wird in Ampere angegeben. Wenn nun die beiden Pole mit den unterschiedlichen Ladungen miteinander verbunden werden, also der Stromkreis geschlossen wird, dann wird der Ladungsunterschied ausgeglichen. Es bewegen sich die Elektronen vom Minus- zum Pluspol, das bedeutet, es fließt ein elektrischer Strom. Die Bewegung der Elektronen ist die physikalische Stromrichtung, die auch oftmals „Elektronenstromrichtung“ genannt wird.

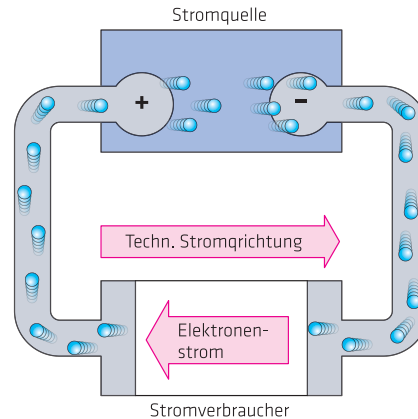
Das Handeln und Denken für den Fachmann in der Stromrichtung wird allerdings durch die technische Stromrichtung geprägt und heißt: Der Strom fließt von Plus nach Minus (Bild 1.4).

Die Maßeinheit für den elektrischen Strom ist Ampere mit dem Kurzzeichen „A“. Das Formelzeichen für den elektrischen Strom ist „I“.

### Widerstand

Wenn der Stromkreis geschlossen wird und die Elektronen sich ausgleichen wollen, dann wird der „freie“ Elektronenfluss behindert.

**Bild 1.4**  
 Geschlossener  
 Stromkreis:  
 Ladungsausgleich  
 und Elektronenbe-  
 wegung durch  
 Zwischenschalten  
 eines Verbrauchers



Diese Behinderungen können die verschiedensten Ursachen haben. So stellen unterschiedliche Leiterqualitäten auch unterschiedlich große Behinderungen dar. Weitere Behinderungen können z.B. auch schlechte Kontakte, Feuchtigkeit und Korrosion sein.

Alle Ursachen, die den freien Elektronenfluss behindern, werden elektrischer Widerstand genannt.

Ein Verbraucher muss ebenfalls einen Widerstand haben, denn sonst gäbe es einen Kurzschluss. In einigen Schaltungen werden noch zusätzlich Widerstände als Bauteil eingebaut, um z.B. eine Spannung zu reduzieren. Die Widerstände, die aus diesen Gründen vorhanden sind, werden auch „Nutzwiderstände“ genannt. Alle übrigen Widerstände, die einen freien Stromfluss behindern, werden auch als „ungewollte Widerstände“ bezeichnet. Diese „ungewollten Widerstände“ bereiten dem Fachmann die größten Probleme bei der Fehlersuche.

Die Maßeinheit für den elektrischen Widerstand ist Ohm mit dem Kurzzeichen „ $\Omega$ “. Das Formelzeichen für den elektrischen Widerstand ist „ $R$ “.

### Ohmsches Gesetz

Der Stromfluss in einem Leiter hängt von der Höhe der anliegenden Spannung und der Größe des Leiterwiderstands ab. Die Abhängigkeit der drei Größen zueinander ist im ohmschen Gesetz festgelegt. Es sagt aus:

Die Spannung ist proportional dem Produkt aus Widerstand und Strom.

Oder mit Formelzeichen ausgedrückt:

$$U = R \cdot I$$

Sind von einem Stromkreis zwei Werte bekannt, z.B. die Betriebsspannung und der Widerstand des Verbrauchers, dann ist es durch Umstellen der ohmschen Formel möglich, den hier zu erwartenden Strom zu errechnen. Das gilt auch für die anderen beiden Grundgrößen, sodass sich neben der Grundformel noch zwei weitere Möglichkeiten ergeben:

Der Strom errechnet sich, indem man die Spannung durch den Widerstand dividiert, also  $I = U : R$ , und der Widerstand, indem man die Spannung durch den Strom teilt, also  $R = U : I$ .

Als kleine Hilfe beim Umstellen des ohmschen Gesetzes gilt das sogenannte Merkdreieck.

$$\frac{U}{I \times R}$$

Wird der gesuchte Wert abgedeckt, bleibt die zum Rechnen passende Formel lesbar.

## 1.1.2 Unterschiede der Spannungserzeugung und Spannungsarten

### Induktionsspannung

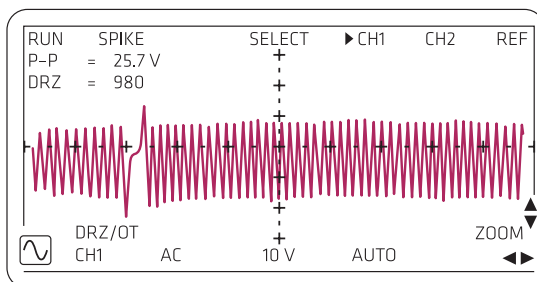
Durch die Änderung des magnetischen Feldes wird in einem Leiter eine Spannung erzeugt. Die so erzeugte Spannung ist die Induktionsspannung. Jede durch Induktion erzeugte Spannung ist eine Wechselspannung.

Beispiele für diese Art der Spannungserzeugung sind: Generator und induktive Drehzahlgeber (Bild 1.5).

### Piezospannung

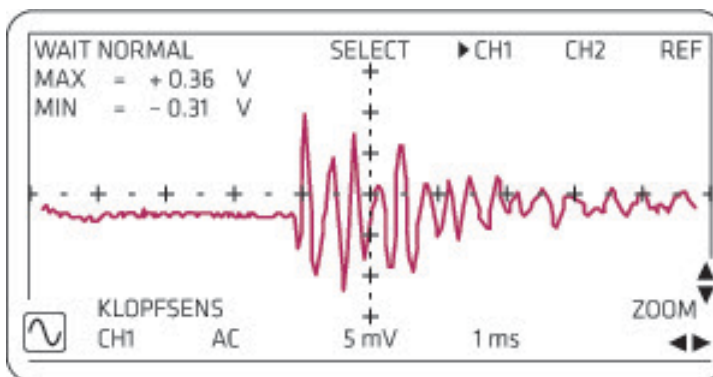
Wenn verschiedene Kristalle einer Zug- oder Druckbeanspruchung ausgesetzt werden, dann entsteht eine Spannung. Diese Spannung ist die Piezospannung.

Beispiele für diese Art der Spannungserzeugung sind: Klopfsensor (Bild 1.6) und der Klemmgeber (für die Einspritzleitung beim Diesel).



**Bild 1.5**

Wechselspannung von einem Drehzahl-Bezugsmarkengeber



**Bild 1.6**

Wechselspannung von einem Klopfsensor

## 2

## Elektro- und Hybridantriebe

Für Kfz-Betriebe wird es immer wichtiger, sich mit der Hochvolttechnik und ihren Besonderheiten auseinanderzusetzen. Hochvoltfahrzeuge kommen langsam, aber sicher in alle Werkstätten – nicht nur in die Markenbetriebe. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit elektrifizierten Antrieben, dem Aufbau von Hochvoltsystemen, einem sinnvollen Annahmeprozess und den besonderen Hochvolarbeiten, die in einer Werkstatt anfallen können.

Elektrifizierte Antriebsstränge gibt es mittlerweile in verschiedensten Ausprägungen. Sie teilen sich in Niedervolt- und Hochvoltsysteme.

### Definition

„Hochvolt“ bezeichnet im Automobil Spannungen zwischen 60 Volt und 1500 Volt Gleichspannung und zwischen 30 Volt und 1000 Volt Wechselspannung. Die aus der Installations- und Gebäudetechnik bekannte Unterscheidung der Spannungsklassen in Klein-, Nieder-, Mittel-, Hoch- und Höchstspannung war für die Fahrzeugtechnik nicht sinnvoll. Hier entschied man sich deshalb für die Unterteilung in die Spannungsklassen Nieder- und Hochvolt.

Diese Einteilung verdeutlicht Laien zudem das erhöhte Gefahrenpotenzial in Verbindung mit der höheren Spannung. Daher sind auch die unter Spannung stehenden Hochvoltkomponenten mit der Signalfarbe Orange gekennzeichnet.

Hochvolt-Fahrzeuge lassen sich in folgende Gattungen unterteilen:

- Vollhybrid-Fahrzeuge (Hybrid Electric Vehicle HEV)
- Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge (PHEV)
- Fahrzeug mit Range Extender (REEV)
- Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)
- Brennstoffzellen-Fahrzeuge (diese werden mangels Verbreitung in diesem Buch nicht behandelt)

Vollhybridfahrzeuge kann man wiederum in folgende Varianten unterteilen:

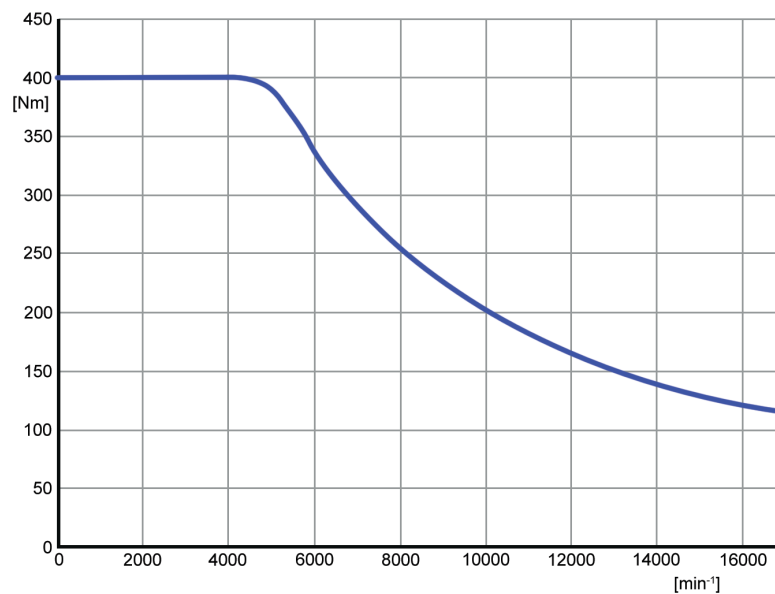
- Parallelhybrid
- Serieller Hybrid
- Leistungsverzweigter Hybrid

Autos mit Niedervolttechnik lassen sich in folgende Varianten unterteilen:

- Micro-Hybrid
- Mild-Hybrid

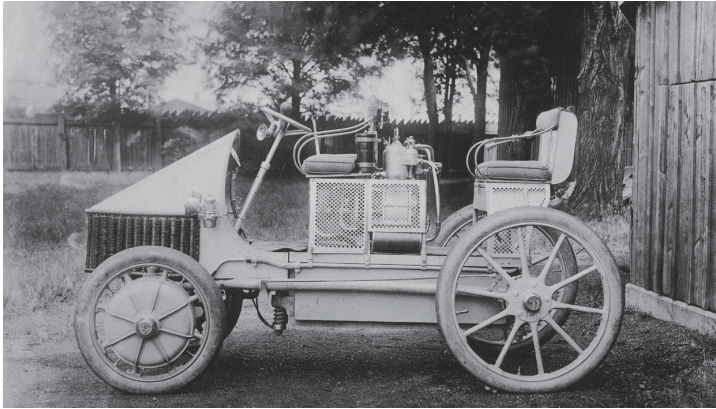
## 2.1 Hybridantriebe

Der Hybridantrieb ist keine Idee der letzten 30 Jahre. Genau wie mit dem rein batterieelektrischen Antrieb haben die Entwickler bereits in den Anfangstagen der Automobile mit dem Hybridantrieb experimentiert. Denn die Drehmomentcharakteristiken von Elektro- und Verbrennungsmotoren ergänzen sich ideal (Bild 2.1). Eines der berühmtesten Beispiele ist der „Semper Vivus“ (lat. für „immer lebendig“) aus dem Jahr 1900 von Ferdinand Porsche – ein serieller Hybrid mit Radnabenmotoren (Bild 2.2). Die sehr schwere Technik ließ das Konzept aber schnell scheitern. Dann experimentierte beispielsweise Audi Ende der 80er-Jahre mit dem Audi duo, einem 100 Avant, bei dem ein Fünfzylinder-Benzinmotor die Vorderräder antrieb und ein zuschaltbarer Elektromotor mit 9 kW die Hinterräder. Als Energiespeicher dienten Nickel-Cadmium-Batterien.



**Bild 2.1** Drehmomentkurve eines BMW iX3. Die Drehmomentcharakteristik von Elektromotoren eignet sich hervorragend für den Antrieb von Autos. Durch das hohe Drehmoment aus dem Stillstand heraus können sie auch Verbrennungsmotoren in Hybridantrieben gut ergänzen.

[Bild: BMW]

**Bild 2.2**

Bei seinem „Semper Vivus“ hatte Ferdinand Porsche schon im Jahr 1900 die Idee, den Verbrennungsmotor als Range-Extender für einen Elektroantrieb mit Radnabenmotoren einzusetzen.

[Bild: Porsche]

Doch wirklich erfolgreich wurden erst die Hybridantriebe von Toyota, die der Hersteller erstmals 1997 im Modell Prius eingesetzt hat. Heute sind Hybridantriebe bei vielen Herstellern und in vielen Modellen auf dem Markt.

Denn mit dem Drehmomentverhalten der Elektromotoren lassen sich gut die Drehmomentschwächen von verbrauchsoptimierten Verbrennungsmotoren ausgleichen. Außerdem hat sich die Batterietechnik deutlich verbessert. Die Systeme nutzen überschüssige Leistung des Verbrennungsmotors und die kinetische Energie des Fahrzeugs, um sie als elektrische Energie in der Batterie zu speichern. Diese kann dann der Elektromotor wieder für den Vortrieb nutzen. Wenn man also die Stärken der beiden Motorenkonzepte miteinander kombiniert und dadurch Wirkungsgradverbesserungen erzielt, die die Verluste aus den Umwandlungen von mechanischer in elektrische Energie überkompensieren, kann man die Schwächen beider Antriebstechniken eliminieren und ein gutes Gesamtkonzept erhalten.

### 2.1.1 Niedervolt-Hybridantriebe

#### Micro-Hybrid

Da die Bezeichnung „Hybridantrieb“ spätestens seit dem Erfolg des Toyota Prius für die Autohersteller einen gewissen Reiz hatte, kamen sie schnell auf die Idee, schon die Start-Stopp-Automatik als Hybrid zu bezeichnen.

Doch die Micro-Hybrid-Antriebe sind nach der klassischen Definition gar keine Hybride, da ihre Kraft nicht aus mindestens zwei Energieumwandlern – also Motoren – stammt. Denn der Antrieb erfolgt hier ausschließlich über den Verbrennungsmotor. Deshalb arbeitet in diesen Fahrzeugen auch einzig das klassische 12-Volt-Bordnetz.

Charakteristisch für die Micro-Hybride ist eine Start-Stopp-Funktion mittels Startergenerator oder über einen verstärkten Schub-Schraubtrieb-Starter. Damit für die vielen Startvorgänge ausreichend Energie zur Verfügung steht, sind die Autos mit zyklentesten AGM-Batterien ausgestattet, und die Generatoren haben eine Leistung von 2 bis 4 kW.

Die Hersteller sprechen bei diesen Antrieben gerne davon, dass sie **rekuperationsfähig** seien, also Bewegungsenergie wieder in elektrische Energie umwandeln können.

Das ist jedoch nur eingeschränkt möglich. *Intelligente Generatorregelung* ist die bessere Bezeichnung für diese Funktion. Denn bei Ladezuständen des Akkus von mehr als 80 % lässt das Batteriemanagementsystem diesen vom Generator ausschließlich im Schubbetrieb nachladen. Dadurch lässt sich ein Teil der überschüssigen Bewegungsenergie des Autos in elektrische Energie umwandeln. In Beschleunigungssituationen kann man mit dieser Technik Kraftstoff sparen, weil in diesen Phasen der Generator abgekoppelt wird. Es ist jedoch nicht so, dass – wie bei einem Vollhybriden oder einem Elektroauto – die E-Maschine eine Bremsfunktion übernimmt, während sie als Generator arbeitet. Deshalb ist bei Micro-Hybrid-Fahrzeugen der Begriff *Bremsenergierückgewinnung* eher irreführend.

### Mild-Hybrid (MHEV)

Die sogenannten Mild-Hybrid-Antriebe unterteilen sich zwar ebenfalls in Hoch- und Niedervoltsysteme. Die Hochvoltsysteme – wie IMA (Integrated Motor Assist) von Honda – waren jedoch nur relativ kurze Zeit am Markt. Auch bei diesem System konnte der Elektromotor das Auto nicht allein antreiben. Er unterstützte den Benzinmotor vor allem beim Beschleunigen, aber auch bei gleichmäßiger Fahrt. Die Energie dafür gewann er durch Rekuperieren.

Aktuelle Mild-Hybrid-Systeme arbeiten meist mit einer Bordspannung von 48 Volt und sind deshalb Niedervoltsysteme. Sie können inzwischen Ähnliches leisten wie die Hochvolt-Mild-Hybridsysteme.

Ihr großer Vorteil: Mit ihnen können die Hersteller bei geringen Kosten einen guten Effekt erzielen. Allein dadurch, dass sie bei 48-Volt-Systemen nicht so strenge Sicherheitsanforderungen erfüllen müssen wie bei Hochvoltsystemen, sind die Systeme schon billiger. Weiterhin reichen im einfachsten Fall ein Startergenerator, ein DC/DC-Wandler, ein Steuergerät und eine zusätzliche 48-Volt-Batterie für das System aus.

Allein die vierfache Nennspannung gegenüber herkömmlichen 12-Volt-Bordnetzen ermöglicht es den Herstellern schon, den Verbrennungsmotor durch Boosten zu unterstützen sowie Aggregate mit hohem Leistungsbedarf elektrisch zu betreiben. Außerdem lässt sich bei diesem Spannungsniveau wesentlich besser Energie durch Rekuperieren zurückgewinnen als bei 12 Volt.

Ein zusätzlicher Vorteil ist, dass in einem 48-Volt-System genügend Energie zur Verfügung steht, um den Verbrennungsmotor in Schubphasen abzuschalten oder zumindest auszukuppeln und alle Nebenaggregate elektrisch zu betreiben – genau wie bei Hochvolt-Hybriden. Diese sogenannte Segelfunktion kann, je nach Fahrprofil, relativ viel Sprit sparen. Audi geht zum Beispiel davon aus, dass man mit einem 12-Volt-System den Kraftstoffkonsum um bis zu 0,4 Liter pro 100 Kilometer senken kann, ein 48-Volt-Hybrid soll dagegen mit bis zu 0,7 Litern weniger Kraftstoff auskommen.

Das 48-Volt-Netz ist dabei nur ein Teil des Bordnetzes. Die Autoproduzenten können also bewährte 12-Volt-Komponenten weiterverwenden und gleichzeitig neue Systeme einführen, die mehr Energie benötigen. Denn der 12-Volt-Teil des Bordnetzes wird über einen DC/DC-Wandler an das 48-Volt-Netz angekoppelt, das zum Hauptnetz avanciert.

Gespeist wird es von einem 48-Volt-Generator, der über einen Riemen angetrieben wird oder im bzw. am Getriebe integriert ist. Der notwendige Lithium-Ionen-Akku ist in etwa so groß wie eine Bleibatterie. Für das Thermomanagement genügt eine Luftkühlung, es gibt aber auch Systeme mit Flüssigkeitskühlung. Durch die 48-Volt-Technik können die Hersteller Nebenaggregate wie Pumpen und Kompressoren für Motor, Getriebe und Klimaanlage auf Elektroantrieb umstellen. Dadurch lassen sich diese Aggregate nach

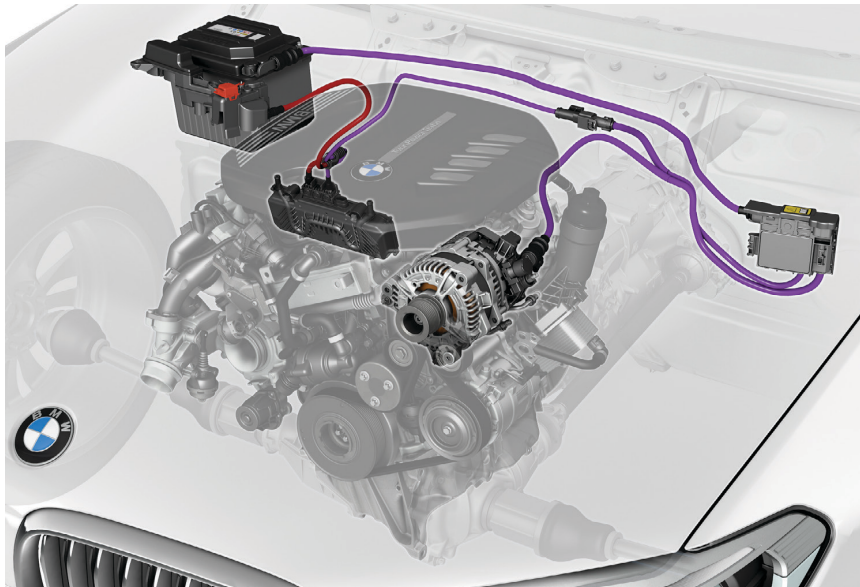
Bedarf steuern. Kleine Verbraucher wie Steuergeräte oder Leuchten bleiben hingegen im 12-Volt-Netz.

Um ein 48-Volt-Hybridsystem in den Antriebsstrang zu integrieren, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die Entwickler bezeichnen sie als sogenannte P-Varianten. Die Hersteller haben also eine gewisse Flexibilität beim Einsatz dieser Technik. Diese Varianten sind:

- P0: mit riemengetriebenem Startergenerator (RSG)
- P1: Elektromaschine auf der Kurbelwelle vor der Anfahrkupplung (integrierter Startergenerator ISG)
- P2: Elektromaschine koaxial zwischen einer zusätzlichen Trennkupplung und der Anfahrkupplung
- P3: Elektromaschine achsparallel an der Getriebeausgangswelle
- P4: Elektromaschine an der nicht angetriebenen Achse
- P5: Radnaben- oder radnahe Elektromaschinen an den Rädern der nicht angetriebenen Achse

Die einfachste Möglichkeit ist die **P0-Variante** mit dem riemengetriebenen Startergenerator. Dieser kann anstelle des herkömmlichen 12-Volt-Generators im Auto platziert werden. Dadurch lässt sich die Technik in Fahrzeugen integrieren, die nie für eine Hybridisierung konzipiert wurden. Ein Beispiel zeigt Bild 2.3.

Berücksichtigt ein Hersteller die 48-Volt-Hybridisierung bereits während der Entwicklung des Fahrzeugs, stehen ihm die weiteren Architekturen zur Verfügung, die die Effektivität des Antriebs noch einmal steigern.



**Bild 2.3**

Der einfache 48-Volt-Mild-Hybrid von BMW in P0-Anordnung besteht aus einem 48-Volt-Startergenerator und einer zusätzlichen Batterie, die die Rekuperationsenergie speichert. Beim Beschleunigen kann die E-Maschine den Verbrennungsmotor mit einer Leistung von 8 kW unterstützen. Dadurch kann dieser möglichst oft in einem effizienzoptimierten Lastbereich laufen.

[Bild: BMW]

Bei der **P2-Architektur** kann der Startergenerator ebenfalls über einen Riemen in den Antrieb integriert werden. Bei dieser Variante befindet sich der Riemenantrieb aber zwischen dem Getriebe und dem Verbrennungsmotor. Die E-Maschine ist dabei über zwei Kupplungen mit jeder Seite verbunden, die unabhängig voneinander und in beliebiger Kombination geöffnet und geschlossen werden können. Wegen der Position der

|            |   |             |
|------------|---|-------------|
| 8.1.1.4    | Das Hydraulikaggregat .....                                 | 1031        |
| 8.1.1.5    | Giermomentaufbauverzögerung .....                           | 1038        |
| 8.1.2      | Das ESP .....   | 1044        |
| 8.1.2.1    | Funktion .....  | 1038        |
| 8.1.2.2    | Hydraulisches System .....                                  | 1040        |
| 8.1.2.3    | Aktiver Bremsengriff .....                                  | 1041        |
| 8.1.2.4    | Die elektronische Regelung .....                            | 1043        |
| 8.1.2.5    | Die Stabilitäts-Regelung .....                              | 1045        |
| 8.1.2.6    | ABS/ESP-basierte Zusatzfunktionen .....                     | 1045        |
| <b>8.2</b> | <b>Fahrerassistenzsysteme .....</b>                         | <b>1046</b> |
| 8.2.1      | Grundlagen .....  | 1046        |
| 8.2.1.1    | Begriffsdefinition .....                                    | 1046        |
| 8.2.1.2    | Meilensteine in der Entwicklung von Assistenzsystemen ..... | 1047        |
| 8.2.2      | Die gesetzliche Mindestausstattung .....                    | 1048        |
| 8.2.3      | Automatisiertes Fahren .....                                | 1053        |
| 8.2.4      | Umfelderfassung .....                                       | 1055        |
| 8.2.4.1    | Das Prinzip der Echo-Ortung .....                           | 1056        |
| 8.2.4.2    | Ultraschallsensoren .....                                   | 1057        |
| 8.2.4.3    | Radarsensoren .....   | 1059        |
| 8.2.4.4    | Laser – Lidar .....   | 1071        |
| 8.2.4.5    | Videokamera .....   | 1073        |
| 8.2.4.6    | Wärmebildkamera .....                                       | 1081        |
| 8.2.5      | Längsführung .....  | 1083        |
| 8.2.5.1    | Geschwindigkeitsregelanlage (GRA) .....                     | 1083        |
| 8.2.5.2    | Adaptive Cruise Control (ACC) .....                         | 1084        |
| 8.2.5.3    | Bremsassistentz .....                                       | 1087        |
| 8.2.5.4    | Geschwindigkeitsassistentz .....                            | 1091        |
| 8.2.5.5    | Stauassistentz .....  | 1093        |
| 8.2.6      | Querführung .....   | 1094        |
| 8.2.6.1    | Fahrschlauch .....  | 1094        |
| 8.2.6.2    | Spurhalten .....  | 1096        |
| 8.2.6.3    | Spurwechsel .....   | 1098        |
| 8.2.6.4    | Fahrspurüberquerung .....                                   | 1101        |
| 8.2.7      | Parken .....  | 1103        |
| 8.2.7.1    | Anzeigesysteme für den Parkvorgang .....                    | 1103        |
| 8.2.7.2    | Halbautomatisiertes Einparken .....                         | 1107        |
| 8.2.7.3    | Vollautomatisches Einparken .....                           | 1109        |
| 8.2.7.4    | Querverkehrswarnung .....                                   | 1109        |
| 8.2.8      | Systemarchitektur .....                                     | 1111        |
|            | <b>Verzeichnis der Abkürzungen .....</b>                    | <b>1117</b> |
|            | <b>Stichwortverzeichnis .....</b>                           | <b>1123</b> |

## 3

## Verbrennungsmotoren

Kraftfahrzeuge werden zum großen Teil noch durch Verbrennungsmotoren angetrieben. Die Gebräuchlichsten sind:

- Ottomotoren (Erfinder: NIKOLAUS AUGUST OTTO)
- Dieselmotoren (Erfinder: RUDOLF DIESEL)

Bei der Verbrennung von Benzin, Diesel, Erdgas, Flüssiggas, Biodiesel (Rapsöl) oder Wasserstoff entsteht Wärme. Die daraus resultierende Ausdehnung der Verbrennungsgase erzeugt den Druck, der die Kolben treibt.

Im Verbrennungsmotor wird also ruhende (potenzielle) Energie in Bewegungsenergie (kinetische Energie) umgewandelt.

Je nach Bewegungsrichtung der angetriebenen Kolben unterscheidet man

- Hubkolbenmotoren und
- Kreiskolbenmotoren (Erfinder: ERNST FELIX WANKEL).

Mit Blick auf das Arbeitsverfahren unterscheidet man

- Viertaktmotoren und
- Zweitaktmotoren.

Aktuelle Verbrennungsmotoren (Viertaktmotoren) bestehen aus mehreren Systemen, die automatisch zusammenarbeiten:

- Kurbeltrieb und Ventilsteuerung
- Schmiersystem und Kühlsystem
- Gemischbildner und Zündsystem

### Unterschiede zwischen Otto- und Dieselmotoren

Der Ottomotor unterscheidet sich vom Dieselmotor hauptsächlich in der Gemischbildung und der Zündung.

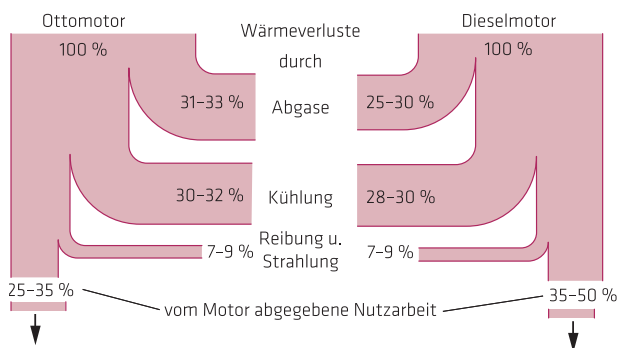
Beim Ottomotor mit Saugkanaleinspritzung wird der Kraftstoff mit der Luft im Ansaugrohr gemischt und gelangt dann über das geöffnete Einlassventil in den Zylinder. Dieses Kraftstoff-Luft-Gemisch wird komprimiert und kurz vor OT (Oberer Totpunkt) durch den Zündfunken der Zündkerze gezündet. Der Ottomotor mit Saugkanaleinspritzung hat somit eine äußere Gemischbildung und Fremdzündung. Bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung wird der Kraftstoff direkt in den Zylinder gespritzt, vermischt sich hier mit der angesaugten Luft und wird durch die Fremdzündung entzündet.

Beim Dieselmotor wird im Saughub nur Luft angesaugt, die anschließend im Verdichtungstakt sehr hoch verdichtet wird. Da sich beim Verdichten die Luft stark erwärmt, entzündet sich der Kraftstoff von selbst, wenn er wenige Grad Kurbelwinkel vor OT eingespritzt wird. Damit hat der Dieselmotor innere Gemischbildung und Selbstzündung.

Otto- und Dieselmotoren unterscheiden sich außerdem noch durch die in Tabelle 3.1 genannten Eigenschaften, wobei Dieselmotoren bis zu 50% Nutzarbeit bringen können.

**Tabelle 3.1**

| Ottomotoren  | Dieselmotoren  |
|--|--|
| <b>Verdichtungsverhältnis</b><br>bei Saugkanaleinspritzung 7 bis 11 : 1<br>bei Direkteinspritzung 11,5 ... 12,5 : 1                        | 15 bis 19,5 : 1 bei Direkteinspritzung                               |
| <b>Verdichtungshöchstdruck</b> bei<br>Starterdrehzahl u. Betriebstemperatur<br>8 bis 16 bar  | 25 bis 35 bar  |
| <b>Verdichtungshöchsttemperatur</b><br>ca. 400 °C (673 K)  | 500 bis 900 °C (773 K bis 1173 K)                                    |
| <b>Verbrennungshöchsttemperatur</b><br>ca. 2100 °C (2373 K)  | ca. 2100 °C (2373 K)   |
| <b>Verbrennungshöchstdruck</b><br>55 bis 80 bar bei Einspritz- bzw.<br>Turbomotoren  | 70 bis 90 bar bei Saugmotoren<br>120 bis 200 bar bei Turbomotoren    |
| <b>Restdruck im Zylinder</b><br>(kurz vor Öffnung des Auslassventils)<br>ca. 3 bis 5 bar   | ca. 7 bis 10 bar   |
| <b>Mittlerer Arbeitsdruck</b><br>ca. 8 bis 11 bar (Saugmotoren)<br>ca. 11 bis 15 bar (Turbomotoren)  | ca. 9 bis 12 bar (Saugmotoren)<br>ca. 13 bis 21,5 bar (Turbomotoren) |
| <b>Abgastemperatur bei Volllast</b><br>800 bis 1000 °C (1073 bis 1273 K)   | 400 bis 800 °C (673 bis 1073 K)                                      |
| <b>Wirkungsgrad</b><br>25 bis 35%  | 35 bis 50%   |
| <b>Spezifischer Kraftstoffverbrauch</b><br>230 bis 250 g/kWh   | 200 bis 230 g/kWh (Direkteinspritzung)                               |
| <b>Kohlenmonoxidgehalt der Abgase (Vol.-%)</b><br>0,5 bis 1,5% (im Leerlauf)<br>0,2 bis 1,0% (bei Teillast)<br>2,0 bis 4,0% (bei Volllast) | 0,03 bis 0,05% (im Leerlauf)<br>0,05 bis 0,25% (bei Volllast)        |
| <b>Flammpunkt der Kraftstoffe</b><br>-21 bis -23 °C (252 bis 250 K)  | +55 bis +100 °C (328 bis 373 K)                                      |
| <b>Selbstentzündungstemperatur der Kraftstoffe</b><br>etwa 500 bis 600 °C<br>(773 bis 873 K)   | etwa 300 bis 350 °C (573 bis 623 K)                                  |
| <b>Drehmoment bei niedriger Drehzahl</b><br>niedrig  | hoch   |



**Bild 3.1** Wärmeenergieverluste (Sankey-Diagramm)

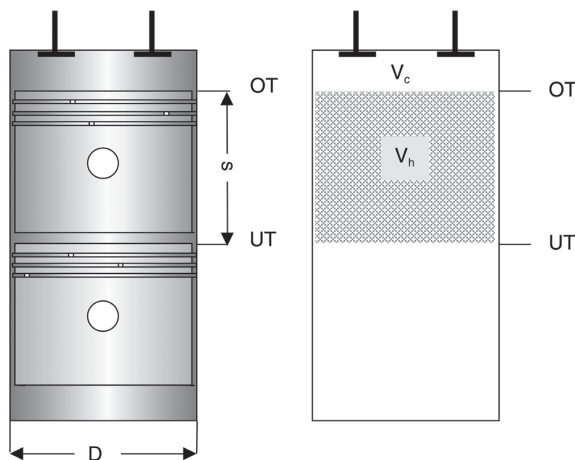
### Grundbegriffe

Die folgenden Begriffe gelten grundsätzlich für alle Arten von Hubkolbenmotoren.

**Bohrung:** Der Durchmesser eines Zylinders ( $D$ ) wird als Bohrung bezeichnet (Bild 3.2).

**Hub:** Der Hub ( $s$ ) ist der Weg, den der Kolben im Zylinder zwischen den Totpunkten zurücklegt.

Die **Totpunkte** sind die Endpunkte der Kolbenbewegung, in denen sich die Bewegungsrichtung umkehrt. Man unterscheidet den oberen Totpunkt (OT) und den unteren Totpunkt (UT). Im OT hat der Arbeitsraum (Zylinder) sein kleinstes, im UT sein größtes Volumen (Bild 3.2).



**Bild 3.2** Begriffe und Abmessungen bei Verbrennungsmotoren

**Hubraum:** Der Hubraum eines Zylinders ( $V_h$ ) ist der Raum, den der Kolben während eines Hubes durchläuft. Anders ausgedrückt: Es ist der Zylinderraum zwischen OT- und UT-Stellung des Kolbens (Bild 3.2).

$$\text{Berechnung: } \frac{\text{Bohrung} \cdot \text{Bohrung} \cdot 3,14 \cdot \text{Hub}}{4}$$

**Gesamthubraum:** Der Gesamthubraum eines Motors ( $V_H$ ) ist der Hubraum aller Zylinder des Motors. Er wird in Litern oder – bei kleinen Motoren (Zweitakt) – in Millilitern (ml) angegeben.

**Verdichtungsraum ( $V_C$ ):** Das ist der Raum, der über dem in OT-Stellung befindlichen Kolben verbleibt (Bild 3.2).

**Verdichtungsverhältnis:** Das Verdichtungsverhältnis ( $\varepsilon$ ) ist das Verhältnis von Hubraum und Verdichtungsraum zum Verdichtungsraum (Bild 3.3).

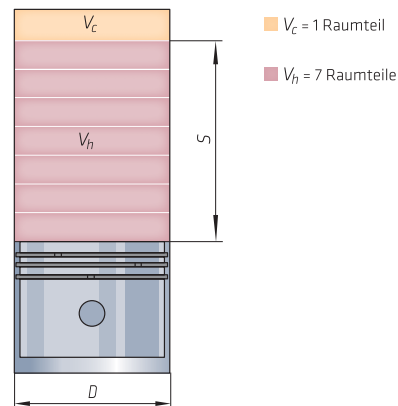
$$\varepsilon = \frac{\text{Hubraum} + \text{Verdichtungsraum}}{\text{Verdichtungsraum}}$$

Beispiel  $\varepsilon = \frac{V_H + V_C}{V_C}$

$$\varepsilon = \frac{7+1}{1}$$

$$\varepsilon = 8:1$$

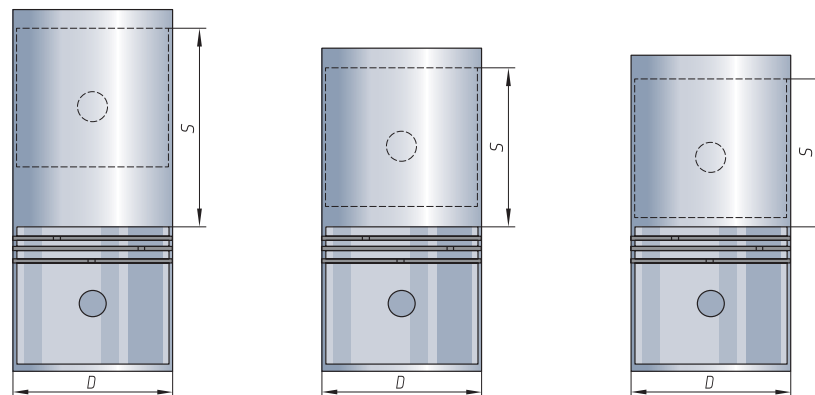
**Bild 3.3**  
Verdichtungsverhältnis



**Hub-Bohrungs-Verhältnis ( $s/D$ ):** Motoren werden ihrer Bauart gemäß in Lang- oder Kurzhuber unterteilt (Bild 3.4).

**Bild 3.4**  
Hub-Bohrungs-Verhältnis

- a) Langhuber:  $s$  größer als  $D$ ;
- b) Kurzhuber:  $s = D$ ;
- c) Kurzhuber:  $s$  kleiner als  $D$



Beim **Langhuber** ist der Hub ( $s$ ) größer als die Zylinderbohrung ( $D$ ), beim **Kurzhuber** ist der Hub kleiner oder gleich der Zylinderbohrung.

Motoren, bei denen Hub und Bohrung gleich groß sind, zählen zu den Kurzhubern. Man bezeichnet solche Motoren als **quadratische Motoren**, weil der Längsschnitt durch den Hubraum ein Quadrat darstellt.

**Beispiel** für einen quadratischen Motor:

Hub  $s = 68$  mm, Bohrung  $D = 68$  mm,

$$\text{Hub-Bohrungs-Verhältnis } \frac{s}{D} = \frac{68}{68} = 1:1$$

Beim quadratischen Motor ist das Hub-Bohrungs-Verhältnis 1:1.

Bei langhubigen Motoren liegt das Hub-Bohrungs-Verhältnis über 1, daher auch die Bezeichnung eines solchen Motors als überquadratisch.

**Beispiel:** Hub  $s = 100$  mm, Bohrung  $D = 80$  mm,

$$\text{Hub-Bohrungs-Verhältnis } \frac{s}{D} = \frac{100}{80} = 1,25:1$$

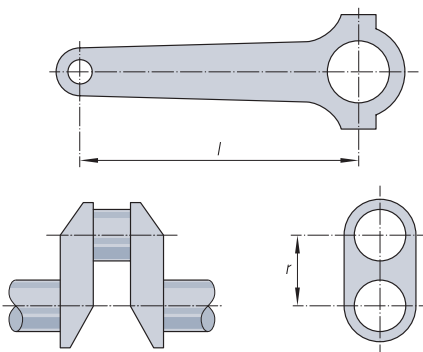
Ist die Bohrung größer als der Hub, liegt das Hub-Bohrungs-Verhältnis unter 1. Daher bezeichnet man solche Motoren als **unterquadratisch**.

**Beispiel:** Hub  $s = 64$  mm, Bohrung  $D = 77$  mm,

$$\text{Hub-Bohrungs-Verhältnis } \frac{s}{D} = \frac{64}{77} = 0,8:1$$

**Kurbel- oder Pleuelstangenverhältnis** ( $\lambda$  Lambda): Es bezeichnet das Verhältnis des Kurbelradius ( $r$ ) zur Pleuelstangenlänge ( $l$ ):

$$\text{Kurbelverhältnis } \lambda = \frac{r}{l}$$



**Bild 3.5**

Kurbel- oder Pleuelstangenverhältnis

## 4

## Gemischbildung und Verbrennung bei Ottomotoren

### Gemischbildung

Man unterscheidet bei Ottomotoren – wie auch bei Dieselmotoren – zwischen äußerer und innerer Gemischbildung. Die überwiegend angewendete äußere Gemischbildung wurde früher durch Saugkanaleinspritzung erreicht, während sie heute nur noch durch Direkteinspritzung des Kraftstoffs in die Motorzylinder erfolgt. Von innerer Gemischbildung spricht man, wenn der Kraftstoff direkt in die Zylinder eingespritzt wird. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass der Wirkungsgrad und somit der Kraftstoffverbrauch auf das Niveau des Dieselmotors gesenkt werden können.

Ein Ottomotor benötigt ab ca. 40°C Kühlmitteltemperatur ein bestimmtes Kraftstoff-Luft-Verhältnis. Das ideale theoretische Kraftstoff-Luft-Verhältnis für eine vollständige Verbrennung liegt vor, wenn 1 kg Kraftstoff mit 14,7 kg Luft (1:14,7) gleichmäßig (homogen) vermischt wird (entspricht einem Volumenverhältnis von 1:10 000, 1 l Benzin und 10 000 l Luft). Das nennt man auch *stöchiometrisches Verhältnis*. Es besteht dann, wenn die vom Motor angesaugte Luftmasse, d.h. die zugeführte Luftmasse, dem theoretischen Luftbedarf entspricht. Das Verhältnis zwischen den Luftmassen wird mit der Luftzahl bzw. mit dem Luftverhältnis (Lambda) gekennzeichnet. So errechnet sich das Luftverhältnis immer aus:

$$\text{Lambda}(\lambda) = \frac{\text{zugeführte Luftmasse}}{\text{theoretischer Luftbedarf}}$$

$\lambda = 1$ : Die zugeführte Luftmasse entspricht der theoretischen (notwendigen) Luftmasse.

$\lambda < 1$ : Es besteht Luftmangel mit etwa 10% oder Vollastbetrieb mit fetterem Gemisch bei  $\lambda = 0,9$ .

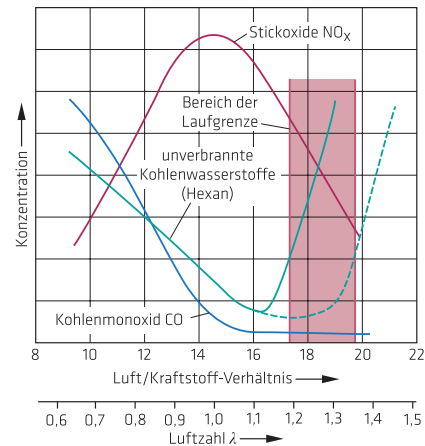
$\lambda > 1$ : Es besteht Luftüberschuss mit etwa 10% oder ein mageres Gemisch bei  $\lambda = 1,1$ .

Bei einem Kraftstoff-Luft-Verhältnis von ungefähr 1:11 ( $\lambda = 0,75$ ) und ca. 1:18 ( $\lambda = 1,25$ ) ist das Gemisch im Normalfall nicht mehr einwandfrei brennfähig (Bild 4.1). Es treten Verbrennungsaussetzer auf, die sich auf die Laufruhe des Motors auswirken, und der Schadstoffausstoß nimmt enorm zu. Nur bei sogenannten Magergemischmotoren mit Schichtladung, d.h. mit einem kleinen Anteil normalen Gemischs zur Einleitung der Verbrennung und einem großen Anteil mageren Gemischs, ist der Betrieb störungsfrei.

**Bild 4.1**

Verlauf der Konzentration von  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  und der unverbrannten Kohlenwasserstoffe über dem Kraftstoff-Luft-Verhältnis bzw. der Luftzahl  $\lambda$ .

[Bild: Bosch]



Die Gemischzusammensetzung muss den unterschiedlichen Betriebszuständen und Temperaturen des Motors angepasst werden. Zunächst interessiert die Kraftstoffgrundmenge. Das ist die Kraftstoffmenge, die der betriebswarme Motor ab etwa  $40^\circ\text{C}$  im Leerlauf und bei Teillastbetrieb benötigt. Bei einem Ottomotor mit katalytischer Abgasnachbehandlung durch einen Drei-Wege-Katalysator und Lambda-Regelung muss dabei das Gemischverhältnis von exakt  $\lambda = 1$  eingehalten werden. Bei allen anderen Betriebszuständen reicht die Kraftstoffgrundmenge nicht aus. Das bedeutet, die Kraftstoffmenge muss im Verhältnis zur angesaugten Luftmasse entsprechend vergrößert werden. Dieser als Anreicherung bezeichnete Vorgang setzt bei den folgenden Fahrsituationen ein.

- **Kaltstart:** Beim Kaltstart magert das Kraftstoff-Luft-Gemisch temperaturabhängig ab. Das geschieht wegen der ungenügenden Durchmischung von Kraftstoff und Luft, der starken Wandbenetzung von Saugkanal und Zylinder und der geringen Verdampfung des Kraftstoffs. Nur die leicht siedenden Kraftstoffanteile verdampfen, und das sind höchstens 60% der Gesamtmenge. Um dies auszugleichen, muss das 2- bis 3-Fache der Kraftstoffgrundmenge zugeführt werden (Kaltstartanreicherung).
- **Nachstartphase:** Nach dem Startvorgang muss bei niedrigen Temperaturen für kurze Zeit – zusätzlich zur Kraftstoffgrundmenge – mehr Kraftstoff eingespritzt werden, damit der Motor gut hochläuft und seine Leerlaufdrehzahl erreicht.
- **Warmlaufphase:** Im Anschluss an die Nachstartphase beginnt die Warmlaufphase. Der Motor wäre mit der Kraftstoffgrundmenge noch nicht lauffähig, weil immer noch zu viel von den schwer siedenden Kraftstoffanteilen an den Wandungen niederschlagen würden. Erst mit zunehmender Motortemperatur, wenn immer mehr Kraftstoff verdampft, wird gleichmäßig die Warmlaufenreicherung zurückgenommen und bei etwa  $40^\circ\text{C}$  nur noch die Kraftstoffgrundmenge eingespritzt.
- **Übergang:** Als Übergang bezeichnet man das Betätigen der Drosselklappe z.B. aus der Leerlauf- in die Teillaststellung. Da aufgrund des relativ hohen Unterdrucks mit starker Saugwirkung die Saugkanalwandungen trocken sind, setzt beim Öffnen der Drosselklappe zuerst eine Wandbenetzung mit den schwer siedenden Kraftstoffanteilen ein. Da dieser Anteil zur Gemischbildung fehlt, muss

für kurze Zeit etwas mehr als die Grundmenge eingespritzt werden (Übergangsanreicherung). Das Gemischverhältnis ändert sich von 1:14,7 ( $\lambda = 1$ ) auf 1:13 ( $\lambda = 0,9$ ).

- **Beschleunigung:** Beim schnellen Öffnen der Drosselklappe entstehen die gleichen Verhältnisse wie beim Übergang. Es kommt zur Abmagerung des Kraftstoff-Luft-Gemischs, weil ein Teil der Kraftstoffmenge – es sind wieder die schwer siedenden Anteile – zur Wandbenetzung verloren geht. Um kein „Beschleunigungsloch“ entstehen zu lassen, muss kurzzeitig mehr als die normal bemessene Einspritzmenge eingespritzt werden (Beschleunigungsanreicherung). Das Gemischverhältnis ändert sich kurzzeitig von 1:14,7 ( $\lambda = 1$ ) auf 1:13 ( $\lambda = 0,9$ ).
- **Volllast:** Bei voll geöffneter Drosselklappe soll der Motor im mittleren Drehzahlbereich sein höchstes Drehmoment bzw. bei hoher Drehzahl seine höchste Leistung abgeben. Das bedarf einer Änderung des Kraftstoff-Luft-Gemischverhältnisses (nur bei klein-, selten bei großvolumigen Motoren erforderlich) von 1:14,7 ( $\lambda = 1$ ) auf 1:13 ( $\lambda = 0,9$ ). Damit durch die leichte Anfettung des Gemischs die Innenkühlung verbessert wird, die Brenngeschwindigkeit zunimmt und eine schnellere Energiefreisetzung stattfindet. Der Nachteil ist, dass der Gehalt an Kohlenoxid (CO) und unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC) ansteigt, während die Stickoxide abfallen (Bild 4.1).
- **Höhenkorrektur:** Mit zunehmender Höhe (Bergfahrten) nimmt die Dichte der Luft ab. Das vom Motor angesaugte Luftvolumen besitzt dann eine kleinere Masse als auf Meereshöhe. Die Folge ist eine starke Anreicherung mit erhöhtem Schadstoffausstoß. Außerdem nimmt die Motorleistung pro 100 m Höhenzunahme um 1% ab. Um den erhöhten Schadstoffausstoß und den Kraftstoffmehrerbrauch zu verringern, muss in diesem Fall das Gemischverhältnis wieder magerer, d.h. die Kraftstoffmenge verringert werden.

### Verbrennung bei Motoren mit Saugkanaleinspritzung

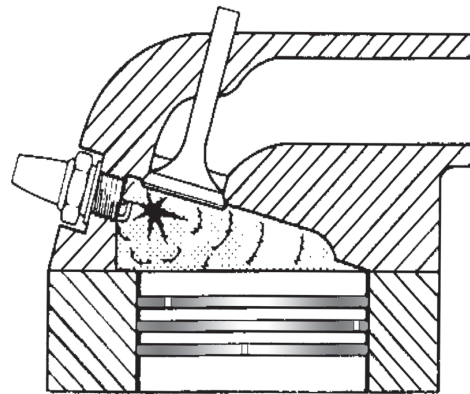
Wenn der Zündfunke an den Elektroden der Zündkerze überspringt, entzündet sich nach dem Entflammverzug (mit dem Zündverzug beim Dieselmotor vergleichbar) das angesaugte und weitgehend gasförmig gewordene Kraftstoff-Luft-Gemisch. An der Zündkerze bildet sich zunächst eine kleine Flamme. Diese entwickelt sich weiter und breitet sich etwa kugelförmig aus, wobei eine Flammenfront den Brennraum mit zunehmender Geschwindigkeit durchläuft. Dabei hängt die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit von der Form des Brennraums, von den Temperaturverhältnissen und vom Kraftstoff-Luft-Verhältnis ab. Die Verbrennungsgeschwindigkeit ist immer dann besonders hoch, wenn hohe Temperatur, hoher Druck und starke Verwirbelung herrschen und Luftverhältnisse von  $\lambda = 0,9$  bis 1,0 vorliegen.

Die Geschwindigkeit der sich ausbreitenden Flamme ist nicht gleichbleibend. Sie ist zu Beginn der Verbrennung, wenn der Verbrennungsdruck noch niedrig ist, gering. Mit ansteigendem Verbrennungsdruck nimmt sie laufend zu, erreicht dann den höchsten Wert etwa beim Erreichen des höchsten Verbrennungsdrucks unmittelbar nach OT, um danach wieder – durch die Wärmeableitung und beginnende Expansion im Arbeitstakt – abzusinken. Die beim Verbrennungsablauf auftretende mittlere Verbrennungsgeschwindigkeit liegt am Anfang bei etwa 8 bis 10 m/s und erhöht sich bis auf etwa 30 m/s. Mit steigender Motordrehzahl und der dabei auftretenden stärkeren Durchwirbelung des Kraftstoff-Luft-Gemischs nimmt die Brenngeschwindigkeit in etwa gleichem Verhältnis zu, sodass die bei höheren Drehzahlen immer kürzeren für die Verbrennung zur Verfügung

stehenden Zeiträume ausreichend bleiben. Die Zeit, die z.B. bei  $5000 \text{ min}^{-1}$  für den Verbrennungsablauf zur Verfügung steht, beträgt etwa  $0,001 \text{ s}$ . Das bedeutet, dass bei angestrebter *Gleichraumverbrennung*, bei der der größte Gemischanteil im Bereich des oberen Totpunkts verbrennen soll, um einen guten Wirkungsgrad zu erzielen, nur etwa  $30^\circ$  bis  $40^\circ \text{ KW}$  zur Verfügung stehen.

Vor der sich schnell ausbreitenden Flammenfront befindet sich immer noch ein Teil unverbrannten Gemischs, das als Endgas bezeichnet wird. Dieses Endgas wird sowohl vom weiter zum OT hinlaufenden Kolben als auch durch die Verbrennungsdruckwelle zunehmend verdichtet. Durch diesen Vorgang und durch die Strahlungswärme, die von der Flamme ausgeht, wird das Endgas einer hohen Temperatur ausgesetzt. Der Kraftstoff muss jetzt so klopfest (wärmewiderstandsfähig) sein, dass die Verbrennung normal abläuft, d.h. die Flamme das Endgas ganz verzehrt, ohne dass eine Eigenzündung eintritt (Bild 4.2). Nur dann wird ein gleichmäßiger weicher Druckanstieg und eine entsprechend weiche und zügige Kolbenkraft erzeugt.

**Bild 4.2**  
Verbrennungsablauf ohne Eigenzündung



### Verbrennung bei Motoren mit Direkteinspritzung

Die Verbrennung bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung gibt es in verschiedenen Betriebsarten. Im Homogen-Betrieb erfolgt eine gleichmäßige Gemischbildung im Brennraum wie bei einem Motor mit Saugrohreinspritzung. Im Schichtbetrieb, der oberhalb der Leerlaufdrehzahl im Teillastbetrieb besteht, erfolgt die Einspritzung in den Verdichtungstakt. Dadurch läuft die Hauptverbrennung sehr schnell ab, sodass das Einspritzende und der Zündzeitpunkt relativ spät vor OT erfolgen können. Zusammen mit einer Mehrfachzündung – bis zu vier Funken innerhalb einer Millisekunde – wird auch bei einem mageren Gemisch für eine sichere Verbrennung gesorgt.

**Klingelnde bzw. klopfende Verbrennung:** Erreicht das Endgas die kritische Phase, in der es der ständig zunehmenden Wärmebelastung nicht mehr standhält, entzündet es sich von selbst und verbrennt dann so schlagartig mit einer Flammgeschwindigkeit von etwa  $300 \text{ m/s}$ , dass auch der Druck schlagartig ansteigt (Bild 4.3). Dieser löst Druckwellen aus, die das bekannte „Klingeln“ oder im Extremfall „Klopfen“ verursachen und Triebwerksteile in Schwingungen versetzen. Neben den auftretenden Schwingungen ist im Vergleich zur normalen Verbrennung ein höherer Verbrennungsspitzenwert entstanden. Dieser höhere Druck – verbunden mit einem steilen schlagartigen Druckanstieg – führt zu einer

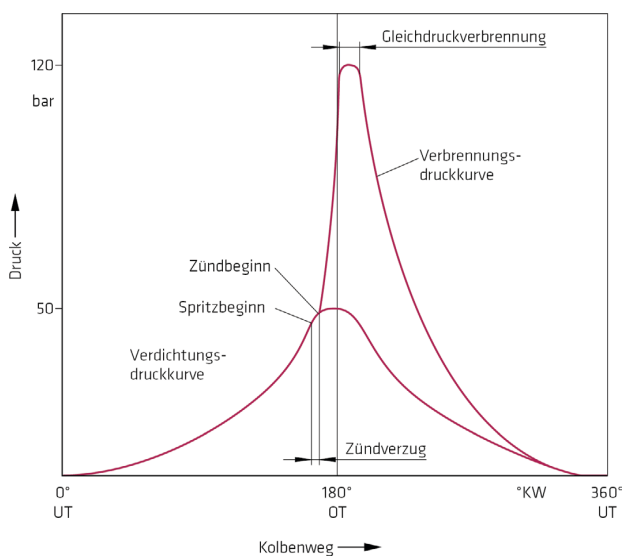


## 5

## Gemischbildung und Verbrennung bei Dieselmotoren

Beim Dieselmotor wird der Kraftstoff erst am Ende des Verdichtungstakts durch das Hochdruck-Einspritzsystem mit hohem Druck (bis ca. 2700 bar) über die Einspritzdüse in 2 bis 5 Stufen fein zerstäubt in die 500 bis 900°C heiße Luft des Verbrennungsraums gespritzt. Der Einspritzzeitpunkt ist dabei drehzahl- und lastabhängig. Er liegt bei Vollast und hoher Drehzahl bei ca. 20 bis 35°KW vor OT und bei Leerlaufdrehzahl etwa im OT. Nach dem Verdampfen des in der 1. bzw. 2. Stufe eingespritzten kleineren Kraftstoffanteils (1,5 bis 2,0 mm<sup>3</sup>) und Vermischen mit der Ansaugluft (innerhalb des Zündverzugs) kommt es zur Selbstzündung (Entflammung). Der danach in der 2. bis 3. Stufe eingespritzte größere Kraftstoffanteil wird in die bestehende Flamme gespritzt und entflammt ohne Zündverzug.

Durch die länger anhaltende Kraftstoffeinspritzung (bei Vollast über 20°KW) versucht man mit einer gleichmäßigen Kraftstoffzufuhr die Verbrennung so zu steuern, dass der Verbrennungsdruck (Zünddruck) nicht zu schlagartig ansteigt (Bild 5.1) und der Höchst- druck direkt nach OT kurzzeitig auf fast gleicher Höhe gehalten wird (annähernd Gleichdruckverbrennung). Der hohe Verbrennungs- bzw. Zünddruck (80 bis 200 bar) wirkt auf den Kolben und treibt ihn nach unten.



**Bild 5.1**

*P-V-Diagramm für Verdichtung und Verbrennung im Dieselmotor*

### Zündverzug

**Zündverzug bei normaler Verbrennung:** Die zwischen dem Einspritzbeginn (Beginn der Gemischaufbereitung) und dem Beginn der Verbrennung (Zündbeginn) liegende Zeit wird als Zündverzug bezeichnet (Bild 5.1). Dieser Zündverzug entsteht, weil die in der 1. Stufe eingespritzte kleine Kraftstoffmenge sich nicht sofort entzündet. Sie muss sich zunächst erwärmen, dann verdampfen und mit der Verbrennungsluft vermischen, bevor ein brennfähiges Kraftstoff-Luft-Gemisch gebildet wird. Der Zündverzug beträgt unter normalen Bedingungen, d.h. bei betriebswarmem Motor, etwa 1 ms. Er hängt hauptsächlich ab von

- der Zündwilligkeit des Kraftstoffs (der Cetanzahl),
- der Verdichtungsendtemperatur,
- dem Einspritzzeitpunkt,
- dem jeweiligen Belastungszustand des Motors.

**Zündverzug bei nagelnder bzw. klopfender Verbrennung:** Zu einer nagelnden oder klopfenden Verbrennung kommt es immer dann, wenn sich der Zündverzug auf über 2 ms vergrößert hat durch

- zu niedrige Motortemperatur (Kaltstart, Ausfall des Nachglühens),
- zu früh einsetzende Förderung des Einspritzsystems,
- nicht zerstäubende Einspritzdüsen (hängende Düsennadel bzw. Injektornadel),
- zu geringe Verdichtung (durch einen Kolbenfresser oder verbogenes Pleuel),
- zündträgen Kraftstoff mit zu geringer Cetanzahl (z.B. Ottokraftstoff, Dieselmotorkraftstoff ohne ausreichenden Zündbeschleuniger (Additiv) oder überlagerter (überalterter) Dieselmotorkraftstoff).

Während des größeren Zündverzugs und weiter bestehender Einspritzung sammelt sich eine größere Kraftstoffmenge im Verbrennungsraum an, bis die Zündbedingungen erreicht sind. Der bis zu diesem Zeitpunkt angesammelte Kraftstoffanteil verbrennt dann schlagartig unter steilem Zünddruckanstieg. Je größer der Zündverzug – also je größer die angesammelte Kraftstoffmenge im Brennraum –, desto steiler wird dieser Druckanstieg, d. h., die Verbrennung läuft 10 bis 12 Mal schneller ab als normal (normale mittlere Brenngeschwindigkeit 25 bis 30 m/s).

Der Verbrennungshöchstdruck (Zünddruck) kann dabei weit über die normale Höhe (80 bis 200 bar) ansteigen und Kolben sowie Kurbeltrieb sehr hoch belasten. Das dabei auftretende harte Verbrennungsgeräusch bezeichnet man als „Dieselnageln“ oder im extremen Fall als „Dieselklopfen“. Das harte Dieselnageln entsteht immer dann, wenn die Druckschwingungen, die von dieser gestörten Verbrennung ausgesendet werden, mit überhöhter Geschwindigkeit aufeinander oder auf die Brennraumwandungen treffen. Dagegen stellt sich das dumpfere Dieselklopfen ein, wenn die Druckschwingungen den ganzen Kurbeltrieb zum Aufschwingen bringen.

Die Folgen einer klopfenden Verbrennung können sein:

- Gebrochene Kolbenringstege
- Durchgeschlagene Zylinderkopfdichtung
- Zerstörte Kurbeltrieblagerung

## 5.1 Abgase und Abgasnachbehandlung von Dieselmotoren

### 5.1.1 Abgaszusammensetzung

Die Abgase beim Dieselmotor werden in Nichtschadstoffe und Schadstoffe unterteilt.

Zu den Nichtschadstoffen gehören: Stickstoff ( $N_2$ ), Kohlendioxid ( $CO_2$ ), Sauerstoff ( $O_2$ ), Wasserdampf ( $H_2O$ ) und Edelgase.

Zu den Schadstoffen zählen: Kohlenoxid ( $CO$ ), Kohlenwasserstoffe ( $HC$ ), Stickoxide ( $NO_x$ ), Schwefeldioxid ( $SO_2$ ) und Ruß in Form von kleinen Partikeln.

Der Nichtschadstoff Kohlendioxid ( $CO_2$ ) entsteht bei der motorischen Verbrennung von Kohlenstoff ( $C$ ) aus dem fossilen Kraftstoff und dem Sauerstoff ( $O_2$ ) aus der Verbrennungsluft. Kohlendioxid dient als Maßstab für die Güte einer motorischen Verbrennung. Ist der Kohlendioxidanteil im Abgas hoch, muss auch zwangsläufig der Kohlenoxidanteil gering sein.

### 5.1.2 Schadstoffentstehung

Grundsätzlich arbeitet der Dieselmotor mit Luftüberschuss, im Leerlauf mit ca. 400 bis 500% (entspricht  $\lambda = 5$  bis 6) und bei Vollast immer noch 20 bis 50% (entspricht  $\lambda = 1,2$  bis 1,5). Trotz des großen Luftüberschusses können genügend Schadstoffe entstehen, weil bei konventionellen Motoren ohne Hochdruckeinspritzung im Brennraum aufgrund der inneren Gemischbildung während der Einspritzphase bzw. des Verbrennungsablaufs unterschiedliche Kraftstoffkonzentrationen bzw. unterschiedliche Kraftstoff-Luft-Verhältnisse bestehen. Das bedeutet, dass in der Einspritzphase in manchen Bereichen des Brennraums großer Luftüberschuss und in anderen Bereichen Luftmangel bestehen kann. In den Bereichen mit großem Luftüberschuss, z.B. am äußeren Rand des Kraftstoffstrahls, verdampfen die kleinen Kraftstofftröpfchen vollständig und verbrennen fast vollkommen, sodass nur geringe Mengen Kohlenoxid und Kohlenwasserstoffe entstehen. Dagegen kann im Zentrum des Kraftstoffstrahls Luftmangel bestehen. Das bedeutet, die Kraftstofftröpfchen verdampfen und verbrennen nicht vollständig. Durch die hohe Temperatur, den hohen Druck und den Sauerstoffmangel kommt es zur Aufspaltung (Cracken) der normalen langkettigen in kurzkettige Kraftstoffmoleküle. Da diese sehr viel langsamer als die normalen Kraftstoffmoleküle reagieren, d.h. in Kohlenstoff und Wasserstoff zerfallen, nimmt die Brenngeschwindigkeit stark ab. Das geht so weit, dass am Ende der Verbrennung nur noch reaktionsträger Kohlenstoff übrig bleibt. Gelingt es nicht, in der verbleibenden kurzen Zeit diesen Kohlenstoff mit ausreichend Sauerstoff zu versorgen, verbrennt er nicht mehr und verlässt den Brennraum als Rußpartikel. Mit der sogenannten Hochdruckeinspritzung und dem Bestreben, eine homogene Gemischbildung entstehen zu lassen, werden diese Vorgänge im Brennraum des Dieselmotors vermieden.

**Rußpartikel:** Das sind feste Teilchen im Abgas, die im Kern aus reinem Kohlenstoff ( $C$ ) bestehen. An diesen Rußkern haben sich aromatische Kohlenwasserstoffverbindungen, Metalloxide, Verbrennungswasser und geringe Mengen Schwefel als Sulfat (Salz der Schwefelsäure) angelagert. Ruß als reiner Kohlenstoff gilt als gesundheitlich unbedenklich, während die angelagerten aromatischen Kohlenwasserstoffverbindungen Krebs erregende Wirkung haben sollen.

**Feinstaub:** Die Rußpartikel, die mit dem bloßen Auge nicht erkennbar sind, bezeichnet man als Feinstaub. Diese feinsten Partikel haben eine Größe von etwa  $2,5 \mu\text{m}$  ( $0,0025 \text{ mm}$ ) und stellen ein Problem dar, denn sie gelangen in die Luft und werden eingeatmet. Feinstaub bedeutet ein hohes Risiko für die Gesundheit. Es gilt: Je kleiner die Partikel, desto gefährlicher sind sie, weil sie noch tiefer in die Lunge eindringen können. Aus dem Grund verlangt der Gesetzgeber für Dieselfahrzeuge den Partikelfilter.

**Schadstoffeigenschaften** (siehe Kapitel 4.1)

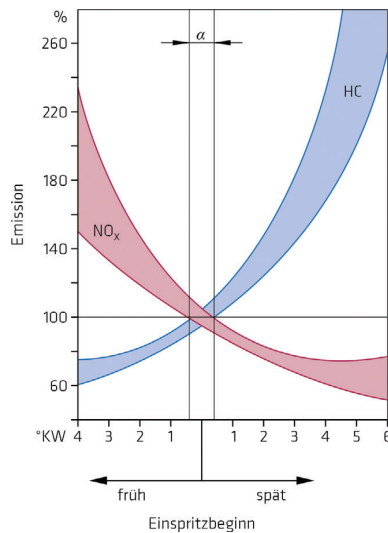
### 5.1.3 Schadstoffminderung

Der Anteil und die Zusammensetzung des Dieselabgases können beeinflusst werden durch

- die Gestaltung des Brennraums,
- eine sorgfältige Abstimmung der Luftbewegung (Drallbewegung) im Brennraum mit dem Ziel, ein homogenes Gemisch entstehen zu lassen, und durch den Einsatz von Abgasturboladern,
- den Einsatz von Hochdruck-Einspritzsystemen mit Einspritzdrücken bis etwa 2700 bar,
- eine äußere Abgasrückführung,
- schwefelfreien Dieselmotorkraftstoff.

Einen großen Einfluss auf die Schadstoffbildung und -mengen haben Einspritzbeginn, Einspritzdauer und Zerstäubung des Kraftstoffs. Der Einspritzbeginn bestimmt, abhängig vom Zündverzug, den Verbrennungsbeginn. Zum Beispiel verringert ein später Einspritzbeginn den  $\text{NO}_x$ -Anteil im Abgas. Allerdings lässt ein zu später Einspritzbeginn den HC-Anteil und den Kraftstoffverbrauch wieder ansteigen (Bild 5.2). Die Einspritzdauer muss so auf die Verhältnisse im Brennraum abgestimmt werden, dass pro Grad Kurbelwinkel nur die Kraftstoff-Volllastmenge eingespritzt wird, die sich in der kurzen Zeit auch mit der Luft vermischen kann. Das erfordert außerdem einen Luftüberschuss von mindestens 20 bis 50% ( $\lambda = 1,2$  bis  $1,5$ ), da sonst der Partikelanteil zu hoch ansteigt. Den geringen Partikelausstoß erreicht man bei der neuen Dieselmotorengeneration mit der Hochdruckeinspritzung. Durch den hohen Einspritzdruck bis ca. 2700 bar wird einmal der Kraftstoff sehr gut in der Verbrennungsluft verteilt und außerdem so fein zerstäubt, dass die Kraftstofftröpfchen sofort verdampfen, sodass kaum erkennbare Rußpartikel entstehen.

Die Kraftstoffqualität hat ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf die Schadstoffanteile im Abgas. Je nach Art und Anteil der Kraftstoffzusätze (Additive) im Dieselmotorkraftstoff lassen sich die Schadstoffanteile vermindern. Das als Zündbeschleuniger zugegebene Additiv bestimmt die Cetanzahl und somit den chemischen Zündverzug und der wiederum hat Einfluss auf die  $\text{NO}_x$ -Bildung. Dabei gilt: Je höher die Cetanzahl, desto geringer der  $\text{NO}_x$ -Anteil im Abgas. Durch die Herabsetzung des Schwefelgehalts von früher 0,15 Gew.-% auf 0,05 Gew.-% hat der Ausstoß von Schwefeldioxid abgenommen. Da sich Schwefel als Sulfat an Rußpartikel anlegt, ist auch der Partikelausstoß um ca. 15 Gew.-% zurückgegangen.

**Bild 5.2**

Einfluss des Spritzbeginns auf Stickoxid- und Kohlenwasserstoffemission

#### 5.1.4 Abgasrückführung bei Dieselmotoren

Die Abgasrückführung (Bild 5.3) ist eine Maßnahme, mit der im Leerlauf und immer im Teillastbereich die Bildung von Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ) und somit die Bildung von bodennahem Ozon ( $\text{O}_3$ ) verringert wird. Stickoxide bilden sich in größeren Mengen, wenn die Verbrennung bei Luftüberschuss und dann in verschiedenen Bereichen des Brennraums mit zu hoher Temperatur von ca.  $2500^\circ\text{C}$  ( $2773\text{ K}$ ) abläuft. Dabei verbindet sich der Sauerstoff mit dem Stickstoff der Verbrennungsluft zu Stickoxid bzw. Stickdioxid (zusammengefasst als  $\text{NO}_x$ ).

Die Abgasrückführung ist bei Dieselmotoren erforderlich, da diese bei Teillast mit einem besonders großen Luftüberschuss arbeiten. Durch das zurückgeführte Abgas, das sich als unbeteiligtes Gas (Inertgas) verhält und der Frischluft beigemischt wird, erreicht man

1. einen um ca. 20 bis 60% verringerten Sauerstoff- und Stickstoffanteil im Zylinder,
2. eine Herabsetzung der Verbrennungshöchsttemperatur von etwa  $2500^\circ\text{C}$  ( $2773\text{ K}$ ) auf ca.  $2000^\circ\text{C}$  ( $2273\text{ K}$ ). Diese Wirkung wird noch erhöht, wenn die zurückgeführten Abgase vor dem Eintritt in das Frischluftsystem gekühlt werden.

Da die Abgasgrenzwerte immer weiter gesenkt wurden, kam die kombinierte Hoch- und Niederdruckabgasrückführung zum Einsatz. Bei der Hochdruckabgasrückführung wird hinter dem Auslassventil ein Teil des Abgasstroms abgenommen und der Frischluft des Ansaugsystems zugeführt. Dadurch wird jedoch ein Teil der Antriebsenergie des Turboladers abgezweigt, was den Ladedruck reduzieren kann. Strömen die Abgase durch einen AGR-Kühler, sinkt der Stickoxidausstoß weiter ab. In dem AGR-Kühler lagern sich im Laufe der Zeit Rußpartikel, Asche sowie andere Verbrennungsrückstände an, wodurch die Kühlleistung und der Abgasdurchsatz reduziert werden.

Wird der AGR-Kühler mit Kühlwasser durchströmt, kann bei einem Defekt das Kühlwasser in die Abgasanlage oder in den Brennraum gelangen, was zu Motorschäden führen kann. Im Kühlwasser kann dann Abgas nachgewiesen werden, worauf schon erfolglos Zylinderkopfdichtungen getauscht wurden.

## 6

## Kraftübertragung

Als Kraftüberträger bezeichnet man sämtliche Bauteile des Kraftfahrzeugs, die dazu dienen, die „Dreharbeit“ (das Drehmoment) des Motors auf die Antriebsräder zu übertragen.

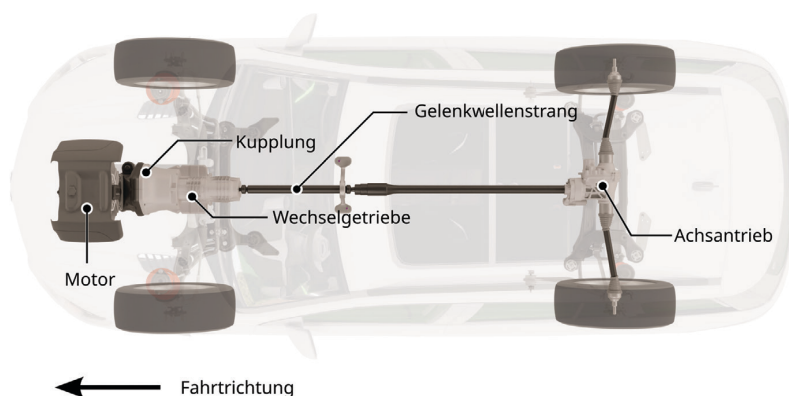
Die Kraftübertragung erfolgt über folgende Teile:

- Kupplung, Wechselgetriebe, Verteilergetriebe (bei Allradantrieb), Gelenkwellen (Kardanwellen),
- Winkelgetriebe, Ausgleichsgetriebe und bei Schwerlast-Kraftfahrzeugen Radvorgelegeantrieb.

Man unterscheidet folgende Antriebsarten:

- Standardbauweise (Hinterradantrieb)
- Heckantrieb
- Hinterradantrieb mit Mittelmotoranordnung
- Frontantrieb (Vorderradantrieb)
- Allradantrieb (Vorder- und Hinterradantrieb).

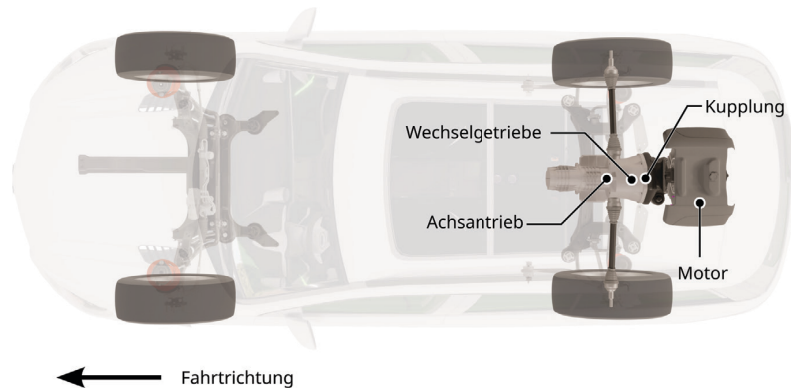
**Standardbauweise** (Bild 6.1)



**Bild 6.1** Standardbauweise

### Heckantrieb (Bild 6.2)

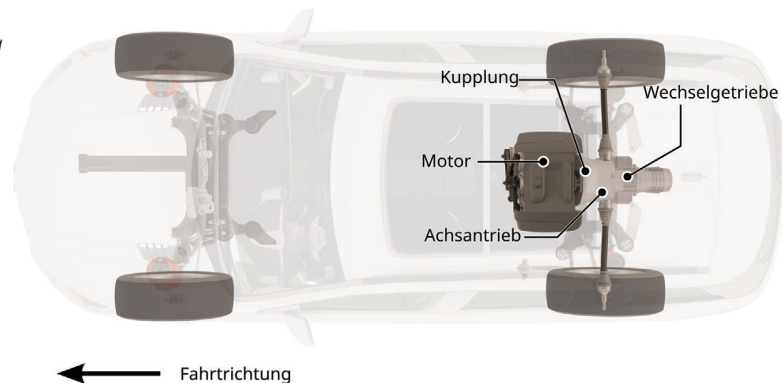
**Bild 6.2**  
Heckantrieb



### Mittelmotoranordnung (Bild 6.3)

Der Motor mit Kupplung ist vor der Hinterachse, Wechselgetriebe hinter und Achsantrieb in der Hinterachse angeordnet. Hierdurch soll eine günstige Gewichtsverteilung erzielt werden (Schwerpunkt des Kfz in der Mitte zwischen Vorder- und Hinterachse), um neutrales Kurvenverhalten zu erreichen. Nachteilig ist, dass der beste Raum im Kfz – zwischen Vorder- und Hinterachse – zum Teil durch die Unterbringung des Motors verloren geht.

**Bild 6.3**  
Mittelmotoranordnung



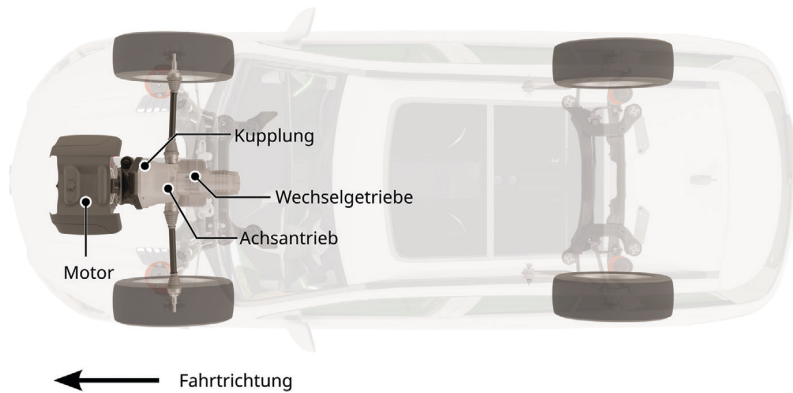
### Frontantrieb

Hierbei kommt stets ein Fronttriebsatz zur Anwendung. Dabei kann der Motor vor oder über der Vorderachse (Bild 6.4) oder in Längs- oder Querrichtung angeordnet sein. Bei der Queranordnung des Motors (Bild 6.5), die immer mehr angewendet wird, spart man den aufwendigen Kegelradantrieb.

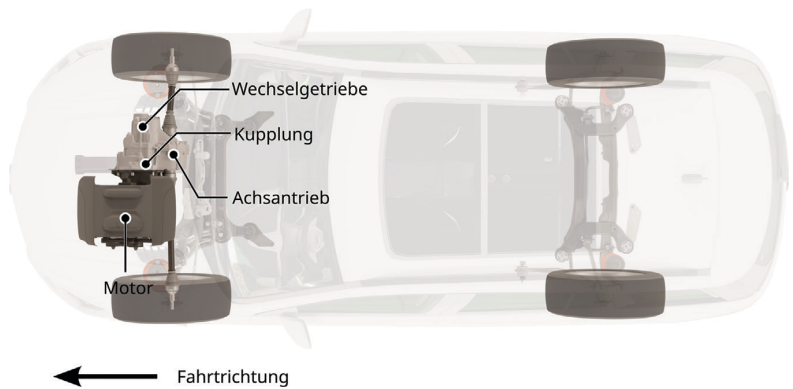
### Allradantrieb (Bild 6.6)

Beim Allradantrieb unterscheidet man folgende Varianten:

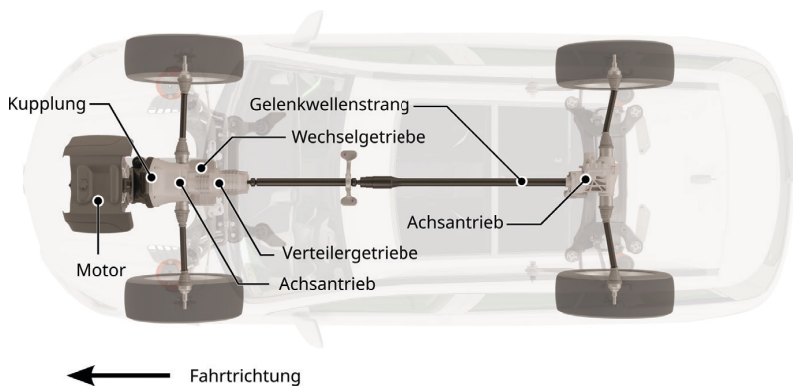
- Zuschaltbarer Vorderradantrieb bei permanentem Hinterradantrieb oder zuschaltbarer Hinterradantrieb bei ständigem Vorderradantrieb
- Permanenter Allradantrieb mit Verteilergetriebe und zuschaltbaren oder selbsttätigen Differenzialsperren
- Permanenter Allradantrieb mit Viscokupplungen und -sperren



**Bild 6.4**  
Frontantrieb



**Bild 6.5**  
Frontantrieb mit quer-gestelltem Motor



**Bild 6.6**  
Allradantrieb

## 6.1 Kupplung

Die Kupplung überträgt die Drehbewegung – das Drehmoment – des Motors auf das Wechselgetriebe. Sie stellt eine lösbare Verbindung zwischen Motor und Getriebe dar und ermöglicht das Wechseln der Gänge bei einem mechanischen Schalt-Wechselgetriebe. Moderne Motorkonzepte (Downsizing) bedeuten erhöhte Anforderungen an die Kupplungssysteme, da die leichte Anfahrschwäche durch die turboaufgeladenen Motoren gegenüber hubraumstärkeren Motoren durch Gasgeben während des Einkuppelns kompensiert werden muss.

### 6.1.1 Aufgaben

- Kraftfluss zwischen Motor und Getriebe unterbrechen zum Anhalten
- Trennkupplung zum Gangwechsel
- Rutschkupplung zum ruckfreien Anfahren
- Schlupffreie Übertragung großer Drehmomente
- Drehschwingungen des Motors vom Getriebe fernhalten (Schwingungsdämpfer)
- Überlastungsschutz innerhalb der Kraftübertragung

#### Trenn- oder Schaltkupplung zum Gangwechsel

Zum Gangwechsel muss durch Auskuppeln die Antriebslast von der Mitnehmerverzahnung der Zahnräder oder der Schaltmuffe genommen werden, um das Schalten in ein anderes Zahnradpaar zu ermöglichen. Der Gangwechsel erfolgt bei Gleichlauf der zu schaltenden Getriebeteile. Nach erfolgtem Gangwechsel wird durch Einkuppeln die kraftschlüssige Verbindung des Motors mit der nunmehr in Eingriff befindlichen Zahnradstufe wiederhergestellt. Auch das Schalten aus dem Leerlauf (Neutral) in den 1. Gang ist ein Gangwechsel.

#### Rutschkupplung zum ruckfreien Anfahren

Zum ruckfreien Anfahren muss die Kupplung als Rutschkupplung arbeiten, da der Motor mit einer bestimmten Mindestdrehzahl läuft (etwa 700 bis 1000  $\text{min}^{-1}$ ), das Fahrzeug aber noch stillsteht. Würde die Kupplung nicht rutschen, wäre das „Abwürgen“ des Motors beim Anfahren die Folge. Das Rutschen der Kupplung beim Anfahren bewirkt der Fahrer durch allmähliches „Kommenlassen“ der Kupplung.

#### Schlupffreie Übertragung großer Drehmomente

Befindet sich das Fahrzeug in Bewegung, wird der Fuß vom Kupplungspedal genommen. Beim Beschleunigen (Gasgeben) überträgt die Kupplung nun das volle Drehmoment des Motors, ohne zu rutschen.

#### Schwingungsdämpfung

Siehe Kapitel 6.1.3 Kupplungsscheiben.

### 6.1.2 Kupplungsarten

Man unterscheidet am Kraftfahrzeug folgende Kupplungsarten:

- Trockenkupplungen als Ein- oder Zweischeibenkupplungen, ausgeführt als Schraubenfeder-, Tellerfeder- oder Membranfederkupplungen
- Nass-(Halbnass-)Kupplungen, ausgeführt als Lamellenkupplungen
- Elektronische Kupplungen
- Hydrodynamische Kupplungen (Flüssigkeitskupplungen (siehe Kapitel 6.3)

#### Einscheiben-Trockenkupplungen

Sie haben ihren Namen daher, dass sie nicht im Ölbad, sondern trocken laufen. Die Gehäuse, oft Schwungscheibengehäuse oder Kupplungsglocke genannt, sind bei Fahrzeugen höherer Leistung so ausgeführt, dass Luft zur Wärmeableitung von der Kupplung zu- und abströmen kann.

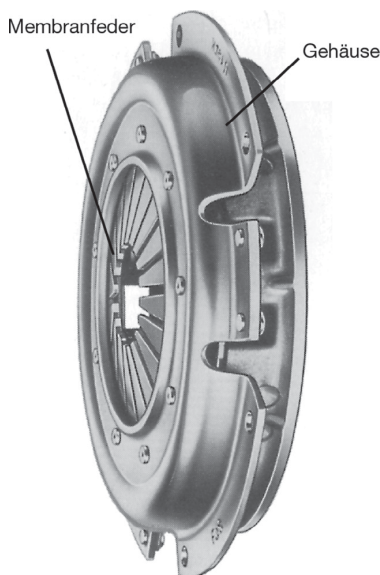
Einscheiben-Trockenkupplungen werden normalerweise bei allen Kraftfahrzeugen verwendet, Mehr-(Zwei-)Scheibenkupplungen bei schweren Lkw-Motoren mit großem Drehmoment und vereinzelt auch bei leistungstarken Pkw-Motoren mit hohen Drehmomenten oder auch in Doppelkupplungsgetrieben.

### Membranfederkupplung

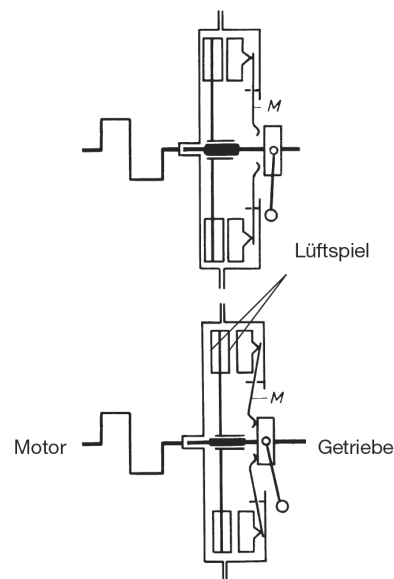
Eine tellerförmige, von innen radial geschlitzte Membranfeder (Bild 6.7), auch Belleville-Feder genannt, dient nicht nur der Erzeugung der Anpresskraft, sondern übernimmt auch gleichzeitig die Funktion des Ausrückmechanismus. Die Membranfederkupplung bietet bei kleinster Bauhöhe die größtmögliche Anpresskraft bei gleichzeitig geringer Ausrückkraft und hoher Drehzahlfestigkeit.

Die Bilder 6.7 bis 6.10 zeigen den Aufbau und die Wirkungsweise der Membranfederkupplung schematisch. Das Gehäuse dient als Träger für die Membranfeder. Die Distanzbolzen und Drahringe verbinden sie mit dem Gehäuse. Die Drahringe legen den Kippkreis der Membranfeder fest. Das Motordrehmoment wird vom Gehäuse auf die Druckplatte übertragen.

In den Bildern wird die Membranfederkupplung in gedrückter Ausführung dargestellt. Es gibt jedoch auch Membranfederkupplungen in gezogener Ausführung, die den Vorteil haben, dass sie wenig Platz (Bauhöhe) benötigen.



**Bild 6.7** Membranfederkupplung Baureihe „M“ für Personenwagen in gedrückter Ausführung



**Bild 6.8** Membranfederkupplung, schematisch Oberes Bild: eingekuppelt Unteres Bild: ausgekuppelt M Membranfeder

Besondere Bedeutung fällt bei dieser Kupplung den Tangentialblattfedern (Bild 6.9) oder Dreiecksblattfedern zu. Sie bewirken zusammen mit der Membranfeder (M) den Abhub und eine Zentrierung der Anpressplatte. Außerdem übernehmen sie einen Teil der Drehmomentübertragung.

# Fahrwerk

Als zentrales Verbindungselement zwischen Fahrzeugaufbau und Fahrbahn bestimmt das Fahrwerk wesentlich die Fahreigenschaften eines Fahrzeugs. Während die Mehrzahl der Fahrzeugkäufer dem Fahrwerk nur wenig Beachtung schenkt, wurde im Rennsport schon sehr früh erkannt, dass der stärkste Motor nichts nützt, wenn die Kraft nicht auf die Straße gebracht werden kann, oder wenn man in Kurven die Kontrolle verliert. Während die mechanischen Möglichkeiten zur Optimierung des Fahrverhaltens in den letzten Jahren nahezu ausgereizt erscheinen, eröffnete der Einsatz von Fahrdynamikregelsystemen komplett neue Möglichkeiten. Durch eine gezielte Regelung des Fahrwerks setzt sich die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen zu komplett autonomen Systemen (autonomes Fahren) fort.

Zum Fahrwerk gehören folgende Baugruppen:

- Achsen und Radführung
- Lenkung
- Federung und Dämpfung
- Reifen und Räder
- Aggregatelagerung
- Bremsanlage
- Fahrwerkelektronik inklusive Fahrdynamikregelsysteme und Fahrerassistenzsysteme

## 7.1 Grundlagen der Fahrdynamik

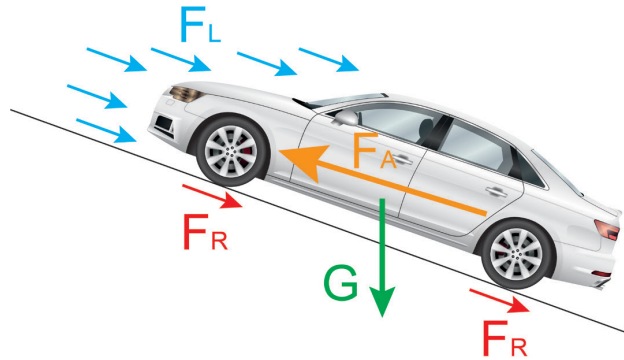
Die Fahrdynamik beschreibt die auf das Fahrzeug einwirkenden Kräfte sowie die daraus resultierenden Bewegungen. Je nach Art der Bewegung werden unterschieden:

- Längsdynamik (Beschleunigung, Verzögerung)
- Vertikaldynamik (Ein- und Ausfedervorgänge)
- Querdynamik (Kurvenfahrt, Gieren)

Hauptakteur bei allen Bewegungsarten ist das Fahrwerk.

## 7.1.1 Fahrwiderstände

**Bild 7.1**  
Fahrwiderstände  
[Bild: Essenreiter/  
Adobe Stock]



### Rollwiderstand ( $F_R$ )

Grundsätzlich wird Fortbewegung durch Gleiten oder Abrollen ermöglicht. Der Abrollvorgang des Rades setzt sich aus verschiedenen Abläufen zusammen, von denen jeder einzelne einen Widerstand entgegen der Bewegungsrichtung hervorruft. Diese Widerstände werden im Wesentlichen durch Reibung zwischen Fahrbahn und Reifen und Reibung im Inneren des Reifens (Walkarbeit) hervorgerufen.

Der Reibungswiderstand: Die Höhe des Reibungswiderstands wird wesentlich durch den Reibungskoeffizienten ( $\mu$ ) der Materialpaarung Reifen/Fahrbahn bestimmt. Dabei werden zwei Hauptreibungsarten unterschieden:

- **Adhäsionsreibung:** Die Profilstollen des Reifens haben auf molekularer Ebene direkten Kontakt mit dem Untergrund. Liegt ein flüssiges Zwischenmedium (Wasser, Öl) wird die Adhäsionsreibung verhindert. In Abhängigkeit vom Schlupf kann es sich bei Adhäsionsreibung um Haftreibung oder um Gleitreibung handeln.
- **Hysteresereibung:** Diese Reibung entsteht durch Formschluss aufgrund der Oberflächenrauigkeiten von Fahrbahn und Reifen. Sie wird auch als Verzahnungseffekt bezeichnet. Diese Reibungsart entsteht auch, wenn ein Zwischenmedium vorliegt. Dies gilt jedoch nur, solange der Formschluss mit der Fahrbahn noch stattfindet.

**Walkwiderstand:** Die Verformung der Profilstollen sowie des gesamten Reifens ergibt beim Abrollen auf befestigten Fahrbahnen ca. 80 bis 90% des Rollwiderstands. Je elastischer der Reifen ist, umso mehr Federungsarbeit übernimmt er, desto höher ist auch der Walkwiderstand. Direkten Einfluss haben Achslast und Reifendruck.

Darüber hinaus hat auch der Zustand der Fahrbahn einen erheblichen Einfluss auf den Rollwiderstand. Unebenheiten (z.B. Steine), Verformbarkeit (z.B. weiche Erde, Sand) sowie zu verdrängende Zwischenmedien (z.B. Wasser, Schnee) erhöhen den Rollwiderstand.

### Luftwiderstand ( $F_L$ )

Der Luftwiderstand entspricht der Kraft, die sich auf das Fahrzeug auswirkt, wenn es von Luft umströmt wird. Er hängt im Wesentlichen von den folgenden drei Faktoren ab.

- **Der Stirnfläche:** Je größer die Fläche ist, gegen die die Luft strömt, umso höher ist der Widerstand.

- Der Luftwiderstandsbeiwert  $C_W$ : Dieser Wert gibt an, wie stromlinienförmig das Fahrzeug ist. Ecken, Kanten, herausstehende Teile etc. sorgen für Verwirbelungen und damit für einen höheren  $C_W$ -Wert.
- Die Geschwindigkeit: Mit steigender Geschwindigkeit nimmt der Luftwiderstand überproportional zu. Vergleicht man die Luftwiderstände bei 60 km/h und bei 120 km/h, so steigt dieser bei Verdoppelung der Geschwindigkeit um das Vierfache.

### Steigungswiderstand ( $G$ )

Der Steigungswiderstand kommt durch die Gewichtskraft ( $G$ ) zustande. Er hängt vom Steigungswinkel und von der Fahrzeugmasse ab. Bei exakt waagrechter Fahrbahn ist er null, bei Gefällen hat er einen negativen Wert.

### Beschleunigungswiderstand ( $F_a$ )

Je größer die Masse, desto höher die Trägheitskraft. Beim Beschleunigen muss die Massenträgheit überwunden werden. Das gilt für das Gesamtfahrzeug (lineare Beschleunigung), wie auch für rotierende Massen (Räder und kraftübertragende Teile).

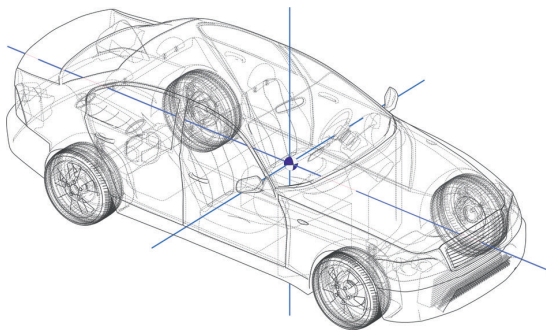
### Fahrwiderstand (Gesamt)

Der Fahrwiderstand ist die Summe aller Widerstände, die sich der Fortbewegung des Fahrzeugs entgegensetzen. Ab ca. 50 km/h hat der Luftwiderstand den größten Anteil am Gesamtwiderstand. Deshalb nimmt der Fahrwiderstand mit steigender Geschwindigkeit überproportional zu.

## 7.1.2 Die Fahrzeugmasse

### Der Schwerpunkt des Fahrzeugs

Der geometrische Mittelpunkt eines Fahrzeugs und der Schwerpunkt liegen nur in den seltensten Fällen beieinander. Der Schwerpunkt ist der theoretische Angriffspunkt der Schwerkraft. Er wird deswegen auch als Massenmittelpunkt bezeichnet. Bei Fahrzeugen hängt der Schwerpunkt von der Massenverteilung ab. Motor und Getriebe sind bei Personenkraftwagen in der Regel die schwersten Bauteile, bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen stellt der Akku die größte Masse dar, bei Lastkraftwagen die Nutzlast.



**Bild 7.2**

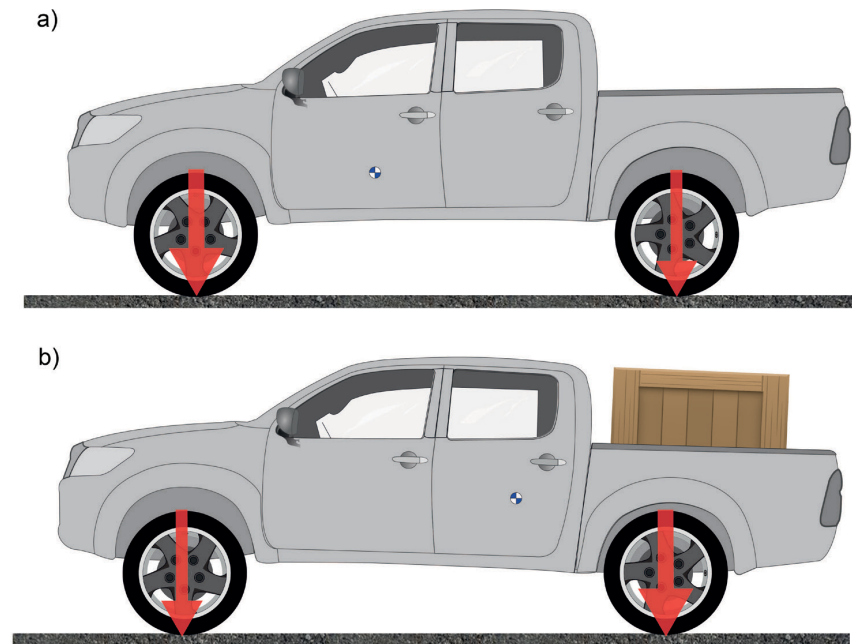
Der Schwerpunkt (blau/weiß)

[Bild: Essenreiter/Adobe Stock]

### Die Achslasten

Die zulässigen Achslasten sind vom Hersteller als Maximalgrenze festgeschrieben. Die Betrachtungsweise ist hier statisch. Für die Fahreigenschaften eines Fahrzeugs sind jedoch vor allem die tatsächlichen Achslasten sowie die Achslastverteilung von Interesse.

**Bild 7.3**  
Vergleich Schwerpunkt (blau/weiß) und Achslasten unbeladen (a) und beladen (b)  
[Bild: Essenreiter]



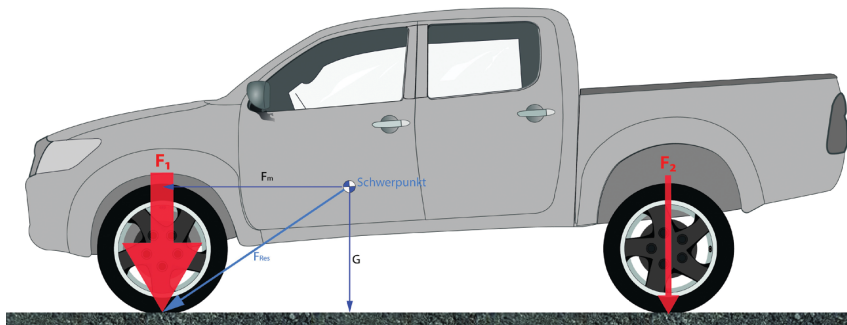
Beispiel: Das Fahrzeug in Bild 7.3a hat unbeladen eine Achslastverteilung von 60:40. Durch die Beladung (Bild 7.3b) verändert sich die Achslastverteilung: Die Hinterachse trägt statt 40% nun 62% des Gesamtfahrzeuggewichts inklusive Beladung. Die Lage des Schwerpunkts ist nach hinten sowie nach oben gewandert.

### Dynamische Achslastverschiebung

Neben der statischen Betrachtung des Schwerpunkts und der Achslasten werden bei der dynamischen Betrachtung die Fahreinflüsse und Massenträgheiten berücksichtigt. So verlagert sich beim Bremsvorgang der Schwerpunkt nach vorne und in Kurven zur Seite. Man spricht von einer dynamischen Achslastverschiebung.

Die beim Bremsvorgang auftretende Trägheitskraft ( $F_m$ ) ist bestrebt, die Bewegung des Fahrzeugs geradlinig fortzuführen. Theoretischer Angriffspunkt ist der Fahrzeugschwerpunkt (blau-weiß). Trägheitskraft und Gewichtskraft bilden ein Kräfteparallelogramm, dessen resultierende Kraft ( $F_{Res}$ ) die Vorderräder zusätzlich belastet und die Hinterräder um den gleichen Wert entlastet.

Neben der Achslast hat auch die Last des einzelnen Rades fahrdynamische Bedeutung. Beim Befahren von Kurven findet eine dynamische Lastverschiebung zur kurvenäußeren Seite hin statt; so nimmt z. B. in einer Rechtskurve die Radlast der Räder der rechten Seite ab, während die der linken Seite zunimmt. Wird in der Kurve gebremst, ergeben sich aufgrund der Lastverschiebung stark unterschiedliche Werte. Das Rad vorne links trägt in dieser Situation die größte, das Rad hinten rechts die kleinste Radlast.



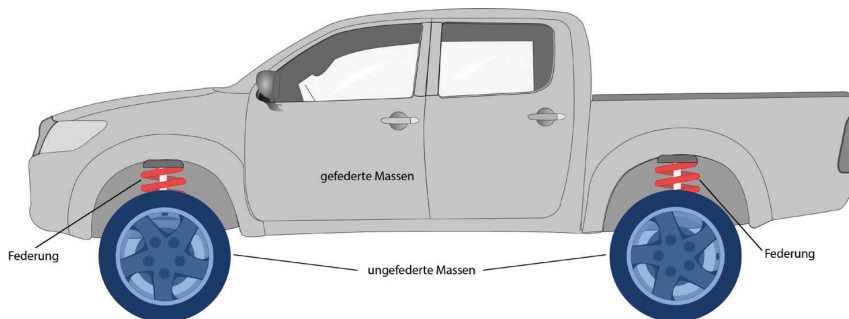
- |           |   |       |  |
|-----------|---|-------|--|
| $m$       | = Fahrzeugmasse in kg                           | $F_1$ | = Achslast vorne in N (statische Achslast + $F_{Res}$ )  |
| $a$       | = Beschleunigung in $m/s^2$                     | $F_2$ | = Achslast hinten in N (statische Achslast - $F_{Res}$ ) |
| $G$       | = Gewichtskraft in N ( $m \times 9,81$ )        |       |  |
| $F_m$     | = Trägheitskraft in N ( $m \times a$ )          |       |  |
| $F_{Res}$ | = Resultierende Kraft in N (aus $F_m$ und $G$ ) |       |  |

**Bild 7.4**  
Dynamische Achslastverschiebung beim Bremsvorgang  
[Bild: Essenreiter]

### Gefederte Masse

Bei der dynamischen Betrachtung kann man feststellen, dass sich Räder und Aufbau unterschiedlich verhalten, sie vollziehen unterschiedliche Bewegungen. Neben der Unterscheidung in lineare und rotierende Bewegung müssen hier auch die Massen zugeordnet werden.

Zur ungefederten Masse zählen die Räder inklusive Radträger und Radbremsen. Der Aufbau, mit allen dazugehörigen Komponenten wie Motor, Getriebe, Lenkung, elektrischer Anlage und Karosserie zählt zur gefederten Masse. Auch die Nutzlast wird der gefederten Masse zugerechnet. Die verbindenden Elemente wie Querlenker, Fahrwerksfedern, Stoßdämpfer und Antriebswellen werde je zur Hälfte gerechnet.



**Bild 7.5**  
Gefederte und ungefederte Massen  
[Bild: Essenreiter]

## 7.1.3 Rotationsachsen

Neben der linearen Bewegung des Fahrzeugs treten Drehbewegungen des Aufbaus und des gesamten Fahrzeugs in verschiedenen Situationen auf. Die Fahrstabilität hängt wesentlich von der Kontrolle dieser Drehbewegungen ab.

Die zur Erfassung der Bewegung erforderlichen Raumachsen sind in einem genormten Koordinatensystem festgeschrieben.

Ausgangspunkt ist immer die statische Betrachtung in Ruhelage. Diese ebenfalls nach Norm definierte Ruhelage berücksichtigt eine Beladung von Fahrer, Beifahrer sowie 50 kg

## 8

# Assistenz- und Fahrdynamikregelsysteme

## 8.1 Fahrdynamikregelsysteme

Fahren ist Dynamik. Die Fahrdynamik zu regeln bedeutet, die bei der Fortbewegung entstehenden physikalischen Kräfte zu nutzen, um das Fahrzeug zu stabilisieren, auf Kurs zu halten oder auf den gewünschten Kurs zu bringen. Die für das Verständnis dieser Systeme erforderlichen Grundlagen werden im Kapitel 7 „Fahrwerk/Grundlagen der Fahrdynamik“ behandelt.

Die zentralen Systeme, die in die Fahrdynamik eingreifen, sind das Antiblockiersystem (ABS) und das Elektronische Stabilitäts-Programm (ESP). Beide Systeme sind baulich zu einer Einheit verschmolzen; ihre Grundfunktionen sind jedoch unterschiedlich. Für ein leichteres Verständnis werden wir das ABS als Grundsystem betrachten und das ESP als das vollständige System.

### 8.1.1 Das ABS

Die über die Reifenaufstandsfläche übertragbaren Kräfte stehen in einem direkten Konkurrenzkampf zueinander: Nehmen die Längskräfte zu, verringern sich die Seitenführungskräfte und umgekehrt. Die entscheidende Größe ist dabei der Schlupf zwischen Reifen und Fahrbahn. Nur wenn der Schlupf gering gehalten wird, stehen genügend

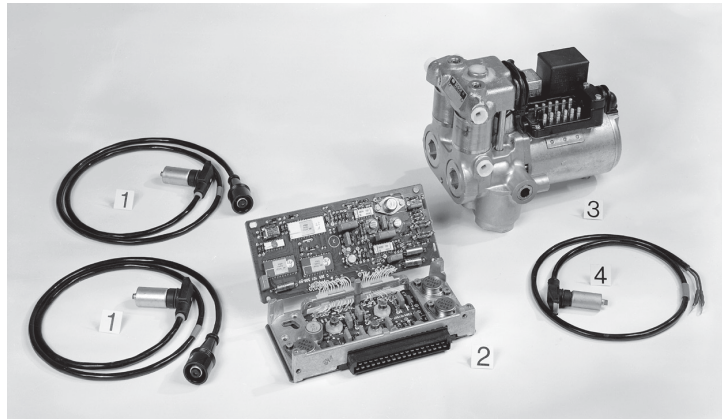


**Bild 8.1**

Vergleichsversuche von 1978 mit der Mercedes S-Klasse auf nasser Fahrbahn zwischen Fahrzeugen mit (rechts) und ohne Anti-Blockier-System (links)  
[Bild: Mercedes]

**Bild 8.2**

Das gemeinsam von Daimler-Benz und Bosch entwickelte Anti-Blockier-System (von 1978) stellt eine Ergänzung der herkömmlichen Bremsanlage dar und besteht im Wesentlichen aus Drehzahlfühlern an beiden Vorderrädern (1) und am Antriebskegelrad der Hinterachse (4), einer elektronischen Steuereinheit (2) und einer Hydraulikeinheit (3).  
[Bild: Mercedes]



große Seitenführungskräfte zur Verfügung, die für die Lenkbarkeit des Fahrzeugs unverzichtbar sind. (Genauerer findet man mit dem Suchwort Kammscher Kreis.)

Die grundlegende Aufgabe des ABS besteht darin, den Bremsdruck so zu begrenzen, dass der Schlupf an den einzelnen Rädern ein gewisses Maß (den Sollschlupf) nicht überschreitet.

Was bedeutet das?

Lenkbarkeit und Stabilität sind oberstes Ziel. Die maximale Bremsverzögerung kommt an zweiter Stelle.

Bild 8.1 zeigt Fahrversuche von Mercedes. Hier ist deutlich zu erkennen: Das Fahrzeug ohne ABS ist bei einer Vollbremsung nicht mehr lenkbar. Das Fahrzeug mit ABS hingegen kann das Hindernis umfahren.

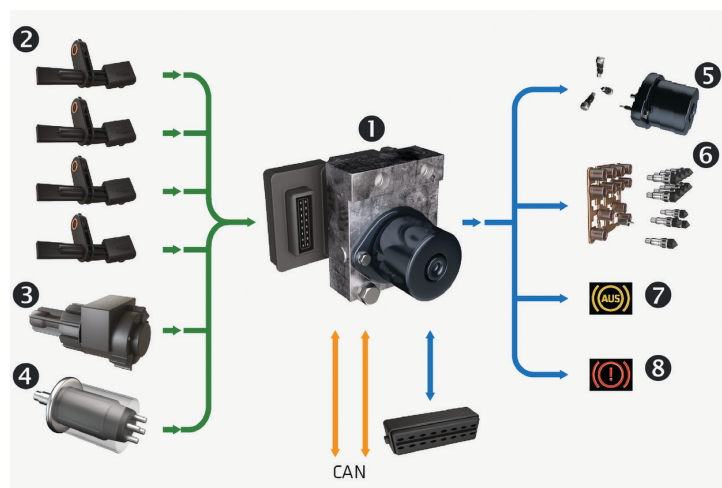
### 8.1.1 Systemübersicht

Ein Bremssystem mit ABS besteht aus einer herkömmlichen Zweikreis-Bremsanlage, in die ein Hydroaggregat mit elektronischer Regeleinheit (Steuergerät und Sensoren) integriert ist (Bild 8.3).

**Bild 8.3**

Systemübersicht der ABS-Komponenten  
[Bild: autoFACHMANN]

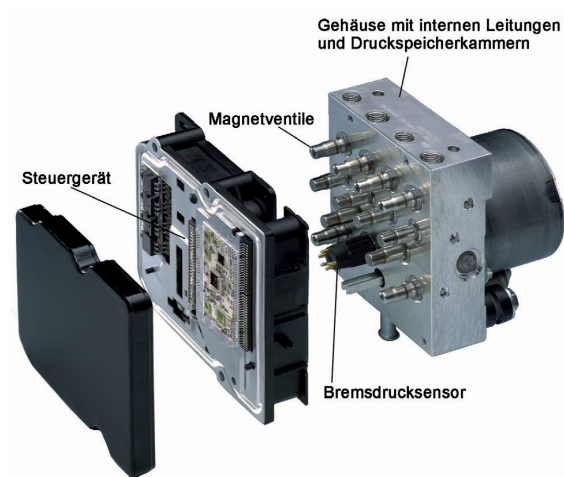
- 1 ABS-Einheit (Hydraulik-Aggregat mit Steuergerät) Sensoren:
  - 2 Raddrehzahlsensoren
  - 3 Bremslichtschalter
  - 4 Bremsdruckgeber, Aktoren
  - 5 Rückförderpumpe mit Elektromotor
  - 6 Magnetventile
  - 7 ABS-Kontrollleuchte
  - 8 Bremsen-Kontrollleuchte
- Anschlüsse  
Spannungsversorgung Datenbus / Diagnoseanschluss



### 8.1.1.2 Das ABS-Steuergerät

Die ABS-Einheiten wurden mit fortschreitender Entwicklung immer kompakter und es wurden immer mehr Bauteile integriert. Bei nahezu allen Systemen bilden das elektronische Steuergerät (ECU = Electronic Control Unit) und die hydraulische Steuerung (HCU = Hydraulic Control Unit) eine bauliche Einheit (HECU = Hydraulic & Electronic Control Unit).

Die HECU beherbergt die in Bild 8.4 aufgeführten weiteren Bauteile.



**Bild 8.4**  
Steuergerät eines ABS  
[Bild: Bosch]

Anhand der Signale der Raddrehzahlsensoren berechnet das Steuergerät die Referenzgeschwindigkeit des Fahrzeugs und die Verzögerung bzw. Beschleunigung jedes einzelnen Rades sowie des gesamten Fahrzeugs. Aus diesen Werten berechnet das Steuergerät dann wiederum den Schlupf für jedes Rad. Über das Signal des Bremslichtschalters erkennt es die Betätigung der Bremse.

Das Steuergerät vergleicht die Istwerte mit den in Kennfeldern gespeicherten Sollwerten und leitet bei Bedarf über die Hydraulikeinheit den entsprechenden Regelzyklus ein. Moderne Steuergeräte haben für verschiedene Fahrsituationen verschiedene Kennfelder gespeichert.

Um eine maximale Bremsleistung zu erreichen, lassen manche Steuergeräte ein Blockieren der Räder (100% Schlupf) unter optimalen Bedingungen (trockene Fahrbahn, keine Kurvenfahrt) zeitweise zu, während unter anderen Fahrbedingungen schon bei 35% Schlupf ein Eingriff erfolgt.

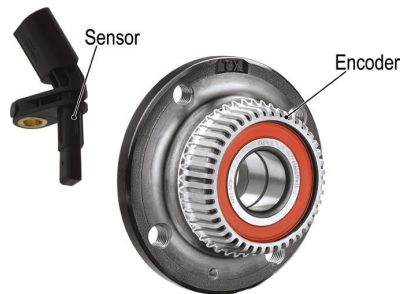
In das ABS-Steuergerät sind auch Zusatzfunktionen oder ganze Fahrodynamikregelsysteme wie z.B. ESP integriert, bei vielen Modellen auch die indirekt messende Reifendruckkontrolle.

### 8.1.1.3 Raddrehzahlsensoren

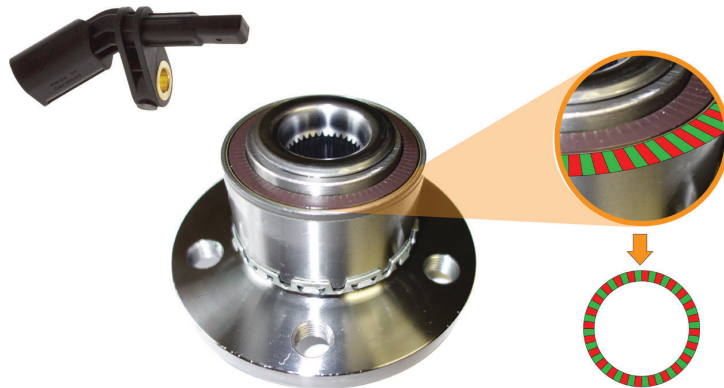
Grundsätzlich setzt sich jede Sensoreinheit aus einem Sensor und einem Encoder zusammen (Bild 8.5).

**Bild 8.5**

Ein Sensor und eine Radlagereinheit mit Encoder einer induktiven Sensoreinheit  
[Bild: Febi-Bilstein (links) und Schäffler (rechts)]

**Bild 8.6**

Aktiver Sensor und Radlagereinheit mit einem integrierten Multipolring-Encoder  
[Bild: Essenreiter]



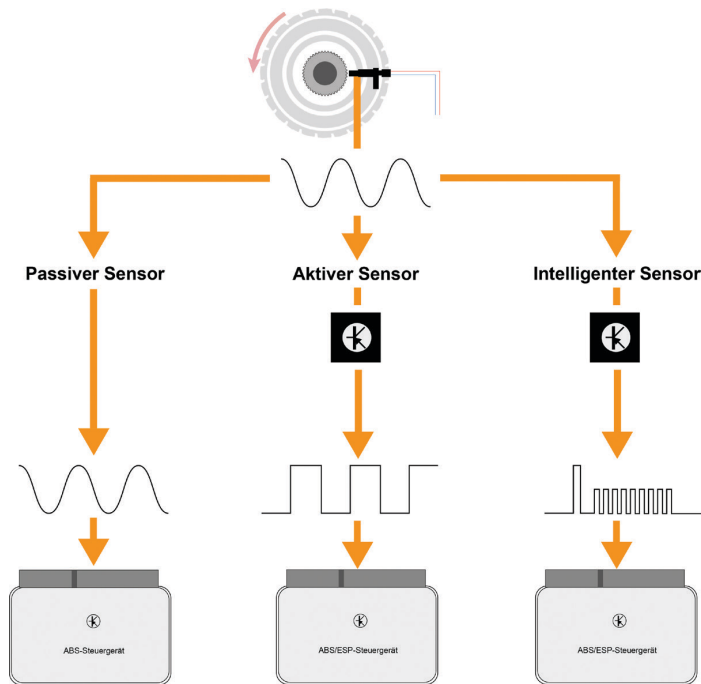
Der **Encoder** ist eine Scheibe oder ein Ring, der bei Rotation im Sensor Impulse auslöst. Bei Systemen nach dem Induktionsprinzip werden Impulsringe verwendet, die die Form eines Zahnrades haben. Jeder Wechsel von Zahn zu Zahnlücke löst eine Schwingungsamplitude aus. Neuere Systeme verwenden als Encoder einen Multipolring (Bild 8.6). Auf den Ringen werden kleine Abschnitte (für das Auge unsichtbar) unterschiedlich magnetisiert. So liegen über den Umfang verteilt magnetische Nord- und Südpole nebeneinander. Jeder Wechsel zwischen Nord- und Südpol löst im Sensor eine Schwingungsamplitude aus.

Der **Sensor** wandelt die physischen Signale des Encoders (Zahnlücken, Südpole, ...) in elektrische oder elektronische Signale um und sendet diese zur Auswertung ans Steuergerät.

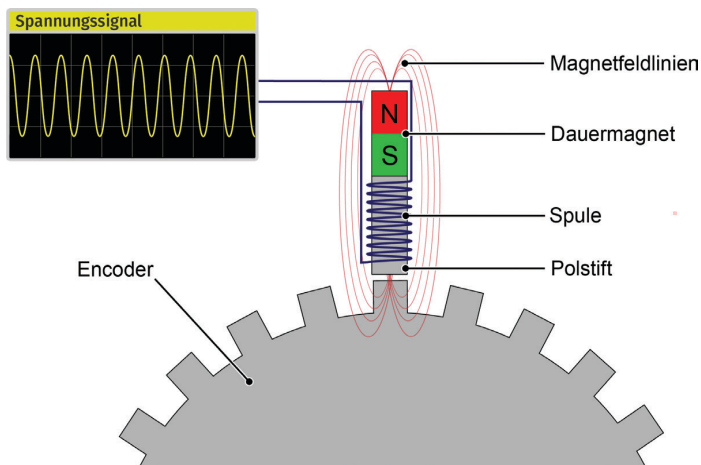
Aktuell lassen sich drei Generationen von Sensoren zur Erfassung der Raddrehzahl unterscheiden (Bild 8.7).

### 1. Generation: Passive Raddrehzahlsensoren nach dem Induktionsprinzip Funktion (Bild 8.8)

Im Gehäuse des Sensors befindet sich ein Dauermagnet, dessen Magnetfeld über den Polstift bis zum Encoder gleitet wird. Befindet sich ein Zahn unter dem Polstift, so wird das Magnetfeld bis in den Encoder geleitet und dadurch vergrößert. Bei einer Zahnlücke unter dem Polstift findet keine Vergrößerung des Magnetfeldes statt. Bei einem sich drehenden Encoder wird durch jeden Zahn und jede Zahnlücke die Stärke des Magnetfeldes verändert. In der Spule, die um den Polstift gewickelt ist, erzeugt dies nach dem Induktionsgesetz eine Wechsellspannung. Die Frequenz dieser sinusförmigen Wechsellspannung verändert sich entsprechend der Drehzahl des Encoders.



**Bild 8.7**  
Drei Generationen von Drehzahlsensoren  
[Bild: Essenreiter/autoFACHMANN]



**Bild 8.8**  
Schematischer Aufbau eines passiven (induktiven) Drehzahlsensors  
[Bild: Essenreiter/autoFACHMANN]

Bei einer zu geringen Frequenz ist die Induktion zu gering, um ein verwertbares Signal zu erzeugen. Induktive Sensoren liefern deshalb erst ab einer Fahrgeschwindigkeit von ca. 4 km/h ein zuverlässiges Signal.

Großen Einfluss auf die im Sensor induzierte Spannung haben der Abstand zwischen Encoder und Polstift sowie der Zustand beider Teile. Sind die Teile beschädigt oder stark verschmutzt, oder ist ihr Abstand zu groß, entsteht kein oder nur ein fehlerhaftes Signal.