
Ralf Deußen
Walter Essenreiter
Volkert Schlüter
Axel Sprenger

Meisterwissen im Kfz-Handwerk: Technik 1

6. aktualisierte und bearbeitete Auflage



Weitere Informationen:

www.autofachmann.de/buch



www.facebook.com/autofachmann.autokaufmann



www.instagram.com/auto_fachmann



www.youtube.com/c/autoFACHMANNKAUFMANN

ISBN 978-3-8343-3445-9

6. Auflage 2020

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.

Titelbild: AdobeStock, adimas

Printed in Germany

Copyright 2020 by Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, Würzburg

Geleitwort

Liebe Meisterschüler,

das Aufgabenfeld der Kfz-Technik wird immer komplexer: Alternative Antriebe, zahllose Fahrzeugmodelle und eine Technologie, die sich sehr schnell weiterentwickelt, stellen hohe Anforderungen an die Kfz-Fachleute.

Um Schritt zu halten, ist eine umfassende und weitreichende Aus- und Weiterbildung absolut notwendig. Sie als zukünftige Meister im Kfz-Technikerhandwerk sind die Wissensträger für Werkstätten. Denn ohne Ihre theoretischen und praktischen Kenntnisse, ohne Ihre oft langjährige Erfahrung wird eine Werkstatt ihren Kunden gerade im Bereich von komplexen Fehlern keine zufriedenstellende Leistung anbieten können.

In diesem interessanten und herausfordernden Fachbereich der Kfz-Technik werden Sie mit dem notwendigen Wissen ausgestattet, um den Ansprüchen von Kunden und Werkstätten gerecht zu werden. Spannende Technologien und Herausforderungen warten auf Sie.

Mit Ihrer Weiterbildung zum Meister im Kfz-Technikerhandwerk erhalten Sie eine zentrale Wissensbasis, auf die Sie in Ihrer Meistertätigkeit aufbauen können. Denn die Dynamik in der Entwicklung der Fahrzeugindustrie bedeutet einen ständigen Lernprozess. Sie erfordert, dass Sie sich auch über die Meisterschule hinaus mit den interessanten, neuen Technologien auseinandersetzen, sich weiterentwickeln, um Ihr Wissen immer auf dem aktuellen Stand zu halten.

Auf dem Weg zu diesem lohnenswerten, aber auch ambitionierten Ziel wünschen wir Ihnen allen erdenklichen Erfolg.

Ihre
Ferdinand Bilstein GmbH + Co. KG

Grußwort

Ihr Meisterprojekt!

Das Kfz-Gewerbe verändert sich rasant. Mobilität wird technisch immer komplexer, Vertriebswege verändern sich. Die Auswirkungen auf Werkstatt, Aftersales, Management und Auftragsabwicklung sind gravierend. Dem trägt auch die neue Meisterprüfungsverordnung Rechnung.

Die in diesem Buch vermittelte Theorie versteht sich als Bindeglied zwischen theoretischem Hintergrundwissen und praktischer Anwendung in Ihrem Kfz-Betrieb! Wissen und Können, Theorie und Praxis sind auf den neuesten Stand gebracht.

Im Kern berücksichtigt die neue Meisterverordnung den immensen technologischen Wandel, den wir auf dem Automobilssektor im letzten Jahrzehnt zu verzeichnen hatten. Diese technologische Entwicklung zu reflektieren ist wichtig, damit wir die Inhalte für Aus- und Weiterbildung auf entsprechendem Niveau vorhalten können und für die Betriebe in konkurrenzfähige Kompetenz umsetzen. Elektromobilität, alternative Antriebe und Umweltschutz machen zudem Felder auf, die in der Meisterverordnung alter Prägung längst nicht in gebührendem Maße berücksichtigt waren.

Die Meisterrolle hat sich deutlich verändert, nicht erst mit der neuen Verordnung. Der Meister ist nicht umsonst im DQ- und EQ-Rahmen gleichgesetzt mit der Stufe 6 im Hochschulabschluss, dem Bachelor.

Organisation und Management, haben Handarbeit und praktisches Tun weitgehend abgelöst. Der Meister entwickelt sich immer stärker zum Manager! Im Prozess um Fahrzeug- und Kundendaten haben sich die Abläufe komplett verändert. Das Tablet ist heute allgegenwärtig als Datenträger und Organisationshilfe. Von der Preisbildung für bestimmte Inzahlungnahmen bis hin zur Reparaturkalkulation ist heute praktisch alles durchgehend digital abgebildet. Der Serviceauftrag verändert sich, rechtliche Aspekte werden wichtiger! Kommunikationsinstrumente gewinnen für die Kundenbindung an Bedeutung. Aber auch auf dem Weg vom Kunden- zum Werkstattauftrag kann viel falsch, aber eben auch richtig gemacht werden.

Ich wünsche Ihnen bei der Vermehrung der gewonnen Erkenntnisse viel Spaß und beim Lernerfolg einen hohen Wirkungsgrad!

Freundlichst



Ihr Wilhelm Hülsdonk

Vizepräsident und Bundesinnungsmeister
Zentralverband Deutsches Kraftfahrzeuggewerbe e.V.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|------------------|---|-----------|
| Geleitwort | 5 | |
| Grußwort | 6 | |
| 1 | Verbrennungsmotoren | 11 |
| 1.1 | Kurbeltrieb | 23 |
| 1.1.1 | Kurbelwellen | 23 |
| 1.1.2 | Gleitlager | 29 |
| 1.1.3 | Pleuel | 34 |
| 1.1.4 | Kolben | 36 |
| 1.1.5 | Kolbenringe | 45 |
| 1.1.6 | Kolbenbolzen | 47 |
| 1.1.7 | Schwungscheibe | 48 |
| 1.1.8 | Zylinder | 48 |
| 1.1.9 | Zylinderköpfe | 51 |
| 1.2 | Ventiltrieb | 52 |
| 1.2.1 | Steuerzeiten von Viertaktmotoren | 53 |
| 1.2.2 | Variable Steuerzeiten | 55 |
| 1.2.3 | Überprüfung der Steuerzeiten | 67 |
| 1.2.4 | Ventile | 72 |
| 1.2.5 | Ventilführungen | 79 |
| 1.2.6 | Ventilfedern | 79 |
| 1.2.7 | Ventildrehvorrichtungen | 80 |
| 1.2.8 | Ventilspiel | 81 |
| 1.2.9 | Desmodromische Ventilsteuerung | 84 |
| 1.3 | Arbeitsverfahren bei Kfz-Motoren | 84 |
| 1.3.1 | Viertakt-Ottomotor | 84 |
| 1.3.2 | Zweitaktmotor | 88 |
| 1.3.3 | Kompressionsdruckprüfung | 90 |
| 1.3.4 | Druckverlusttest | 92 |
| 1.3.5 | Ungleichförmigkeit des Motors | 93 |
| 1.3.6 | Drehschwingungsdämpfer | 93 |
| 1.3.7 | Zweimassenschwungrad | 94 |
| 1.3.8 | Ausgleichswellen | 96 |
| 1.3.9 | Motoraufhängung | 97 |
| 1.4 | Motorleistung | 98 |
| 1.4.1 | Leistungsbestimmende Faktoren | 99 |
| 1.4.2 | Drehmoment | 99 |
| 1.4.3 | Ventiltechnik | 101 |
| 1.4.4 | Schaltsaugrohr | 102 |
| 1.4.5 | Abgasturbolader | 104 |
| 1.4.6 | Brennraum | 107 |
| 1.4.7 | Doppelzündung | 108 |
| 1.4.8 | Phasenversetzte Doppelzündung | 108 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 1.5 | Motorschmiierung | 108 |
| 1.5.1 | Schmiersysteme | 111 |
| 1.5.2 | Ölpumpen | 113 |
| 1.5.3 | Kurzschlussventil | 114 |
| 1.5.4 | Öldruckschalter | 115 |
| 1.5.5 | Ölfilter | 115 |
| 1.5.6 | Ölkühler | 116 |
| 1.5.7 | Ölwechsel | 116 |
| 1.6 | Motorkühlung | 117 |
| 1.6.1 | Luftkühlung | 118 |
| 1.6.2 | Flüssigkeitskühlung | 118 |
| 1.6.3 | Visco-Lüfterkupplung | 124 |
| 1.6.4 | Latentwärmespeicher | 125 |
| 1.6.5 | Standheizung | 126 |
| 1.6.6 | Kennfeldgesteuertes Kühlsystem | 126 |
| 1.7 | Kreiskolbenmotor | 127 |
| 1.8 | Abgasanlage | 130 |
| 1.9 | Dichtungselemente | 132 |
| 1.10 | Dieselmotoren | 134 |
| 1.10.1 | Aufbau | 134 |
| 1.10.2 | Zylinderlaufbuchsen | 135 |
| 1.10.3 | Arbeitsverfahren | 139 |
| 1.10.4 | Kolbenspaltmaß | 140 |
| 1.10.5 | Motoraufladung | 141 |
| 2 | Gemischbildung und Verbrennung bei Ottomotoren | 149 |
| 2.1 | Abgase und Abgasnachbehandlung von Ottomotoren | 153 |
| 2.2 | Katalytische Nachverbrennung | 157 |
| 2.2.1 | Lambda-Regelung | 160 |
| 2.2.2 | Spannungssprung-Lambdasonde (Zweipunktsonde nach dem Nernst-Prinzip) | 160 |
| 2.2.3 | Widerstandssprungsonde (Siemens) | 165 |
| 2.2.4 | Breitband-Lambdasonde | 166 |
| 2.3 | Kraftstoffeinspritzung bei Ottomotoren | 169 |
| 2.3.1 | Motronic (Bosch) | 171 |
| 2.3.2 | ME-Motronic (Bosch) | 205 |
| 2.3.3 | Mono-Motronic (Bosch) | 213 |
| 2.3.4 | Bivalentes Einspritzsystem (Benzin/Erdgas, CNG) | 223 |
| 2.3.5 | Bivalentes Einspritzsystem (Benzin/Flüssiggas, LPG) | 227 |
| 2.3.6 | Benzin-Direkteinspritzung (wandgeführt) | 230 |
| 2.3.7 | MED-Motronic (Bosch) | 233 |
| 2.3.8 | Benzindirekteinspritzung (strahlgeführt) | 248 |
| 3 | Gemischbildung und Verbrennung bei Dieselmotoren | 253 |
| 3.1 | Abgase und Abgasnachbehandlung von Dieselmotoren | 255 |
| 3.1.1 | Abgaszusammensetzung | 255 |
| 3.1.2 | Schadstoffentstehung | 255 |
| 3.1.3 | Schadstoffminderung | 256 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 3.1.4 | Abgasrückführung bei Dieselmotoren | 257 |
| 3.1.5 | Abgasnachbehandlung bei Pkw-Dieselmotoren | 258 |
| 3.1.6 | Dieselpartikelfilter | 260 |
| 3.1.7 | Abgasnachbehandlung – Selective Catalytic Reduction (SCR) | 263 |
| 3.1.8 | EOBD-Dieselmotoren | 266 |
| 3.2 | Diesel-Einspritzverfahren | 267 |
| 3.2.1 | Direkteinspritzverfahren (DI) | 267 |
| 3.3 | Dieseleinspritzsysteme mit elektronischer Regelung (EDC) | 270 |
| 3.3.1 | Bosch-Einspritzsystem mit Pumpe-Düse-Einheit (PDE) | 270 |
| 3.3.2 | Pumpe-Düse-Einheit mit Piezo-Ventil (VW/Siemens VDO) | 308 |
| 3.3.3 | Bosch-Einspritzsystem Pumpe-Leitung-Düse (PLD) | 316 |
| 3.3.4 | Bosch-Einspritzsystem Common Rail (CR) | 330 |
| 3.3.5 | Bosch-Einspritzsystem Common Rail (CR) mit Piezo-Inline-Injektor | 355 |
| 3.3.6 | Bosch-Radialkolben-Verteilereinspritzpumpe (VR) | 360 |
| 3.3.7 | Bosch-Axialkolben-Verteilereinspritzpumpe (VE) | 385 |
| 3.4 | Einspritzdüsen | 400 |
| 3.4.1 | Mehrlochdüsen | 401 |
| 3.4.2 | Drosselzapfendüsen | 402 |
| 3.4.3 | Einspritzdüsenhalter | 404 |
| 3.4.4 | Düsenprüfung mit dem Handprüfgerät | 406 |
| 3.4.5 | Einspritzleitungen | 407 |

4 Kraftübertragung 409

| | | |
|-------------|--|------------|
| 4.1 | Kupplung | 411 |
| 4.2 | Wechselgetriebe | 436 |
| 4.3 | Automatikgetriebe | 466 |
| 4.4 | Verteilergetriebe | 537 |
| 4.5 | Viscokupplung/Viscosperre | 539 |
| 4.6 | Torsen-Sperrdifferenzial (Audi/Subaru) | 540 |
| 4.7 | Haldex-Allrad-Kupplung | 542 |
| 4.8 | Kardan- oder Gelenkwellen | 546 |
| 4.9 | Winkelgetriebe (Achsantriebe) | 550 |
| 4.10 | Aufbau und Funktion von Ausgleichsgetrieben (Kegelrad-Differenzial) | 556 |
| 4.11 | Allradantriebe | 570 |
| 4.12 | Radvorgelegeantriebe | 578 |
| 4.13 | Angetriebene Doppelachse | 580 |
| 4.14 | MAN-Allradantrieb Hydro-Drive | 581 |

5 Fahrwerk 583

| | | |
|------------|-----------------------------------|------------|
| 5.1 | Grundlagen der Fahrdynamik | 583 |
| 5.1.1 | Fahrwiderstände | 584 |
| 5.1.2 | Die Fahrzeugmasse | 585 |
| 5.1.3 | Rotationsachsen | 587 |
| 5.1.4 | Reifenkräfte | 592 |
| 5.1.5 | Eigenlenkverhalten | 596 |
| 5.2 | Achsgeometrie | 599 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 5.2.1 | Die Grundmaße | 600 |
| 5.2.2 | Lenkkinematik | 604 |
| 5.2.3 | Lenkrollradius und Störkrafthebelarm | 608 |
| 5.2.4 | Sturz und Spreizung | 610 |
| 5.2.5 | Der Nachlauf | 613 |
| 5.2.6 | Die Spur | 614 |
| 5.2.7 | Die Achsvermessung | 621 |
| 5.3 | Lenkanlagen | 624 |
| 5.3.1 | Lenkgetriebe | 625 |
| 5.3.2 | Hilfskraftlenkungen | 629 |
| 5.3.3 | Elektromechanische Servolenkung (EPS) | 638 |
| 5.3.4 | Aktive Lenksysteme | 647 |
| 5.4 | Achsen am Kraftfahrzeug | 653 |
| 5.4.1 | Starrachsen | 653 |
| 5.4.2 | Halbstarre Achsen | 657 |
| 5.4.3 | Einzelradaufhängung | 659 |
| 5.5 | Federn (Federelemente) am Kraftfahrzeug | 667 |
| 5.5.1 | Blattfeder | 668 |
| 5.5.2 | Schraubenfedern | 669 |
| 5.5.3 | Torsions- oder Drehstabfedern | 671 |
| 5.5.4 | Luftfederung | 671 |
| 5.5.5 | Gashydraulische (hydropneumatische) Federung | 672 |
| 5.6 | Querstabilisierung | 673 |
| 5.6.1 | Der mechanische Stabilisator | 673 |
| 5.6.2 | Die elektronische Wankstabilisierung | 675 |
| 5.7 | Stoßdämpfer | 677 |
| 5.7.1 | Zweirohrstoßdämpfer | 678 |
| 5.7.2 | Einrohrstoßdämpfer | 679 |
| 5.7.3 | Variable Dämpfung | 680 |
| 5.7.4 | Prüfen von Stoßdämpfern | 682 |
| 5.8 | Räder und Reifen am Kraftfahrzeug | 683 |
| 5.8.1 | Die Bereifung | 683 |
| 5.8.2 | Räder | 705 |
| 5.9 | Reifendruckkontrollsysteme | 717 |
| 5.9.1 | Indirekt messende Reifendruckkontrollsysteme | 718 |
| 5.9.2 | Direkt messende Reifendruckkontrollsysteme | 720 |
| | Stichwortverzeichnis | 725 |

Ventilspiel hat Einfluss auf die Steuerzeiten des Motors und damit auf die Motorleistung, das Fahrverhalten, den Kraftstoffverbrauch und die Abgaswerte:

- Ein zu großes Ventilspiel verkürzt die Steuerzeiten, d.h., die Ventile öffnen später und schließen früher.
- Ein zu kleines Ventilspiel verlängert die Steuerzeiten, d.h., die Ventile öffnen früher und schließen später.

Manuelle Ventilspieleinstellung

Das Ventilspiel ist je nach Angabe des Herstellers bei kaltem oder betriebswarmem, bei stehendem oder bei laufendem Motor einzustellen. Die Einstellung selbst erfolgt je nach Ausführung z.B. mittels Einstellschraube, Exzenter mit Klemmschraube oder Einstellplättchen (Tassenstößel), wobei es Fahrzeuge gibt, bei denen dann die Nockenwellen ausgebaut werden müssen (z.B. MB 190/2,3 I – 16-Ventiler).

Hydraulischer Ventilspielausgleich

Aufgaben:

- Der hydraulische Ventilspielausgleich soll bewirken, dass das Ventilspiel unter allen Betriebsbedingungen stets gleich Null ist.
- Er soll das Einstellen des Ventilspiels überflüssig machen, selbst nach längerer Betriebsdauer des Motors.

Anordnung im Ventiltrieb

Der hydraulische Ventilspielausgleich kann, wie z.B. bei Opel, auf zwei Arten erfolgen:

- durch **Hydrostößel** bei 1,6 bis 3,0-l-CIH-Motoren (Gusskopf). Hier ist eine Grundeinstellung des Ventilspiels erforderlich, d.h.:
 1. Ventilspiel auf Null einstellen (bei stehendem Motor),
 2. Einstellschraube in drei Stufen um jeweils 90° bei laufendem Motor hineindre-
hen,
- durch **Ventilspielausgleicher** bei allen OHC-Motoren (Alukopf). Hier ist keine Grundeinstellung erforderlich.

Bei Demontage des Zylinderkopfs müssen die Ventilspielausgleicher von Öl geleert, d.h. auseinandergezogen und wieder zusammengesteckt werden, damit die Ventile nach der Montage einwandfrei schließen können. Anderenfalls dauert es nach dem Anspringen einige Zeit, bis der Motor wieder einwandfrei läuft.

Bild 1.116 zeigt einen hydraulischen Ventilspielausgleicher am Motor eines Opel. Der Schwing- oder Schlepphebel (S) ist nicht fest am Zylinderkopf gelagert. Er ruht auf dem Kugelkopf des Kolbens (K), der beweglich im feststehenden Druckzylinder (Z) angeordnet ist.

Öffnet der Nocken (N) über den Schwing- oder Schlepphebel (S) das Ventil, wirkt auch eine Kraft über den Kugelkopf auf den Kolben (K). Über das in der Druckkammer (D) befindliche Öl stützt sich der Kolben im feststehenden Druckzylinder (Z) ab. Dabei tritt eine geringe Menge Lecköl zwischen Kolben und Druckzylinder nach oben aus (siehe Ausschnittvergrößerung).

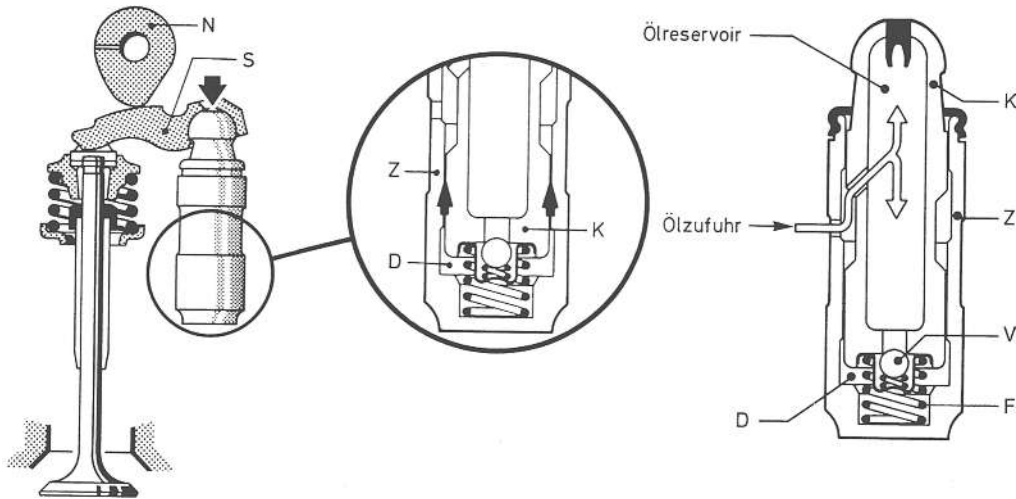


Bild 1.116 Hydraulischer Ventilspielausgleicher am Motor eines Opel. Beim Öffnen des Ventils tritt eine geringe Leckölmenge zwischen Kolben (K) und Zylinder (Z) aus dem Druckraum aus (Pfeile in der Ausschnittvergrößerung).

Durch das Herausdrücken des Lecköls aus dem Druckraum (D) beim Öffnungshub würde nach dem Schließen des Ventils ein Spiel (x) zwischen Nocken und Schwing- oder Schlepphebel (S) entstehen (Bild 1.117). Dazu kommt es aber nicht, denn die Feder (F) drückt den Kolben mit dem Kugelkopf (K) nach oben, sodass der Schwing- oder Schlepphebel stets am Nocken anliegt. Dabei entsteht im Druckraum (D) durch Volumenvergrößerung eine Saugwirkung. Die Verschlusskugel (V) hebt gegen ihre Feder vom Sitz ab, und der Druckraum (D) füllt sich mit Öl aus dem Ölreservoir. Ist der Druckraum (D) gefüllt, verschließt die Verschlusskugel (V) den Druckraum.

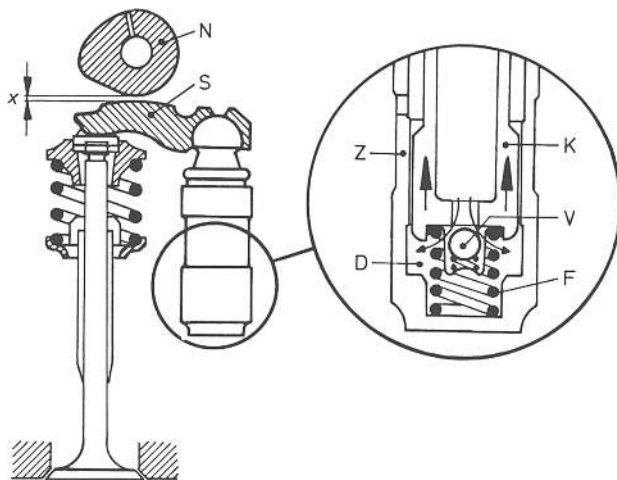


Bild 1.117 Nach dem Schließen des Ventils drückt die Druckfeder (F) den Kolben mit Kugelkopf (K) nach oben (Pfeile in der Ausschnittvergrößerung). In die Druckkammer (D) wird über die geöffnete Verschlusskugel (V) aus dem Ölreservoir Öl angesaugt.

Beim nächsten Öffnen des Ventils wiederholt sich der Vorgang wie beschrieben. Wieder tritt beim Öffnen des Ventils ein wenig Lecköl aus der Druckkammer aus, bei geschlossenem Ventil wird etwas Öl in die Druckkammer gesaugt. Genau betrachtet, findet in jedem hydraulischen Ventilspielausgleicher ein kleiner Ölkreislauf statt:

- Beim Öffnungshub des Nockens wird Öl aus der Druckkammer als Lecköl verdrängt.
- Beim Schließhub des Nockens wird Öl aus dem Ölreservoir in die Druckkammer gesaugt.

1.2.9 Desmodromische Ventilsteuerung

Bei der von Ducati angewandten 2-Ventil- und 4-Ventiltechnik für Motorräder werden die Ein- und Auslassventile jeweils durch einen Öffnungs- und einen Schließnocken betätigt (Bild 1.118). Das zwangsläufige Ventilschließen ist nötig, wenn Ventildfedern es bei großen/schweren Ventilen, großen Ventilhuben und hohen Motordrehzahlen nicht schnell genug schaffen (Ventilschnattern).

Ducati-Motoren drehen bis zu $11\,000\text{ min}^{-1}$. Die Desmo-Version bewirkt auch bei hohen Drehzahlen exakte Steuerzeiten und damit optimierte Motorleistungen. Während der Öffnungkipphebel ohne jede Feder ist, hat der Schließkipphebel eine Rückholfeder. Sie sorgt für die ständige Anlage des Kipphebels am Schließnocken und verhindert so Klappergeräusche.

Das Ventilspiel wird mit Plättchen – jeweils für den Schließer und Öffner – am Ventilenschaft eingestellt.

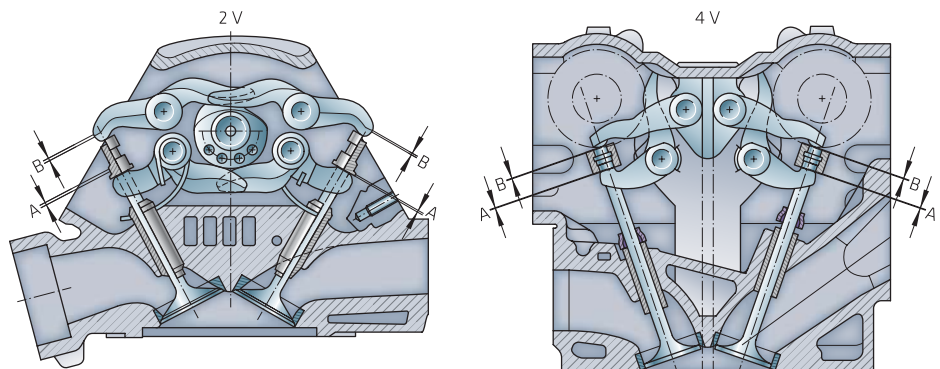


Bild 1.118 Desmodromische Ventilsteuerung (Ducati), B = Öffner, A = Schließer

1.3 Arbeitsverfahren bei Kfz-Motoren

Man unterscheidet:

- das Viertakt-Arbeitsverfahren (Viertaktmotor) und
- das Zweitakt-Arbeitsverfahren (Zweitaktmotor).

1.3.1 Viertakt-Ottomotor

Der Name rührt daher, dass für ein Arbeitsspiel vier Kolbenhübe erforderlich sind, nämlich

- Saughub,
- Verdichtungshub,
- Arbeitshub,
- Auslasshub.

Der Ablauf dieser vier Kolbenhübe (Arbeitsspiel) erfordert zwei Kurbelwellenumdrehungen. Bild 1.119 zeigt den Ablauf eines Arbeitsspiels in schematischer Darstellung.

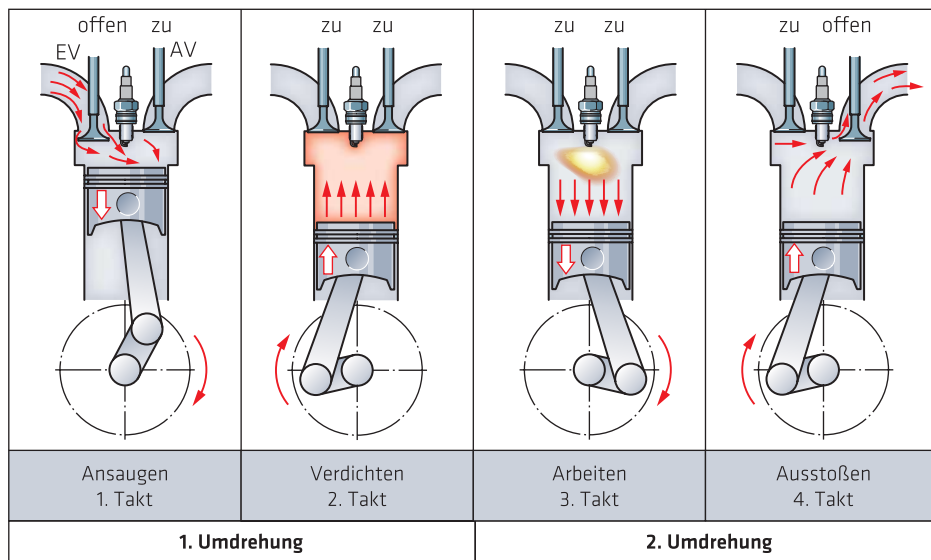


Bild 1.119 Die vier Takte in einem Arbeitsspiel

1. Takt: Saughub

Der Kolben bewegt sich vom OT (oberer Totpunkt) zum UT (unterer Totpunkt) und erzeugt dabei im Zylinder eine Druckminderung durch Saugwirkung.

Durch das geöffnete Einlassventil strömt das angesaugte Kraftstoff-Luft-Gemisch, bzw. bei Direktspritzung nur die Verbrennungsluft in den Zylinder. Damit die Saugwirkung des abwärtsgehenden Kolbens optimal wirksam wird, öffnet das Einlassventil bereits vor dem OT.

Das einströmende Kraftstoff-Luft-Gemisch hat eine gewisse Trägheit, sodass es die durch den Kolben erzeugte Druckminderung nicht sofort ausgleicht. Um einen möglichst hohen Füllungsgrad zu erreichen, nützt man die Strömungsenergie des angesaugten Kraftstoff-Luft-Gemischs aus, indem man das Einlassventil erst verhältnismäßig spät nach dem UT schließen lässt. Trotz der Bewegung des Kolbens vom UT zum OT strömt das einmal in Bewegung befindliche Kraftstoff-Luft-Gemisch in den Zylinder ein. Die beste Füllung des Zylinders erreicht man, wenn das Einlassventil genau nach dem „Aussschwingen“ der Saugsäule – gemeint ist das einströmende Gemisch – schließt.

Trotz dieser Maßnahmen beträgt der Füllungsgrad des Motors bei hohen Drehzahlen nur etwa 75% des Hubvolumens, da sich die Reibungswiderstände im Ansaugweg (Luftfilter, Saugleitung und Ventilquerschnitt) gerade bei hohen Drehzahlen und daher hohen Gasegeschwindigkeiten stark auswirken.

2. Takt: Verdichtungshub

Im Verdichtungshub bewegt sich der Kolben vom UT zum OT.

Das Verdichten selbst beginnt erst, nachdem das Einlassventil geschlossen hat. Der Kolben verdichtet das angesaugte Gemisch. Dabei steigen Druck und Temperatur an, das Kraftstoff-Luft-Gemisch wird zum Gas.

Der Verdichtungsenddruck – der Druck am Ende des Verdichtungshubs – wird in OT-Stellung des Kolbens erreicht. Je nach Verdichtungsverhältnis beträgt er 8 bis 16 bar (Ottomotor); die Temperatur des Gases steigt dabei auf ca. 400°C (673 K). Je größer das Verdichtungsverhältnis, desto höher die Motorleistung bei gleichzeitig geringerem Kraftstoffverbrauch (je größer das Verdichtungsverhältnis, desto höher der thermische Wirkungsgrad).

Grund: Bei höherem Verdichtungsverhältnis (bei Motoren mit Direkteinspritzung 11,5 ... 12,5 : 1) ist der Verbrennungsraum und damit die wärmeaufnehmende Kühlfläche kleiner. Das „Mehr“ an Wärme, das nicht über die Kühlfläche abgeleitet wird, erzeugt mehr Arbeitskraft (Druck) auf den Kolben.

Bei Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses steigen die Kräfte auf das Triebwerk und die Temperaturen stark an, es besteht außerdem die Gefahr, dass die Selbstentzündungstemperatur des Kraftstoffs, 500 bis 600°C (773 bis 873 K), erreicht wird.

3. Takt: Arbeitshub

Die Verbrennung beginnt mit der Entzündung des Gases durch den Zündfunken, der zwischen den Elektroden der Zündkerze überspringt (je nach Drehzahl etwa 0 bis 45° v. OT). Zwischen dem Überspringen des Zündfunken und der Bildung der fortschreitenden Flammenfront vergeht eine Zeit von etwa 0,001 s (Entflammverzögerung). Da die Verbrennungsgeschwindigkeit mit 25 m/s (= 90 km/h) verhältnismäßig niedrig ist, muss die Zündung so früh eingeleitet werden, dass der bei der Verbrennung entstehende Höchstdruck – beim Ottomotor 55 bis 120 bar bei Einspritz- bzw. Turbomotoren – kurz nach dem OT auf den Kolben wirkt. Bei hohen Drehzahlen muss der Zündzeitpunkt also wesentlich früher liegen als bei niedrigeren Drehzahlen (z.B. im Leerlauf).

Die Entzündung des Gases sollte stets an der wärmsten Stelle des Brennraums beginnen, sodass sich die Flammenfront zur kältesten Stelle hin fortbewegt. Durch diese Maßnahme wird der Klopfneigung durch teilweise Selbstentzündung des Gases an heißen Stellen des Brennraums entgegengewirkt. Die Verbrennung des Gemischs soll möglichst schnell vor sich gehen, aber nicht schlagartig. Um dies zu erreichen, spielt die Gestaltung des Brennraums eine große Rolle.

Bei richtig ablaufender Verbrennung wirkt der Verbrennungshöchstdruck kurz nach der OT-Stellung auf den Kolben. Die Verbrennungstemperatur kann dabei bis zu 2000°C (2273 K) betragen. Bei einer Zylinderbohrung von $D = 80$ mm und einem Verbrennungsdruck von zum Beispiel 50 bar beträgt die Kraft, die auf den Kolben wirkt, ca. 2,5 Tonnen. Diese Kraft wird über Kolben, Kolbenbolzen, Pleuelstange und Pleuelwelle in Drehbewegung umgewandelt. Mit der Abwärtsbewegung des Kolbens nehmen Druck und Temperatur stark ab. Einen großen Teil der Wärme nehmen die Zylinderwandungen auf, wobei der Druck absinkt. Am Ende des Arbeitstaktes ist der Druck der Verbrennungsgase auf maximal 3 bis 5 bar abgesunken, die Temperatur auf etwa 900°C (1173 K).

4. Takt: Auslasshub

Das Auslassventil öffnet bereits vor UT, sodass die verbrannten Gase durch ihren Restdruck von etwa 3 bis 5 bar selbsttätig durch die Abgasanlage ins Freie strömen. Nachdem der Kolben den UT durchlaufen hat und sich wieder aufwärts zum OT bewegt, schiebt er die verbrannten Restgase aus.

Nähert sich der Kolben dem OT, nimmt seine Geschwindigkeit ständig ab. Die ausströmenden Abgase kühlen in der Abgasanlage (Kühlung durch Fahrtwind) ab und entspannen sich. Dabei erzeugen sie im Verbrennungsraum eine geringe Druckminderung, die durch das bereits vor dem OT öffnende Einlassventil den nächsten Ansaugtakt einleitet. Um die Saugwirkung der ausströmenden Abgase optimal nutzen zu können, schließt das Auslassventil erst nach dem OT.

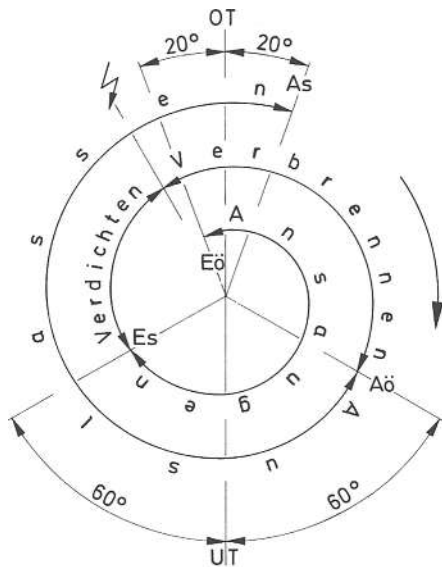


Bild 1.120

Bildliche Darstellung des Arbeitsspiels eines Viertakt-Ottomotors

Bild 1.120 zeigt den Ablauf eines Arbeitsspiels bei angenommenen Ventilsteuerzeiten von

- Einlass öffnet 20° vor OT,
- Einlass schließt 60° nach UT und
- Auslass öffnet 60° vor UT,
- Auslass schließt 20° nach OT.

Der Zündzeitpunkt beträgt im gezeigten Beispiel 30° vor OT.

Miller-Cycle-Motor

Das Besondere an Motoren nach dem Miller-Zyklus ist, dass die Einlassventile später schließen, nämlich ca. 70° nach dem unteren Totpunkt.

Daraus ergeben sich folgende Vorteile:

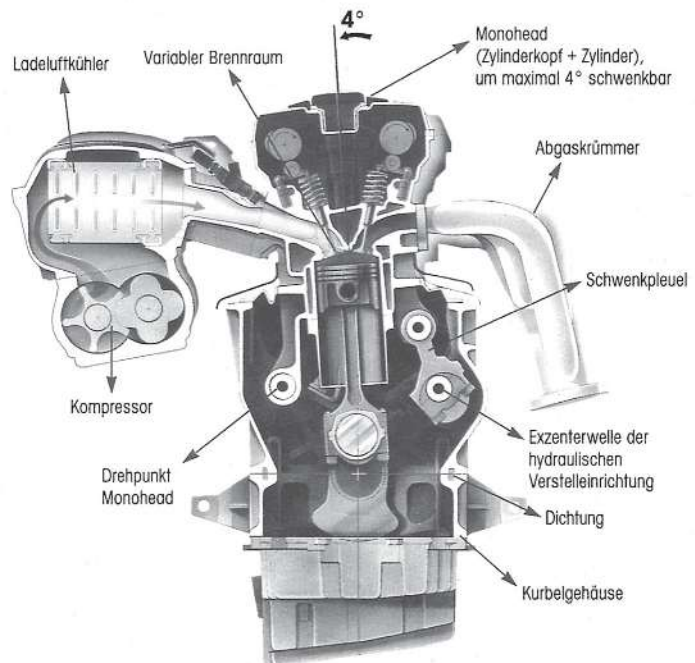
- Reduzierung der Verlustkräfte (späterer Kompressionsbeginn)
- Reduzierung der Verdichtungstemperatur (späterer Kompressionsbeginn)
- Reduzierung der Klopfgefahr und deren Folgen
- Reduzierung der Abgastemperatur
- Reduzierung der Schadstoffe im Abgas (NO_x)

Die geringfügig auftretenden Ladungsverluste zum Ansaugkrümmer werden durch einen mechanischen Lader (Lysholm-Schraubenverdichter) kompensiert. Er verbessert darüber hinaus die Zylinderfüllung (max. 1,6 bar Ladedruck) und das Drehmoment. Der Miller-Cycle-Motor hat bei gleichem Verbrennungsdruck eine geringere Verdichtungstemperatur und ein größeres Drehmoment als vergleichbare Saug- und Turbomotoren.

Variable Kompression

Beim Saab SVC (**S**aab **V**ariable **C**ompression), den es bislang nicht in Serie gibt, ist das Verdichtungsverhältnis zwischen 8:1 (bei Vollast) und 14:1 (bei Teillast) variabel (Bild 1.121). Dies ist möglich, weil Zylinderkopf und Zylinder eine Einheit bilden (Monohead) und lastabhängig um bis zu vier Grad um eine Achse zum Kurbelgehäuse schwenkbar sind. Die Erhöhung der Verdichtung bei Teillast ermöglicht eine verbesserte Kraftstoffausnutzung.

Bild 1.121
SVC-Motor (Saab)



1.3.2 Zweitaktmotor

Der Zweitaktmotor ist durch seine einfache Bauweise gekennzeichnet:

- Wenige Bauteile und geringes Gewicht
- Zur Steuerung des Gaswechsels genügen Kanäle
- Die Schmierung erfolgt durch Öl, das dem Kraftstoff beigemischt wird. Dies kann manuell oder mittels Dosierpumpe erfolgen. Das Mischungsverhältnis liegt je nach Hersteller zwischen 1 : 20 bis 1 : 100
- Für ein Arbeitsspiel (Ansaugen + Verdichten + Arbeiten + Auslassen) ist nur eine Kurbelwellenumdrehung erforderlich

Der Zweitaktmotor hat gegenüber einem Viertakter bei gleicher Drehzahl doppelt so viele Arbeitstakte. Das ist möglich, weil die hin und her laufenden Kolben gleichzeitig im Zylinder und im Kurbelgehäuse auf das Arbeitsspiel einwirken (Bild 1.122). Durch die doppelte

Anzahl der Arbeitstakte erhöhen sich die thermische Belastung und der Verschleiß der unmittelbar beteiligten Bauteile des Motors. Da die Kolben infolge größerer Ausdehnung „fressen“ können, ist eine Vergrößerung des Einbauspiels erforderlich. Dies erhöht wiederum das Laufgeräusch bei kaltem Motor. Trotz Verdopplung der Arbeitstakte hat der Zweitaktmotor gegenüber dem Viertakter nicht die doppelte Motorleistung. Der Grund dafür liegt in unzureichender Zylinderfüllung und den Frischgasverlusten beim Spülvorgang.

Arbeitsweise:

- 1. Takt:** Der Kolben bewegt sich vom unteren zum oberen Totpunkt. Er bewirkt das Ansaugen und Verdichten, sobald der Überströmkanal geschlossen ist. Während er im Kurbelgehäuse einen Unterdruck erzeugt (Vorsaugen), vollzieht sich im Zylinder die Verdichtung, die zum Arbeitsspiel zuvor gehört. Sobald der Kolben mit seiner Unterseite den Ansaugkanal freigibt, strömt Frischgas ins Kurbelgehäuse.
- 2. Takt:** Nach der Zündung erfolgt der Arbeitstakt, der den Kolben zum unteren Totpunkt treibt. Noch während dieses Kolbenhubs folgt das Auslassen, wobei kurz danach Frischgas aus dem Kurbelgehäuse in den Zylinder strömt. Sobald der Kolben mit seiner Unterseite den Einlasskanal verschließt, wird das Frischgasgemisch im Kurbelgehäuse unter Druck gesetzt (Vorverdichtung). Kurz danach gibt die Oberseite des Kolbens den Auslasskanal frei, sodass die Abgase ausströmen können.
Wiederum kurz danach gibt der Kolben den tiefer liegenden Überströmkanal frei, sodass das vorverdichtete Gemisch aus dem Kurbelgehäuse in den Zylinder strömen (Überströmen) kann. Da der Auslasskanal beim Überströmen noch geöffnet ist (offener Gaswechsel), sind Frischgasverluste (Spülverluste) – besonders bei defekter Abgasanlage – unvermeidbar. Der offene Gaswechsel beeinflusst den Kraftstoffverbrauch und die Abgaswerte des Zweitaktmotors negativ.

Zweitaktmotoren sind im Automobilbereich nicht mehr aktuell, da sie die Anforderungen hinsichtlich Kraftstoffverbrauch und Umweltschutz nicht erfüllen. Weit verbreitet ist das Zweitaktprinzip hingegen bei Kleinmotoren aller Art. Durch den Einsatz von Drehschiebern oder Membranventilen wurde die Steuerung des Gaswechsels optimiert. Drehschieber werden durch die Kurbelwelle getrieben, Membranventile sind druckgesteuert.

Um zumindest in einem begrenzten Drehzahlband höchstmögliche Leistungen zu erreichen, müssen die pulsierenden Schwingungen beim Gaswechsel durch richtige Auslegung und Abstimmung der Schwingungssysteme (Ansaug- und Abgassystem) optimiert werden.

Je nach Richtungsverlauf des Spülvorgangs, der Einfluss auf die Motorcharakteristik hat, unterscheidet man zwischen Querstromspülung, Umkehrspülung und Gleichstromspülung.

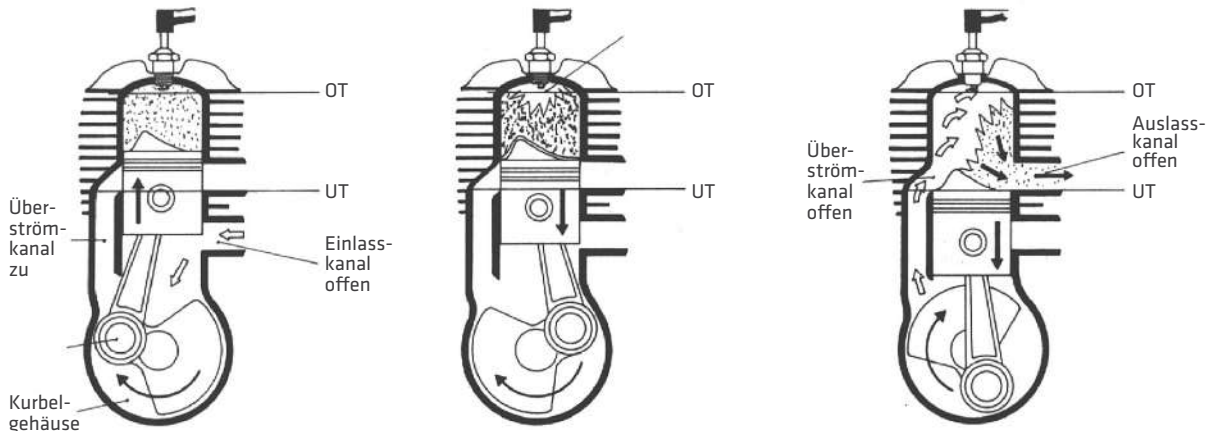


Bild 1.122 Das Arbeitsspiel eines Zweitakt-Ottomotors

- 1) Ansaugen (unten) und gleichzeitiges Verdichten (oben) = 1. Takt
- 2) Arbeiten (oben) und gleichzeitiges Vorverdichten (unten) = 2. Takt
- 3) Ausströmen der Abgase (oben) und Überströmen der Frischgase von unten nach oben = Übergang vom 2. Takt zum 1. Takt

1.3.3 Kompressionsdruckprüfung

Die Kompressionsdruckprüfung gibt Aufschluss über den Zustand der Abdichtung des Verbrennungsraums eines Motors. Dies lässt bei geringer Laufleistung auf lokale Schäden und bei hoher Laufleistung auf entsprechenden Verschleiß schließen, wenn die Messergebnisse schwach sind.

Voraussetzung für die Überprüfung sind folgende Punkte:

- Betriebswarmer Motor
- Dekomprimierter Motor, d.h. alle Zündkerzen bzw. alle Glühkerzen oder alle Einspritzdüsen ausgebaut
- Drosselklappe voll geöffnet
- Volle Batteriespannung
- Vorschriftsmäßiges Ventilspiel
- Gleichmäßig lange Startdauer
- Bei Einspritzmotoren alle Einspritzleitungen abgeschlossen
- Bei Transistor-Zündanlagen Zentralstecker vom Schaltgerät abgezogen, damit das Schaltgerät nicht zerstört wird

Soll der Verdichtungsdruck gemessen werden, müssen Verhältnisse wie bei der Fahrt hergestellt werden. Bei kaltem Motor ist der Verdichtungsdruck niedriger, weil die Erwärmung der angesaugten Luft während der Verdichtung relativ gering ist. Der

angezeigte Wert entspricht dann nicht den Verhältnissen während der Fahrt. Bei einem Motor mit schlechtem Startverhalten kann – nachdem Zündung, Anlassdrehzahl, Ventilspiel und Vergaser/Einspritzanlage als in Ordnung befunden sind – ein Prüfen des Verdichtungsdrucks bei kaltem Motor von Nutzen sein.

Durch das Herausschrauben der Zündkerzen erreicht der Motor beim Durchdrehen durch den Starter eine höhere Drehzahl, die eher den Betriebsbedingungen entspricht als die niedrige Startdrehzahl.

Die Drosselklappe muss voll geöffnet sein, damit der Motor genügend Luft ansaugt. Bei teilweise bzw. ganz geschlossener Drosselklappe kann der zu prüfende Zylinder nicht genügend ansaugen und deshalb nur relativ schwach verdichten.

Die Werte für die Prüfung des Verdichtungsdrucks werden vom Fahrzeughersteller angegeben, wobei zwischen Sollwerten und Mindestwerten (Verschleißgrenze) unterschieden wird. Es ist normal, dass der Kompressionsdruck bei steigender Laufleistung des Motors abnimmt. Die Werte der einzelnen Zylinder sollen aber möglichst gleichmäßig sein. Die max. zulässige Druckdifferenz darf bei betriebswarmem Motor folgende Werte nicht überschreiten:

DB-Ottomotoren – 1,5 bar

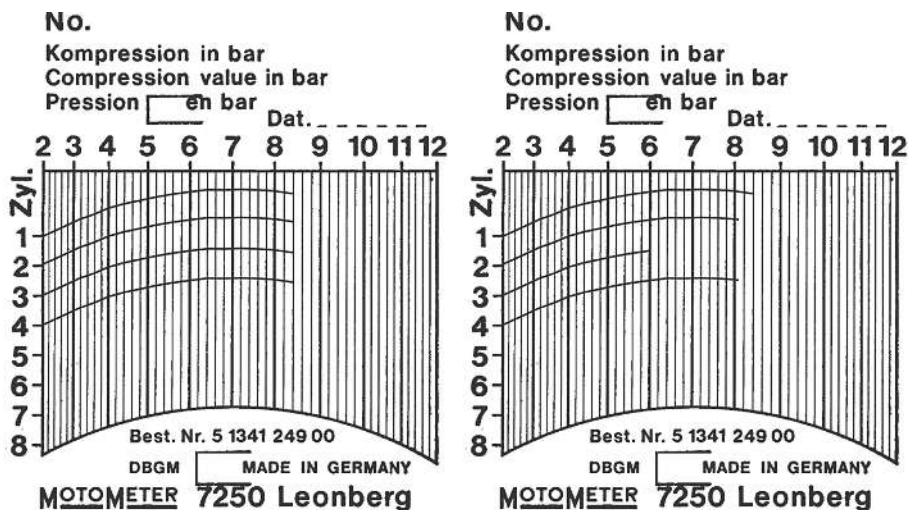
VW-Ottomotoren – 3,0 bar

DB-Dieselmotoren – 3,0 bar

VW-Dieselmotoren – 5,0 bar

Geht man bei Bild 1.123a davon aus, dass der Hersteller den Kompressionsdruck des Ottomotors im Neuzustand des Motors mit 12 bar, den Mindestwert mit 8 bar und die maximal zulässige Druckdifferenz mit 1,5 bar angibt, so wird Folgendes deutlich:

In Bild 1.123a ist der Kompressionsdruck der einzelnen Zylinder praktisch gleichmäßig, liegt aber am untersten Wert. Die gleichmäßige Druckhöhe lässt auf einen intakten Motor mit gleichmäßigem Verschleiß schließen. Der Mindestwert weist darauf hin, dass der Motor eine hohe Laufleistung hinter sich und damit einen hohen Verschleiß hat. Dieses



a)

b)

Bild 1.123 Kompressionsbilder eines Ottomotors

Bild kann sich aber auch bei relativ geringer Laufleistung ergeben, wenn das Fahrzeug überwiegend auf Kurzstrecken eingesetzt war.

Der Motor kann weiterhin problemlos laufen, doch er zeigt bereits Schwächen in der Leistung, im Kraftstoff- und Ölverbrauch. Die Abgaswerte können trotzdem eingehalten werden, solange die Abgasnachbehandlung in Ordnung ist.

Bild 1.123b zeigt einen typischen Ausreißer. Der Kompressionsdruck von Zylinder 3 liegt weit unter dem Mindestwert. Dies weist auf eine Undichtigkeit an den Ventilen und/oder Kolbenringen dieses Zylinders hin. Außerdem ist die maximal zulässige Druckdifferenz zwischen Zylinder 3 und den übrigen Zylindern deutlich überschritten.

Der Motor hat damit nicht nur die zuvor aufgezeigten Schwächen, sondern er läuft infolge dieser Differenz bei nur 4 Zylindern im Leerlauf schon deutlich spürbar unrund.

1.3.4 Druckverlusttest

Mit einem Druckverlusttester lässt sich die Ursache für den nachlassenden Verdichtungsdruck lokalisieren. Zunächst ist der Tester an die hauseigene Druckluftversorgung anzuschließen und seine Anzeige auf 0% Druckverlust zu justieren.

Danach schraubt man z.B. anstelle der Zündkerze in den zu prüfenden Zylinder einen Adapter und steckt dort eine Zünd-OT-Sucherpfeife auf. Beim Drehen der Kurbelwelle entweicht während des Verdichtungstaktes Luft aus dem Zylinder, wobei ein Pfeifton entsteht.

Der Zünd-OT ist gefunden, sobald der Pfeifton endet. Jetzt blockiert man den Motor, zieht die Sucherpfeife ab und verbindet den Druckverlusttester über einen Druckluftschlauch mit dem Adapter. Die in den Zylinder einströmende Druckluft entweicht mehr oder weniger über alle undichten Stellen (Ventile, Kolbenringe und Zylinderkopfdichtung), wobei der Tester den Grad der Undichtheit in Prozent anzeigt.

Die Überprüfung ist in drei Kolbenstellungen durchzuführen, nämlich

- im Zünd-OT,
- bei etwa $\frac{1}{3}$ Kolbenhub,
- kurz vor dem Öffnen des Auslassventils, d.h. ca. 60° vor dem unteren Totpunkt.

Per Hör- bzw. Sichtprüfung am offenen Saugrohr, Auspuff, Öleinfüllstutzen, Kühler/Ausdehnungsgefäß und an den benachbarten Zündkerzenbohrungen erkennt man, wo der Fehler liegt bzw. wo er am größten ist. Die Überprüfung ist bei betriebswarmem Motor durchzuführen, wobei die max. Abweichung zwischen den Zylindern 5% betragen darf.

Zulässiger Druckverlust:

- Insgesamt max. 25% (Grenzwert)
- An den Kolben und Kolbenringen max. 20%
- An den Ventilen und der Zylinderkopfdichtung max. 10%

Bewertung:

- Druckverlust bis 6% = sehr gut
- Druckverlust bis 12% = gut

- Druckverlust bis 20% = befriedigend
- Druckverlust bis 25% = ausreichend

1.3.5 Ungleichförmigkeit des Motors

Der Motorlauf ist durch den ständigen Wechsel zwischen dem Arbeitstakt und den Leertakten ungleichförmig. So entstehen Drehzahlschwankungen, die als Laufunruhe des Motors spürbar sind.

Die Ungleichförmigkeit nimmt umso mehr zu,

- je kleiner die Zylinderzahl ist (großer Zündabstand),
- je niedriger die Motordrehzahl ist,
- je größer die Kolbenkraftunterschiede sind.

Die Ungleichförmigkeit ist beim Dieselmotor infolge kräftigerer Arbeitstakte größer als beim Ottomotor und kann zu Getrieberasseln bei Leerlauf führen.

1.3.6 Drehschwingungsdämpfer

Der Drehschwingungsdämpfer besteht aus einer Festscheibe = kleine Masse und einem Schwungrad = große Masse (Bild 1.124). Beide sind durch eine Gummieinlage miteinander vulkanisiert und deshalb um einige Winkelgrade gegeneinander verdrehbar. Die Festscheibe ist mit der vorderen Stirnseite der Kurbelwelle verschraubt.

Der Drehschwingungsdämpfer gleicht Drehschwingungen der Kurbelwelle aus. Bei plötzlicher Beschleunigung bleibt der Schwungrad um einige Winkelgrade hinter der Kurbelwellendrehzahl zurück, während er bei Gaswegnahme entsprechend voreilt.

Drehschwingungsdämpfer findet man bei 6-Zylinder-Reihenmotoren, z.T. auch bei 4-Zylinder-Reihenmotoren und bei 8-Zylinder-V-Motoren. Der Drehschwingungsdämpfer ist nicht nur für die Laufruhe des Motors, sondern auch für einen gleichmäßigen und verschleißarmen Nockenwellenantrieb wichtig.

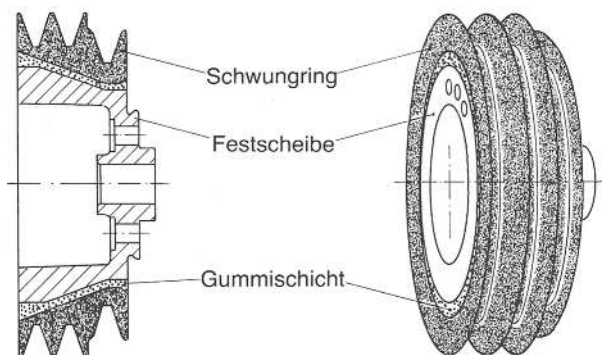


Bild 1.124
Drehschwingungsdämpfer

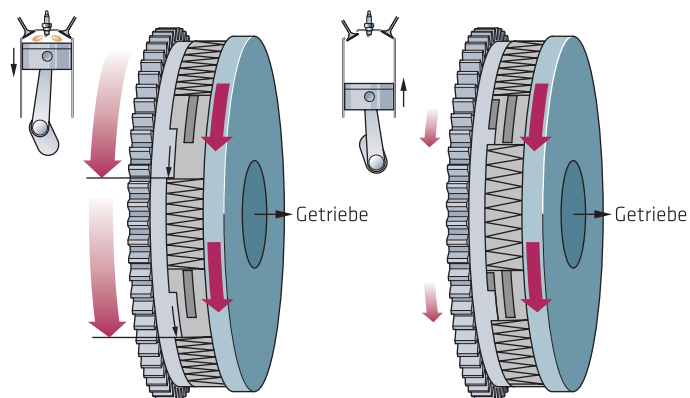
1.3.7 Zweimassenschwungrad

Die durch Zündfrequenzen an der Kurbelwelle ausgelösten Drehschwingungen übertragen sich üblicherweise auf das Getriebe, den Antriebsstrang und über die Achsaufhängung auf die Karosserie. Sie machen sich z.B. in Form von Getrieberasseln bzw. als Dröhn- und Brummgeräusche negativ bemerkbar. Das lässt sich in gewissem Umfang durch Torsionsfedern in der Mitnehmerscheibe der Kupplung unterdrücken.

Das Zweimassenschwungrad ist mit der hinteren Stirnseite der Kurbelwelle verschraubt und besteht wie der Drehschwingungsdämpfer aus zwei Massen (Bild 1.125), die miteinander beweglich vernietet sind. Zwischen den beiden Massen befindet sich ein mehrstufiges Federdämpfersystem, bestehend aus drei Federgruppen und einer Reibeinrichtung. Der bewegliche Teil des Zweimassenschwungrads ist gegen Federkraft max. bis zu einem festen Anschlag verdrehbar. Beim Starten und Abstellen des Motors entsteht die größte Verdrehung zwischen den Schwunmassen, d.h., alle Federgruppen sind in Aktion. Bei Leerlaufdrehzahl arbeiten die Dämpferfedern der 1. Stufe, während im Fahrbetrieb je nach Lastzustand des Motors die Dämpferfedern der 2. und 3. Stufe wirksam sind.

Die Mitnehmerscheibe der Kupplung hat hier keine Torsionsfedern. Das Zweimassenschwungrad verhindert das Schütteln des Motors und das Getrieberasseln bei Leerlauf, störende Geräusche im Antriebsstrang sowie Dröhn- und Brummgeräusche in der Karosserie. Das Fahrzeug kann deshalb ohne Komforteinbuße mit niedriger Geschwindigkeit im hohen Gang bei günstigem Kraftstoffverbrauch und verringertem Schadstoffausstoß gefahren werden.

Bild 1.125
Zweimassen-
Schwungrad



Zweimassenschwungrad mit Planetengetriebe (Planeten-ZMS)

Das im Zweimassenschwungrad integrierte Planetengetriebe (Bild 1.126) ermöglicht eine variable Übersetzung. Durch diese Maßnahme lässt sich das Dämpfungssystem optimal abstimmen und der Fahrkomfort erhöhen.

Weitere Vorteile sind:

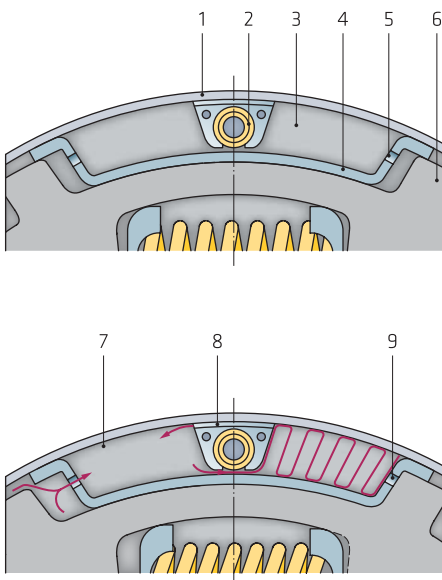
- Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs, da der Fahrer ohne Komfortverlust früher in einen höheren Gang schalten kann
- Reduzierung der Belastung des gesamten Antriebs sowie der Nebenaggregate und damit Erhöhung der Lebensdauer

**Bild 1.126**

Zweimassenschwungrad mit Planetengetriebe (Planeten-ZMS)

Hydrodamp

Der Hydrodamp ist eine Kombination aus einem Feder-Masse-System und einer hydraulischen Dämpfung (Bild 1.127). Dieser besonders elastische Torsionsschwingungsdämpfer löst die gewachsenen Schwingungsprobleme in den Antriebssträngen moderner Nutzfahrzeuge. Ursache für die Schwingungsprobleme sind die ständig wachsenden Motordrehmomente, besonders im unteren Drehzahlbereich. Sie verstärken bei niedrigen (sparsamen) Drehzahlen die Schwingungen, die ihrerseits den Komfort beeinträchtigen und zu vorzeitigen Schäden im Antriebsstrang führen. Die verbesserte Dämpfung ist erforderlich, um gerade die extremen Belastungen beim Anfahren auszugleichen. Dies trifft besonders dann zu, wenn infolge großer Lasten die Gefahr besteht, den Motor abzuwürgen.

**Bild 1.127**

Hydrodamp (Voith)

- 1 Primärteil
- 2 fest stehender Anschlag
- 3 Dämpfungsmedium
- 4 schwimmender Dämpfungsring
- 5 integriertes Rückschlagventil
- 6 Sekundärteil
- 7 Nachfüllwirkung
- 8 Dämpfungsarbeit durch Drosselwirkung
- 9 Rückschlagventil geschlossen

Kurbelwellen-Startergenerator

Die Funktion des Anlassers und des Generators kann von einem im Bereich der Schwungscheibe platzierten Anlasser-Generator (Bild 1.128) übernommen werden.

Bild 1.128
Anlasser-Generator



Er kann den Motor anlassen, das Stromnetz mit Strom versorgen und beim Beschleunigen für zusätzlichen Schub sorgen. Verschleißteile wie Keilriemen, Anlasser-Zahnkranz und Anlasserritzel werden damit überflüssig. Das Starten wird komfortabel und vom Fahrer nicht mehr wahrgenommen. Dies macht eine echte Start-Stopp-Automatik möglich.

1.3.8 Ausgleichswellen

Hubkolbenmotoren sind für ihren mehr oder weniger unruhigen Lauf bekannt. Ursache dafür ist neben der Ungleichförmigkeit die auf- und abwärts stampfende Bewegung der Kolben.

Während die Kurbelwelle durch Hubzapfenversatz, Ausgleichsgewichte und genaue Wuchtung als rotierender Körper ausgeglichen ist und keine Schwingungen (1. Ordnung) anregt, verursachen die hin und her gehenden (oszillierenden) Massen des Kurbeltriebs sowie die Gaskräfte beim Arbeitstakt Schwingungen (2. Ordnung). Sie wirken in Zylinderdichtung und in Drehrichtung. Dabei entstehen Vibrationen und Geräusche, die den Komfort beeinträchtigen. Je kleiner die Zylinderzahl bzw. je größer die Kolben, desto größer das Problem.

Ausgleichswellen mit errechneten Unwuchten bringen die Lösung, denn sie sorgen durch abgestimmte Gegenschwingungen für die gewünschte Laufruhe (Bild 1.129).

Während 4-Zylindermotoren zur Optimierung der Laufruhe zwei Ausgleichswellen benötigen, die zueinander entgegengesetzt und mit doppelter Kurbelwellendrehzahl laufen, genügt bei 5-Zylindermotoren wie auch bei den neuen V6-Motoren von Mercedes eine mit Kurbelwellendrehzahl gegenläufig drehende Ausgleichswelle. 6-Zylinder-Reihenmotoren und V12-Motoren brauchen infolge ihres Massenausgleichs, der bei V8-Motoren durch entsprechende Gegengewichte an der Kurbelwelle ausgeglichen wird, keine Ausgleichswellen.

Ralf Deußen
Volkert Schlüter
Axel Sprenger

Meisterwissen im Kfz-Handwerk: Technik 2

6. aktualisierte und bearbeitete Auflage



Weitere Informationen:

www.autofachmann.de/buch



www.facebook.com/autofachmann.autokaufmann/



www.instagram.com/auto_fachmann



YouTube www.youtube.com/c/autoFACHMANNKAUFMANN

ISBN 978-3-8343-3445-9

6. Auflage 2020

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.

Titelbild: AdobeStock, adimas

Printed in Germany

Copyright 2020 by Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, Würzburg

Grußwort

Ihr Meisterprojekt!

Das Kfz-Gewerbe verändert sich rasant. Mobilität wird technisch immer komplexer, Vertriebswege verändern sich. Die Auswirkungen auf Werkstatt, Aftersales, Management und Auftragsabwicklung sind gravierend. Dem trägt auch die neue Meisterprüfungsverordnung Rechnung.

Die in diesem Buch vermittelte Theorie versteht sich als Bindeglied zwischen theoretischem Hintergrundwissen und praktischer Anwendung in Ihrem Kfz-Betrieb! Wissen und Können, Theorie und Praxis sind auf den neuesten Stand gebracht.

Im Kern berücksichtigt die neue Meisterverordnung den immensen technologischen Wandel, den wir auf dem Automobilssektor im letzten Jahrzehnt zu verzeichnen hatten. Diese technologische Entwicklung zu reflektieren ist wichtig, damit wir die Inhalte für Aus- und Weiterbildung auf entsprechendem Niveau vorhalten können und für die Betriebe in konkurrenzfähige Kompetenz umsetzen. Elektromobilität, alternative Antriebe und Umweltschutz machen zudem Felder auf, die in der Meisterverordnung alter Prägung längst nicht in gebührendem Maße berücksichtigt waren.

Die Meisterrolle hat sich deutlich verändert, nicht erst mit der neuen Verordnung. Der Meister ist nicht umsonst im DQ- und EQ-Rahmen gleichgesetzt mit der Stufe 6 im Hochschulabschluss, dem Bachelor.

Organisation und Management, haben Handarbeit und praktisches Tun weitgehend abgelöst. Der Meister entwickelt sich immer stärker zum Manager! Im Prozess um Fahrzeug- und Kundendaten haben sich die Abläufe komplett verändert. Das Tablet ist heute allgegenwärtig als Datenträger und Organisationshilfe. Von der Preisbildung für bestimmte Inzahlungnahmen bis hin zur Reparaturkalkulation ist heute praktisch alles durchgehend digital abgebildet. Der Serviceauftrag verändert sich, rechtliche Aspekte werden wichtiger! Kommunikationsinstrumente gewinnen für die Kundenbindung an Bedeutung. Aber auch auf dem Weg vom Kunden- zum Werkstattauftrag kann viel falsch, aber eben auch richtig gemacht werden.

Ich wünsche Ihnen bei der Vermehrung der gewonnen Erkenntnisse viel Spaß und beim Lernerfolg einen hohen Wirkungsgrad!

Freundlichst



Ihr Wilhelm Hülsdonk

Vizepräsident und Bundesinnungsmeister
Zentralverband Deutsches Kraftfahrzeuggewerbe e.V.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Grußwort | 5 |
| 1 Fahrzeugbremsen | 13 |
| 1.1 Hydraulische Bremsen | 14 |
| 1.1.1 Hauptzylinder | 14 |
| 1.1.2 Tandem-Hauptzylinder | 18 |
| 1.1.3 Tandem-Hauptzylinder mit Volumenverbraucher | 21 |
| 1.1.4 Tandem-Hauptzylinder mit Zentralventil | 22 |
| 1.1.5 Gestufter Tandem-Hauptzylinder | 23 |
| 1.1.6 Gestufter Tandem-Hauptzylinder mit Zentralventil | 24 |
| 1.1.7 Spezial-Tandem-Hauptzylinder (Twintax) | 25 |
| 1.1.8 Elektrohydraulische Bremse (EHB) – Brake-by-Wire-Bremssystem – Sensotronic Brake Control (SBC) | 26 |
| 1.2 Wartung der hydraulischen Bremsen | 28 |
| 1.2.1 Bremsflüssigkeit | 28 |
| 1.2.2 Entlüftung hydraulischer Bremsanlagen | 31 |
| 1.2.3 Hydraulische Dichtheitsprüfungen | 33 |
| 1.2.4 Bremsleitungen und Bremsschläuche | 34 |
| 1.2.5 Lagerung der Gummiformteile | 35 |
| 1.3 Radbremsen | 36 |
| 1.3.1 Trommelbremsen | 36 |
| 1.3.2 Scheibenbremsen | 45 |
| 1.3.3 Elektromechanische Feststellbremse | 58 |
| 1.4 Bremskraftverteilung | 59 |
| 1.4.1 Bremskraftverteiler | 60 |
| 1.4.2 Elektronische Bremskraftverteilung (EBV) | 60 |
| 1.5 Bremskraftverstärker | 61 |
| 1.5.1 Saugluftverstärker | 61 |
| 1.5.2 Bremsassistenten (BAS) | 64 |
| 1.5.3 Zentralhydraulik | 66 |
| 1.5.4 Druckluftverstärker | 67 |
| 1.6 Bremsweg | 68 |
| 1.6.1 Antiblockiersystem (ABS) | 68 |
| 1.6.2 Hydroaggregat | 77 |
| 1.6.3 Bremsregelung mit Giermoment-Aufbauverzögerung | 86 |
| 1.6.4 ABS bei Allradantrieb | 87 |
| 1.6.5 Antriebsschlupfregelung (ASR) | 88 |
| 1.6.6 Motorschleppmomentregelung (MSR) | 89 |
| 1.6.7 Antiblockiersystem (ABS) mit elektronischer Differenzialsperre (EDS) | 89 |
| 1.6.8 Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP) | 90 |
| 1.7 Anhängerbremsen | 97 |
| 1.7.1 Auflaufbremsen | 98 |
| 1.8 Druckluftbremsen | 98 |
| 1.8.1 Begriffserklärungen | 99 |

| | | |
|-------------|---|------------|
| 1.8.2 | Zeichnungssymbole nach DIN 86 265 | 101 |
| 1.8.3 | Anschlussbezeichnungen für Druckluftgeräte | 102 |
| 1.8.4 | Druckluftleitungssystem | 103 |
| 1.8.5 | Druckluftbremse nach EU-Richtlinie | 105 |
| 1.8.6 | Funktionsbeschreibung der Bremsanlage nach EU-Richtlinie (Motorwagen und Anhänger) | 108 |
| 1.9 | Bremsanlage im Motorwagen | 110 |
| 1.9.1 | Funktion der Luftbeschaffungsanlage | 110 |
| 1.9.2 | Funktion der Betriebsbremsanlage | 118 |
| 1.9.3 | Funktion der Feststellbremse | 134 |
| 1.9.4 | Funktion der Anhängersteuerung | 144 |
| 1.10 | Anhänger-Bremsanlage (Funktion) | 149 |
| 1.10.1 | Rohrleitungsfilter | 150 |
| 1.10.2 | Anhänger-Bremsventil | 150 |
| 1.10.3 | Kombi-Löseventil | 154 |
| 1.10.4 | Rückhalteventil | 156 |
| 1.10.5 | ALB bei Fahrzeugen mit Luftfederung | 156 |
| 1.11 | Dauerbremsanlage | 157 |
| 1.11.1 | Motorstaudruckbremse | 158 |
| 1.11.2 | Konstantdrossel | 158 |
| 1.11.3 | Wirbelstrombremse (Retarder) | 158 |
| 1.11.4 | Hydrodynamische Strömungsbremse (Retarder) | 159 |
| 1.12 | Voreilung | 161 |
| 1.13 | Zugabstimmung | 162 |
| 1.14 | Antiblockiersystem (ABS) | 163 |
| 1.15 | Elektronisch geregeltes Bremssystem (EBS) | 165 |
| 1.16 | Rollen-Bremsenprüfstand | 171 |

2 Elektrik/Elektronik 175

| | | |
|------------|---|------------|
| 2.1 | Grundlagen | 175 |
| 2.1.1 | Spannung, Strom, Widerstand | 176 |
| 2.1.2 | Unterschiede der Spannungserzeugung und Spannungsarten | 179 |
| 2.1.3 | Stromarten und Wirkungen des elektrischen Stroms | 182 |
| 2.1.4 | Stromkreis mit mehreren Verbrauchern | 183 |
| 2.1.5 | Leiterwiderstand | 185 |
| 2.1.6 | Kabelquerschnittsbestimmung | 186 |
| 2.1.7 | Widerstand und Temperatur | 187 |
| 2.1.8 | Halbleiterbauelemente | 187 |
| 2.1.9 | Magnetismus | 191 |
| 2.1.10 | Hilfsmittel bei der Fehlersuche in elektrischen Anlagen | 194 |
| 2.1.11 | Datenbussysteme | 213 |
| 2.2 | Zündanlagen | 233 |
| 2.2.1 | Grundoszillogramme | 233 |
| 2.2.2 | Fehlerhafte Oszillogramme und ihre Auswertung | 234 |
| 2.2.3 | Kontaktlose Transistorzündanlagen | 236 |
| 2.2.4 | Zweifunken-Zündspulen | 244 |
| 2.2.5 | Einzelfunken-Zündspulen | 246 |
| 2.2.6 | Fehlersuche am Motormanagement | 249 |
| 2.2.7 | Zündkerzen | 250 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 2.3 | Batterien für Kraftfahrzeuge | 257 |
| 2.3.1 | Aufbau der Batterie | 257 |
| 2.3.2 | Chemische Vorgänge beim Laden und Entladen (vereinfachte Darstellung) | 258 |
| 2.3.3 | Begriffsbestimmungen und technische Eigenschaften | 259 |
| 2.3.4 | Betriebsverhalten | 261 |
| 2.3.5 | Laden von Batterien | 262 |
| 2.3.6 | Behandlung von Batterien | 264 |
| 2.3.7 | Beurteilung und Prüfen von Batterien | 266 |
| 2.3.8 | Batteriearten | 267 |
| 2.4 | Generatoren für Kraftfahrzeuge | 268 |
| 2.4.1 | Drehstromgeneratoren | 269 |
| 2.4.2 | Begriffsbestimmungen und technische Eigenschaften | 275 |
| 2.4.3 | Regler für Generatoren | 276 |
| 2.4.4 | Überprüfen von Generatoren | 279 |
| 2.4.5 | Instandsetzen von Generatoren | 281 |
| 2.4.6 | Der Batteriesensor | 284 |
| 2.5 | Starter | 285 |
| 2.5.1 | Starterarten | 285 |
| 2.5.2 | Prüfen von Startern mit Starterprüfständen | 287 |
| 2.6 | Kabelnetz – Bordnetz | 288 |
| 2.6.1 | Schalter | 288 |
| 2.6.2 | Relais | 289 |
| 2.6.3 | Sicherungen | 290 |
| 2.6.4 | Störungen im Kabelnetz | 290 |
| 2.7 | Beleuchtungseinrichtungen | 293 |
| 2.7.1 | Bauartgenehmigung | 293 |
| 2.7.2 | Einbauvorschriften | 294 |
| 2.7.3 | Lichttechnische Grundlagen | 295 |
| 2.7.4 | Scheinwerfersysteme | 299 |
| 2.7.5 | Leuchtweitenregulierung (LWR) | 302 |
| 2.7.6 | Intelligente Lichtsysteme | 303 |
| 2.7.7 | Die Scheinwerfereinstellung | 305 |
| 2.7.8 | Steuerung der Beleuchtung | 306 |
| 2.8 | Sonstige elektrische Einrichtungen | 309 |
| 2.8.1 | Vorglühanlagen | 309 |
| 2.8.2 | Wischermotoren | 311 |
| 2.8.3 | Zentralverriegelung | 313 |
| 2.8.4 | Wegfahrsperren | 314 |
| 2.8.5 | Diebstahl-Warnanlagen | 316 |
| 2.8.6 | Fahrassistenzsysteme | 318 |
| 2.8.7 | Airbagsysteme | 320 |
| 2.8.8 | Kfz-Klimaanlage | 340 |

3 Werkstoffkunde

353

| | | |
|------------|--|------------|
| 3.1 | Chemische und physikalische Grundkenntnisse | 353 |
| 3.1.1 | Chemische Grundkenntnisse | 353 |
| 3.1.2 | Physikalische Grundkenntnisse | 356 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 3.1.3 | Mechanische und technologische Eigenschaften der Werkstoffe | 357 |
| 3.2 | Einteilung der Werkstoffe | 358 |
| 3.3 | Eisen und Stahl | 360 |
| 3.4 | Roheisengewinnung | 360 |
| 3.4.1 | Hochofen | 360 |
| 3.4.2 | Vorgänge im Hochofen | 361 |
| 3.4.3 | Erzeugnisse des Hochofens | 361 |
| 3.4.4 | Direktreduktion von Eisenerzen | 362 |
| 3.5 | Gusseisenwerkstoffe | 362 |
| 3.5.1 | Grauguss (Schmelztemperatur 1150 bis 1250°C/1423 bis 1523 K) | 362 |
| 3.5.2 | Kugelgraphitguss (Schmelztemperatur 1300 bis 1400°C/3573 bis 1673 K) | 364 |
| 3.5.3 | Temperguss | 365 |
| 3.5.4 | Gusseisen mit Vermikulargrafit | 366 |
| 3.6 | Stahlerzeugung | 367 |
| 3.6.1 | Stahlherstellungsverfahren | 367 |
| 3.6.2 | Bezeichnung und Klassifizierung der Stähle | 371 |
| 3.7 | Wärmebehandlung von Stählen | 373 |
| 3.7.1 | Härten, Anlassen und Vergüten von Stahl | 373 |
| 3.8 | Oberflächenhärtung | 376 |
| 3.9 | Härteprüfungen | 379 |
| 3.10 | Werkstoffprüfung | 380 |
| 3.11 | Nichteisenwerkstoffe (NE-Metalle) | 382 |
| 3.11.1 | Leichtmetalle (Dichte unter 5 kg/dm ³) | 383 |
| 3.11.2 | Schwermetalle (Dichte über 5 kg/dm ³) | 387 |
| 3.12 | Sintern und Sinterwerkstoffe | 391 |
| 3.13 | Sicherheitsglas | 394 |
| 3.13.1 | Glasherstellung | 394 |
| 3.13.2 | Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG) | 395 |
| 3.13.3 | Verbundsicherheitsglas (VSG) | 396 |
| 3.13.4 | Kunststoffglas | 397 |
| 3.13.5 | Kennzeichnung von Sicherheitsglas | 397 |
| 3.14 | Kunststoffe | 398 |
| 3.14.1 | Herstellung von Kunststoffen | 398 |
| 3.14.2 | Aufbau von Kunststoffen | 400 |
| 3.14.3 | Eigenschaften, Verwendung, Handelsbezeichnung von Kunststoffen | 401 |
| 3.14.4 | Kunststoffabfall: Vermeidung und Wiederverwertung | 407 |
| 3.15 | Wälzlager und ihre Anwendung im Kfz | 407 |
| 3.15.1 | Rillenkugellager | 409 |
| 3.15.2 | Schräggugellager | 409 |
| 3.15.3 | Kegelrollenlager | 410 |
| 3.15.4 | Axialzylinderrollenlager | 410 |
| 3.15.5 | Zylinderrollenlager | 410 |
| 3.15.6 | Schulterkugellager | 411 |
| 3.15.7 | Nadellager | 412 |
| 3.15.8 | Vierpunktlager | 412 |
| 3.15.9 | Lagereinheiten als Radlager in Personenkraftwagen (Bilder 3.70 und 3.71) | 413 |
| 3.15.10 | Besondere Hinweise für die Anwendung von Wälzlagern | 413 |
| 3.15.11 | Besondere Ausführungen von Wälzlagern | 414 |

| | | |
|-------------|---|------------|
| 3.16 | Gewindearten und ihre praktische Anwendung | 416 |
| 3.16.1 | Whitworth-Gewinde | 416 |
| 3.16.2 | Whitworth-Feingewinde (W) | 416 |
| 3.16.3 | Metrisches Gewinde (M) | 417 |
| 3.16.4 | Metrisches Feingewinde (M) | 417 |
| 3.16.5 | Trapezgewinde (Tr) | 418 |
| 3.16.6 | Sägengewinde (S) | 418 |
| 3.16.7 | Flachgewinde | 418 |
| 3.16.8 | Edison-Gewinde (E) | 419 |
| 3.16.9 | Fertigung von Schrauben und Muttern | 419 |
| 3.16.10 | Arbeiten mit Schrauben | 422 |

4 Kraft- und Schmierstoffe 425

| | | |
|------------|---|------------|
| 4.1 | Grundlagen | 425 |
| 4.1.1 | Entstehung des Erdöls | 425 |
| 4.1.2 | Verarbeitung des Erdöls | 427 |
| 4.1.3 | Grundbegriffe der Schmierstofftechnik | 429 |
| 4.2 | Schmierstoffe | 431 |
| 4.2.1 | Aufgaben der Motorenöle | 431 |
| 4.2.2 | Einteilung der Motorenöle | 432 |
| 4.2.3 | SAE-Viskositätsklassen (DIN 51 511 und DIN 51 512) | 432 |
| 4.2.4 | Leistungsklassen (Qualitätsklassen) für Motorenöle | 433 |
| 4.2.5 | Synthetische Motorenöle | 437 |
| 4.2.6 | Zweitakt-Motorenöle | 438 |
| 4.2.7 | Zweitrafinate (Recyclingöl) | 441 |
| 4.2.8 | Motorenölwechsel-Intervalle | 441 |
| 4.2.9 | Motorenölverbrauch | 442 |
| 4.2.10 | Motorenöl-Zusatzmittel | 442 |
| 4.2.11 | Additive für Motorenöle | 442 |
| 4.2.12 | Motorradöle | 444 |
| 4.2.13 | Bioöle | 444 |
| 4.3 | Getriebeöle | 445 |
| 4.3.1 | Aufgaben | 445 |
| 4.3.2 | SAE-Viskositätsklassen | 448 |
| 4.3.3 | Leistungsklassen für Getriebeöle | 449 |
| 4.3.4 | Automatik-Getriebeöl (Automatic Transmission Fluid = ATF) | 450 |
| 4.3.5 | Nfz-Getriebeöle | 450 |
| 4.3.6 | Getriebeöl-Wechselintervalle | 450 |
| 4.4 | Schmierfette | 451 |
| 4.5 | Abfallmanagement in Kfz-Betrieben | 452 |
| 4.5.1 | Sammlung und Entsorgung von Abfällen/Reststoffen | 452 |
| 4.5.2 | Nachweis über entsorgte und verwertete Reststoffe | 455 |
| 4.5.3 | Lagerung von Altöl | 458 |
| 4.5.4 | Transport von Altöl | 459 |
| 4.5.5 | Altfahrzeugverordnung | 459 |
| 4.6 | Kraftstoffe | 460 |
| 4.6.1 | Anforderungen an Otto-Kraftstoffe | 461 |
| 4.6.2 | Otto-Kraftstoff-Additive | 466 |
| 4.6.3 | Hightech-Kraftstoffe | 467 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 4.7 | Dieselmotoren | 467 |
| 4.7.1 | Dieselmotoren-Additive | 471 |
| 4.7.2 | AdBlue® | 472 |
| 4.8 | Alternative Kraftstoffe | 473 |
| 4.8.1 | Erdgas (CNG) | 473 |
| 4.8.2 | Methanol | 479 |
| 4.8.3 | Wasserstoff (H ₂) | 481 |
| 4.8.4 | Elektroantrieb | 483 |
| 4.8.5 | Biodiesel | 483 |
| 4.8.6 | Pflanzenöl | 485 |
| 4.9 | Umgang mit Kraftstoffen und Kennzeichnung | 485 |
| 5 | Hybridantriebe | 487 |
| 5.1 | Hybridfahrzeuge | 488 |
| 5.1.1 | Der 60-Volt-Niedervolt-Hybridantrieb | 505 |
| 5.1.2 | Opel Ampera 1. Generation (Range Extender) | 509 |
| 5.1.3 | Hybridantrieb im Toyota Prius | 510 |
| 5.1.4 | Honda-Insight-Mildhybrid-Technik | 516 |
| 5.1.5 | BMW-Active-Hybridantriebe | 517 |
| 5.1.6 | Allrad-Hybrid von BMW | 520 |
| 5.1.7 | Audi A3 e-tron als Plug-in-Hybrid | 521 |
| 5.1.8 | Audi A1 e-Tron Plug-in-Hybrid | 523 |
| 5.1.9 | Hybridantrieb im VW Touareg | 524 |
| 5.1.10 | Hybridantrieb im Sportwagen Porsche 918 und GT3 | 527 |
| 5.1.11 | Porsche Panamera S E-Hybrid | 529 |
| 5.1.12 | Diesel-Hybridsystem Citroën | 531 |
| 5.1.13 | Hybridsystem Mercedes mit Diesel- und Ottomotor | 533 |
| 5.1.14 | Hyundai Ioniq Hybrid und Plug-in-Hybrid | 535 |
| 5.2 | Hybrid im Nutzfahrzeug | 538 |
| 5.2.1 | Mercedes Canter Eco Hybrid | 539 |
| 5.3 | Arbeiten an Hochvoltssystemen | 539 |
| 6 | Elektrofahrzeuge | 547 |
| 6.1 | Antriebstechnik für Elektrofahrzeuge | 550 |
| 6.2 | Ausgewählte Elektrofahrzeuge | 559 |
| | Stichwortverzeichnis | 569 |

5.1 Hybridfahrzeuge

Aufbau und Funktionsweise

Hybrid bedeutet, dass der Vortrieb nicht nur von einer Antriebsart kommt, sondern dass 2 Antriebe eingesetzt werden. Hybrid ist lateinisch und bedeutet „von zweierlei Herkunft“.

Als Hybridfahrzeuge werden Fahrzeuge bezeichnet, die zusätzlich zum Verbrennungsmotor einen Elektromotor zum Antrieb nutzen. Dabei wird der Elektromotor zum alleinigen oder auch zum unterstützenden Fahren z.B. beim Beschleunigen (Boosten) eingesetzt. Man unterscheidet zwischen Mikro-, Mild-, und Vollhybrid sowie zwischen seriellem und parallelem Vollhybrid. Die vier Hybrid-Technologien zeigen Bild 5.1 und Bild 5.2. Eine nicht ganz korrekte Bezeichnung des Hybridantriebs wird beim **Mikrohybrid** verwendet, denn das Fahrzeug nutzt keine zwei unterschiedlichen Antriebsquellen und es kann nicht rein elektrisch fahren. Es ist lediglich mit einem Start-Stopp-System ausgerüstet mit 2 bis 4 kW Generatorleistung und einer konventionellen 12-Volt-Batterietechnik. Befindet sich der Wagen im Stillstand, wird beim Mikrohybrid der Motor abgestellt und sofort geräuschlos wieder angelassen, sobald der Fahrer den Fuß von der Bremse nimmt oder wieder aufs Gaspedal tritt (Start-Stopp-System). Der rückwandelbare Wert an elektrischer Leistung während der Bremsverzögerung (Rekuperation) ist auch sehr gering. So lässt sich im Stadtverkehr und im Testzyklus der Kraftstoffverbrauch leicht senken. Mit dem 48-Volt-Niedervolt-Hybridkonzept ergeben sich für den Mikrohybrid weitere Einsatz- und Anwendungsgebiete.

Mildhybride werden in der Regel bis zur Kompaktklasse eingesetzt und sind vom Prinzip her Parallelhybride. Start-Stopp-Funktion und regeneratives Bremsen sowie deutliche Verbesserungen in der Leistung, z.B. beim Beschleunigen (Boosten) durch Drehmomentunterstützung, sichern Kraftstoffeinsparungen von bis zu 10% gegenüber hybridfreien Modellen. Reines elektrisches Fahren ist nicht möglich. Der kinetische Energieüberschuss beim Bremsen oder Bergabfahren durch Rekuperation (Bremsenergierückgewinnung) wird in Batterien oder Kondensatoren aufgefangen. Die gespeicherte Energie wird beim langsamen Fahren in der Stadt per Elektroantrieb oder beim vollen Beschleunigen zusätzlich wieder frei genutzt. Der Akku ist bei Hybridfahrzeugen ein wichtiger Bestandteil. Die Energie, die in ihm gespeichert werden kann, spart Kraftstoff. Gleichzeitig kann der Motor über weite Betriebszustände des Fahrzeugs mit verbrauchsgünstiger Drehzahl laufen. Dies ermöglicht ein 10 bis 15 kW starker Elektromotor; die Betriebsspannung liegt zwischen 42 und 150 V und der Energiegehalt des Speichers beträgt bis zu 1 kWh.

Der **parallele Vollhybrid** ist im Sinne eines umfassenden Nutzungsprofils am zukunftsträchtigsten; bei ihm können Verbrennungs- und Elektromotor einzeln oder durch mechanische Kopplung auch gemeinsam arbeiten. Dadurch kann der Verbrennungsmotor wie beim Toyota Prius wesentlich kleiner und damit sparsamer ausfallen. Beim Bremsen kann die frei werdende kinetische Energie über den jetzt als Generator wirkenden Elektromotor zum Laden der Batterie herangezogen werden (Rekuperation). Arbeiten beide Motoren gemeinsam, addieren sich Leistung und Drehmoment (Boost-Funktion). Diese Kombination verbindet die Vorteile vom Elektromotor, der sein maximales Drehmoment schon bei niedriger Drehzahl entwickelt, mit dem Vorteil des Verbrennungsmotors, der bei hohen Drehzahlen die maximale Leistung zur Verfügung stellt. Rein elektrisches Fahren auf kurzen Strecken ist möglich. Die typische Leistung des Elektromotors liegt über 15 kW, und die Hochvoltspannung liegt zwischen 150 und 270 V. Der Energiegehalt des Speichers beträgt bis zu 5 kWh. Es ist die am weitesten verbreitete Hybrid-Version.

Der **serielle Vollhybrid** wandelt die im Kraftstoff gespeicherte chemische Energie im Verbrennungsmotor in thermische und weiter in mechanische Energie um. Der Verbrennungsmotor läuft dann in seinem optimalen Drehzahlbereich. Er hat keine direkte Kopplung zur Antriebsachse, sondern treibt nur den Generator an, um die Hochvolt-Batterie für die weitere Fahrt zu laden. Durch den konstanten Betrieb des Verbrennungsmotors im wirkungsgradoptimierten Lastbereich ist er nicht nur effizienter, es lassen sich so auch die Schadstoffemissionen sehr gut kontrollieren. Für den Antrieb ist allein der Elektromotor zuständig. Diese Technologie eignet sich für Fahrzeuge, die überwiegend rein elektrisch fahren sollen. Weil die Reichweite durch den zusätzlichen Stromgenerator deutlich steigt, wird dieses Konzept auch Range Extender (= verlängerter Reichweite) genannt, Beispiele sind der Opel Ampera 1. Generation oder der BMW i3.

Beim leistungsverzweigten Vollhybrid erfolgt die Kraftübertragung sowohl seriell als auch parallel. Es sind 2 Elektromotoren und der Verbrennungsmotor über ein Planetengetriebe mit dem Antrieb verbunden. Je nach Fahrzustand gibt es die folgenden Betriebsarten.

- Die erste Variante: Der Verbrennungsmotor treibt den Elektromotor 1 als Generator an, um die Hochvoltbatterie zu laden.
- Die zweite Variante: Der Verbrennungsmotor treibt den Elektromotor 1 als Generator an. Mit der erzeugten elektrischen Energie wird der Elektromotor 2 als Elektromotor angetrieben (serieller Hybrid).

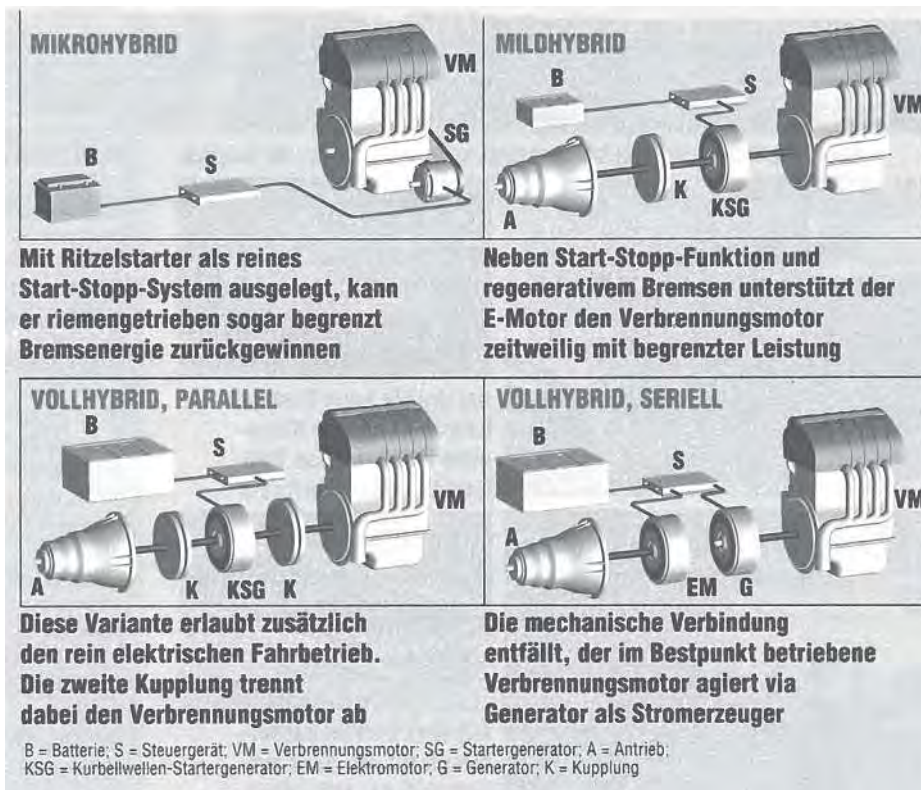
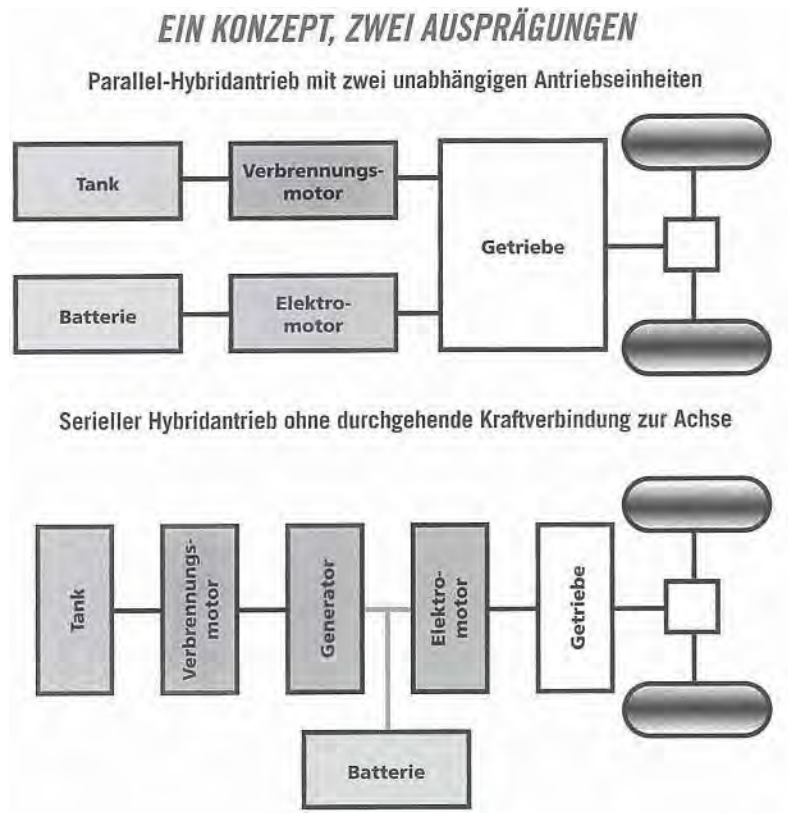


Bild 5.1

Hybrid-Technologie:
die 4 Varianten

[Bild: ams]

Bild 5.2
Paralleler und serieller
Hybridantrieb



- Die dritte Variante: Der Verbrennungsmotor ist mechanisch mit der Antriebswelle verbunden, ebenso der Elektromotor. Beide Antriebe treiben das Fahrzeug an (paralleler Hybrid). Bei diesem kombinierten Hybridantrieb wird weder ein klassisches Getriebe noch eine Kupplung benötigt.

Die Fahrzeuge mit leistungsverzweigten Hybridantrieben können bis zu einer bestimmten Geschwindigkeit rein elektrisch fahren. Zudem kann der Verbrennungsmotor durch die geschickte Kombination der beiden Antriebe überwiegend in seinem optimalen Betriebsbereich arbeiten. Diese Hybrid-Variante mit einer sehr komplexen Antriebssteuerung wird beim Toyota Prius eingesetzt.

Der **Plug-in-Hybrid** ist eine Weiterentwicklung des Vollhybrid-Konzepts, bei der die Hochvolt-Batterie vorrangig aus der 230-Volt- oder 400-Volt-Steckdose oder -Ladesäule geladen werden sollte. Daher der Name „plug-in“, also „einstecken“. Plug-in-Hybridfahrzeuge verbinden die Vorteile von Verbrennungsmotor- und Batteriefahrzeugen. Primär sollte die Hochvolt-Batterie bei normalen Hybridfahrzeugen durch Rekuperation oder an der Ladesäule aufgeladen werden. In Ausnahmesituationen ist ein Aufladen, wengleich ökologisch nicht sinnvoll, auch durch den Verbrennungsmotor möglich. Mit der höheren Kapazität der Hochvolt-Batterie steigt die elektrische Reichweite, sodass Plug-in-Hybridfahrzeuge auch längere Strecken ausschließlich mit elektrischem Antrieb zurücklegen können. Sinkt der Ladezustand der Hochvolt-Batterie unter einen definier-

ten Wert ab, ist der Antrieb über den Verbrennungsmotor gewährleistet. Je nach Lastfall dient der Elektromotor auch als Generator, seine Leistung liegt bei ca. 50 kW und die Hochvolt-Spannung liegt bei über 300 V. Der Energiegehalt der Hochvolt-Batterie beträgt bis zu 15 kWh.

Neben der Antriebseinheit besteht ein Hybridfahrzeug aus folgenden Komponenten:

- Hochvolt-Energiespeicher-Batterie
- Hochvolt-Leitungen
- Leistungs- und Steuerungselektronik
- Elektromotor(en) bzw. Generator(en)

Die Qualität und Leistungsfähigkeit von Hybrid- oder Elektrofahrzeugen hängt sehr vom Energiespeicher ab – egal ob Akku, Doppelschichtkondensatoren oder Schwungmassenspeicher. Neben den Zellen als eigentlichen Energiespeicher gibt es noch Komponenten zur Zellüberwachung, Schutzmechanismen und ein Batteriemanagement. Elektrische Energiespeicher werden aus einer Reihenschaltung von vielen Batteriezellen zusammengesetzt. Auch bei einer konventionellen Starterbatterie mit einer Nennspannung von 12 V sind 6 Zellen mit einer Zellennennspannung von 2,12 V in Reihe geschaltet. Die Leistung und die Reichweite von Hybrid- und Elektrofahrzeugen werden vor allem von der Leistungsfähigkeit des Energiespeichers bestimmt.

Hochvolt-Speicher

Im Kraftfahrzeug haben sich zwei Batterie-Ausführungen für **Hochvolt-Speicher** als geeignet herausgestellt:

- die Nickel-Metallhydrid-Batterie und
- die Lithium-Ionen-Batterie.

Die **Nickel-Metallhydrid-(NiMH)-Batterie** (Bild 5.3) wird oft als Nachfolger der NiCd-Batterie angesehen. Eine einzelne Zelle hat typischerweise eine Zellenspannung von 1,2 Volt. Vor allem durch hohe Werte bei der Energiedichte kann dieser Batterietyp überzeugen. Auch der Memory-Effekt ist der Nickel-Cadmium-Batterien nahezu fremd. Diese können gespeicherte elektrische Energie innerhalb kurzer Zeit mit fast gleichbleibender Spannung abgeben. Die NiMH-Batterie reagiert jedoch empfindlich auf Überladung, Tiefentladung, Überhitzung und falsche Polung. Zudem ist sie recht temperaturempfindlich. Bereits in der Nähe des Getriepunkts hat sie einen deutlichen Kapazitätsverlust. Um Alterungseffekte der Batterie gering zu halten, ist ein definiertes Ladefenster vorgegeben, in dem die Batterie idealerweise betrieben werden soll. Die Anode der NiMH-Batterie besteht aus einer Metall-Legierung, die reversibel Wasserstoff speichern kann, indem sie ihn ins Kristallgitter einlagert und so ein Metallhydrid aufbaut. Der Elektrolyt enthält 20-prozentige Kali-Lauge, in der sich auch die Kathode aus Nickelhydroxid befindet. Sie wird im Toyota Prius mit einer Kapazität von 6,5 Ah und einer Spannung von 201,6 Volt eingesetzt und hat ein Gewicht von 41 kg.

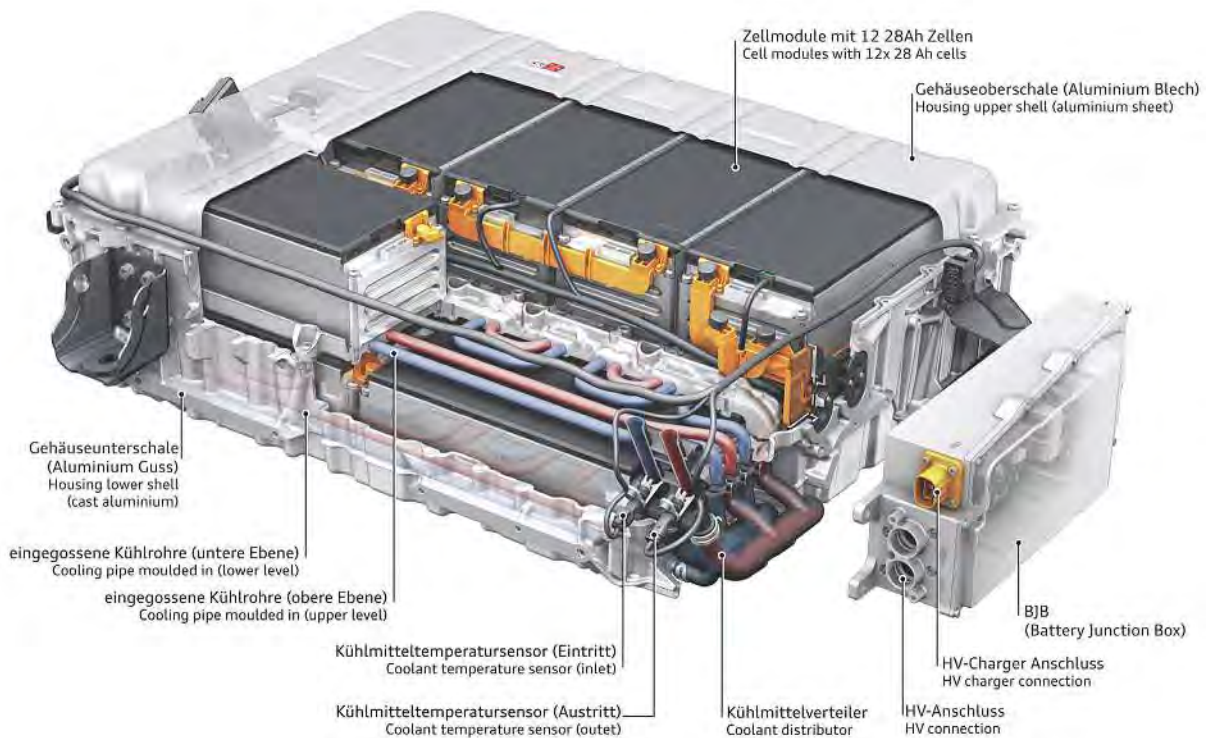
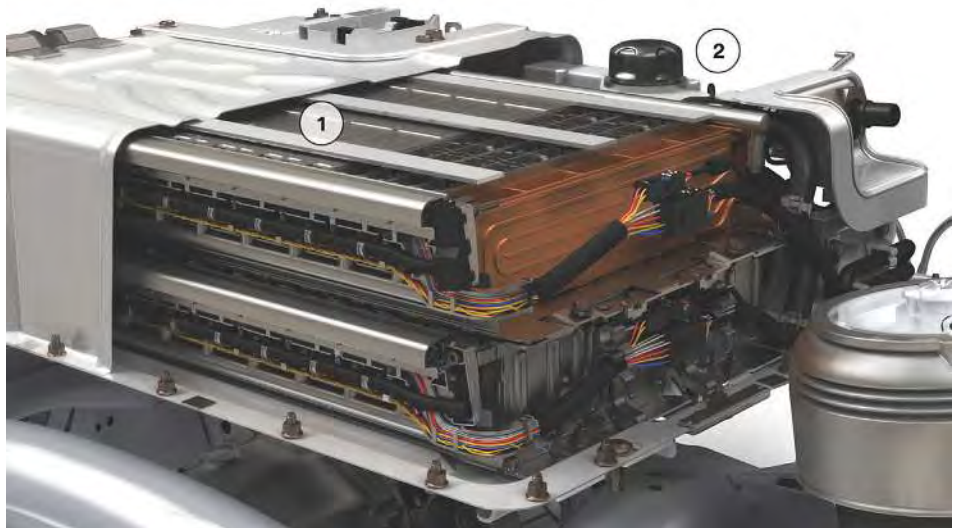
Lithium-Ionen-Batterien bringen im Vergleich zu Nickel-Metallhydrid-Batterien eine erheblich bessere Leistungsdichte und aufgrund einer hohen Nennspannung eine größere Energiedichte mit. Damit ermöglichen sie bei gleichem Gewicht eine deutlich höhere Reichweite. Weitere Vorteile der Lithium-Ionen-Batterie (Bild 5.4) sind die hohe Zyklenfestigkeit, die längere kalendarische Lebensdauer sowie eine äußerst

Bild 5.3

Nickel-Hybrid-Batterie

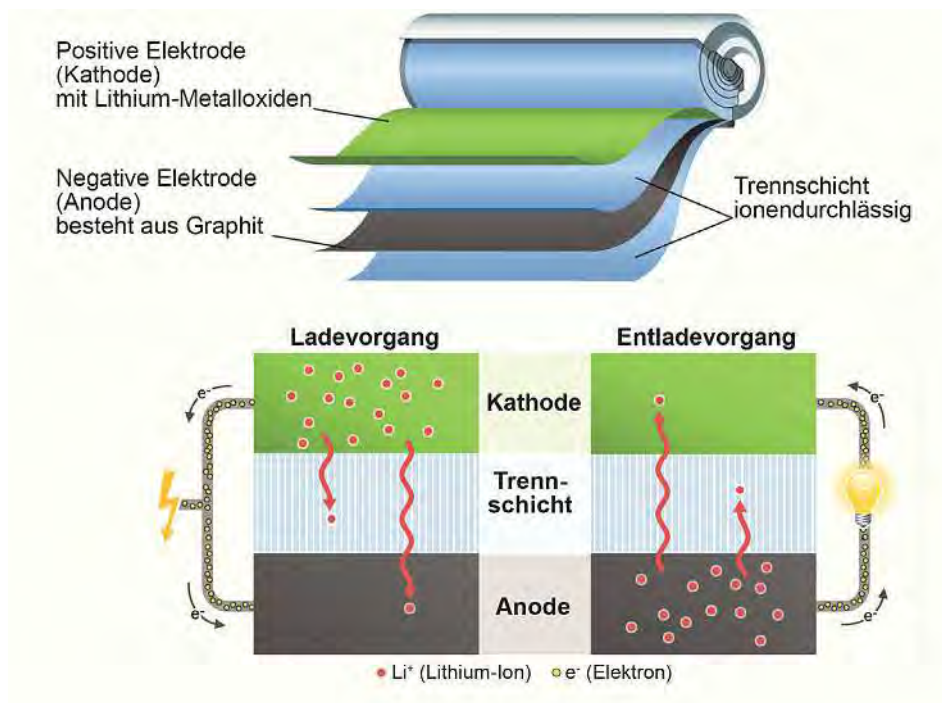
[Bild: BMW]

- 1 Ni-MH Akkumulator
(312 Volt / 2,4 kWh /
260 Zellen)
- 2 Flüssigkeitskühlung
für Akkumulator

**Bild 5.4** Lithium-Ionen-HV-Batterie

[Bild: Audi]

geringe Selbstentladung. Zudem liefert sie über den gesamten Entladezeitraum konstante Spannung und keinen Memory-Effekt. Bei den häufigsten Lithium-Ionen-Zellen besteht die positive Elektrode aus Lithium-Metalloxiden in mehreren Schichten. Die negative Elektrode besteht aus mehreren Schichten Graphit. Beide Elektroden befinden sich in einem wasserfreien Elektrolyt. Die Elektroden werden durch den Separator

**Bild 5.5**

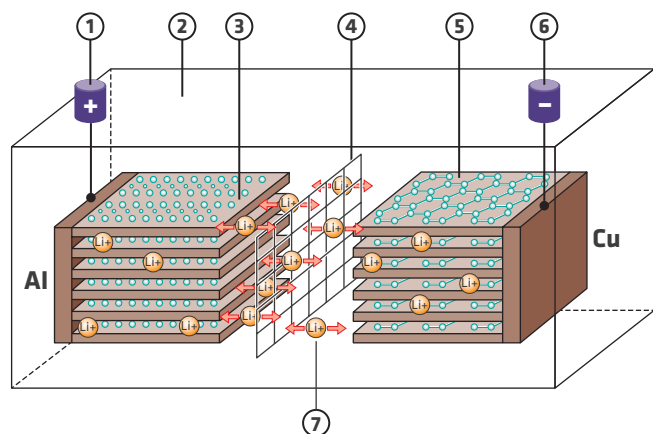
Aufbau und Arbeitsweise einer Lithium-Ionen-Zelle

getrennt, der einen Kurzschluss zwischen den Elektroden verhindert (Bild 5.5). Der Elektrolyt ist ebenfalls ein notwendiger Bestandteil, um die elektrischen Ladungen zwischen den Elektroden zu transportieren. Als flüssige Elektrolyte werden sehr unterschiedlich zusammengesetzte wasserfreie (aber oft entzündbare) Lösungsmittel eingesetzt. Durch den flüssigen Elektrolyt wandern die Ionen der negativen Elektrode zur positiven Elektrode aus Metalloxyd. Um diese Ladungen auszugleichen, können in einem externen Stromkreis nun Elektronen und damit ein elektrischer Strom fließen. Die Funktion der Akkus beruht dabei auf der Elektronegativität von Metallen, was bedeutet, dass sie die Eigenschaft haben, Elektronen abzugeben. Am besten geeignet sind die Atome des Lithiums – des elektronegativsten aller Metalle und nach Wasserstoff und Helium des atomar leichtesten Elements im Periodensystem. Die Lithium-Atome geben besonders gern eines ihrer je 3 Elektronen ab, was Lithium zum beliebten Grundstoff für Akkus macht. Diese Eigenschaft führt jedoch auch dazu, dass die Lithium-Atome gern chemische Bindungen mit anderen Atomen und Molekülen eingehen. Sie müssen also in der Batterie geschützt und von Luft und Wasser ferngehalten werden, was mit zusätzlichem Gewicht einhergeht. Ein weiterer Nachteil ist, dass Lithium zwar auf der Erde keineswegs selten ist, doch in so geringer Konzentration vorhanden, dass eine wirtschaftliche Förderung nur an wenigen Orten möglich ist. Dennoch konzentriert sich ein großer Teil der Batterieforschung auf Lithium-Ionen-Akkus. Die Lithium-Atome geben beim Entladen ihre überzähligen Elektronen an der Anode ab. Die Elektronen strömen durch Leiter und Verbraucher zur positiven Elektrode, der Kathode. Der umgekehrte Vorgang findet beim Laden statt. Die frisch aufgeladenen Lithium-Ionen transportieren danach wieder Elektronen durch Elektrolyt und Trennschicht zur Anode (Bild 5.5).

Wesentlich an der Lithium-Ionen-Batterie ist nun, dass in der negativen Elektrode die Lithium-Ionen in Graphit eingelagert sind, wodurch sich eine schützende Deckschicht auf der negativen Elektrode bildet, die für die kleinen Lithium-Ionen durchlässig, für Moleküle im Elektrolyt jedoch undurchlässig ist. Konventionelle Lithium-Ionen-Zellen liefern eine Nennspannung von 3,6 Volt. Die Spannung einer Lithium-Ionen-Zelle ist als 3-mal so hoch wie die einer Nickel-Metallhydrid-Batterie. Eine Tiefentladung auf unter 2,4 Volt führt zu irreversibler Schädigung und Kapazitätsverlust der Zelle. Diese Spannung darf bei Entladung deshalb niemals unterschritten werden. Die spezifische Leistungsdichte von Lithium-Ionen-Zellen liegt im Bereich von 300 bis 1500 W/kg. Damit ist die Energiedichte etwa doppelt so hoch wie beispielsweise die der Nickel-Cadmium-Batterie und liegt bei 95 bis 190 Wh/kg. Allerdings kann die mechanische Beschädigung einer Lithium-Ionen-Batterie zum Zellenkurzschluss führen. Durch die hohe Stromstärke würde das Gehäuse schmelzen und Feuer fangen. Lithium-Ionen-Zellen reagieren grundsätzlich heftig mit Wasser, insbesondere in vollgeladenem Zustand. Brennende Akkus dürfen daher niemals mit wasserhaltigen Löschmitteln, sondern sollten mit Pulver gelöscht werden. Lithium-Ionen-Zellen unterliegen einer fertigungsbedingten Streuung verschiedener Parameter, etwa der Kapazität. Da eine Batterie aus vielen Zellen zusammengesetzt ist, müssen die Zellen einzeln überwacht werden. Ein elektronisches Batterie-Management-System sorgt dafür, dass die einzelnen Zellen weder überladen noch zu stark entladen werden. Bei Ladung und Betrieb wird, falls nötig, ein automatischer Ladungsausgleich zwischen den einzelnen Zellen veranlasst.

Da die Zellen sehr temperaturempfindlich sind und bei zu hoher Temperaturentwicklung schnell altern, ist die **Batteriekühlung** ein wichtiger Bestandteil des Batterie- und Hybridkonzepts. Die Kühlung erfolgt durch einen vom Antriebsmotor unabhängigen Kreislauf zusammen mit der Steuerelektronik für den Elektroantrieb und das Steuergerät für das Hochvolt-Batterieladegerät. Das Temperaturniveau liegt zwischen 20 und 40°C. Der Kühlkreislauf kann geteilt werden, sodass nur das Batteriemodul mit dem Wärmetauscher vom Kühlmittel durchströmt wird. Je nach Bedarf können unterschiedliche Temperaturzustände in der Elektronik und dem Modul herrschen, das ist wichtig für das schnelle Aufwärmen der kalten Batterie. Selbst die Klimaanlage und eine eventuell verfügbare Stand-

Bild 5.5a
Aufbau der Hochvolt-Batterie



Aufbau Li-Ionen-Zelle:
1 = positive Elektrode,
2 = Gehäuse mit Elektrolyt,
3 = Lithium-Metalloxid,

4 = Separator,
5 = Graphitschicht,
6 = negative Elektrode,
7 = Lithium-Ion

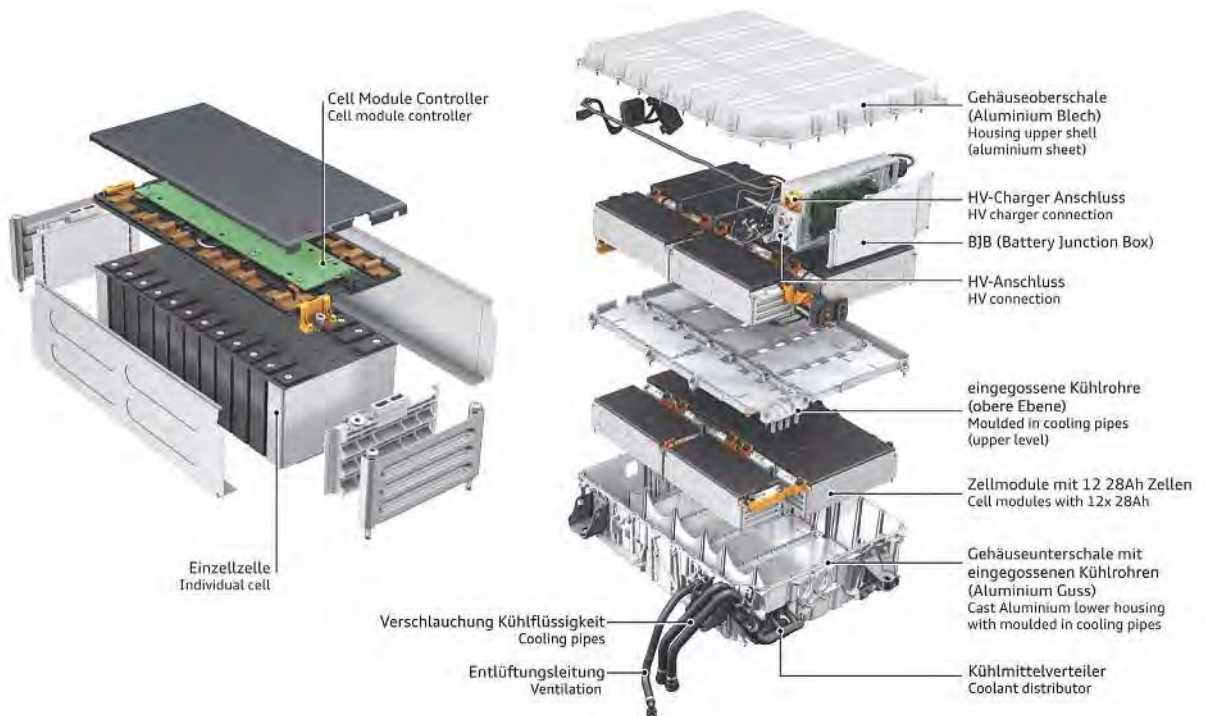


Bild 5.5b Aufbau der Hochvolt-Batterie
[Bild: Audi]

heizung werden zur Temperierung herangezogen, da die Reichweite temperaturabhängig ist. Je kälter das System wird, desto weniger Energie kann es abgeben. Das Batteriekühlmodul arbeitet mit der Bordnetzspannung von 12 V und besitzt sogar einen eigenen Verdampfer, der an den Kältemittelkreislauf des elektrisch angetriebenen Klimakompressors angeschlossen ist. Das Kühlmodul selbst sitzt in der Reserveradmulde und besteht aus einem Lüfter, Stellmotoren für die Umluftklappen, jeweils einem Temperaturfühler vor und nach dem Verdampfer sowie einem Absperrventil für das Kältemittel. Zusätzlich überwachen 6 Sensoren die Zellentemperatur der Hybrid-Einheit. Weitere Sensoren messen die Kühlluft im Ein- und Ausgangsbereich des Moduls. Melden die Sensoren eine unzulässig hohe Temperatur, wird vom Steuergerät für die Batterieregelung der Lüfter angesteuert und Luft aus der Reserveradmulde über den Verdampfer in die Batterieeinheit geleitet. Die warme Luft tritt unterhalb des Stoßfängers wieder aus. Sind die Umluftklappen geschlossen, arbeitet das System im Umluftbetrieb.

Die Leistungselektronik wandelt den Gleichstrom der Hochvolt-Leistungselektronik in den Drehstrom für den Elektromotor um. Zusätzlich sind Anschlüsse für das 12-Volt-Bordnetz vorhanden. Die in der Elektronik entstehende Wärme wird vom Niedertemperatur-Kühlkreislauf aufgenommen. Das Steuergerät für die Batterieregelung wertet die Batteriespannung wie auch die Spannung der einzelnen Zellen aus. Sollte die Spannung einer Zelle unzulässig hoch sein, veranlasst das Steuergerät den Zell-Controller, eine Entladung über einen Widerstand einzuleiten. Dadurch ist gewährleistet, dass alle Zellen die gleiche Zellspannung haben und die maximale Kapazität der Batterie nicht überschritten wird. Jede der 12 Zellen der Hochvoltbatterie verfügt über einen Controller zum Messen der Zellspannung wie auch der in der Zelle herrschenden Temperatur. Die Daten meldet der Zell-Controller an das Steuergerät für die Batterieregelung. Das gilt für Lithium-Polymer und Lithium-Ionen Akkus gleichermaßen.

Beim **Lithium-Polymer-Akku** ist die Elektrolyt-Flüssigkeit durch Gel aus Polymer-Kunststoff ersetzt. Der Vorteil des Akkus ist, sie lassen sich in fast beliebiger Form herstellen. Und sie haben eine höhere Energiedichte als Lithium-Ionen-Zellen. Doch sie benötigen ein aufwendiges Lade- und Temperaturmanagement, weil sie sich leicht selbst entzünden.

Ladekonzepte

Intelligente **Ladekonzepte** sind ganz wesentlich für die Lebensdauer einer Lithium-Ionen-Batterie, die mit mehr als zehn Jahren veranschlagt werden kann. Eine wichtige Voraussetzung ist, dass der Akku stets gut temperiert ist. Etwa gleich wichtig wie der kalendarische Faktor sind das Lastprofil und die Intensität der Lade- und Entladezyklen. Hochvolt-Batterien werden in der Regel bis zu ca. 20% ihres Energiegehalts (State of Charge) entladen. Die Batterie altert umso schneller, je höher ihre Zellenspannung ist. Deshalb soll auch vermieden werden, dass die Li-Ionen-Batterien ständig zu 100% geladen sind. Wenn diese Limits eingehalten werden, absolvieren die Akkus mehrere Tausend Lade- und Entladezyklen, bevor ihre Leistung nennenswert abfällt. Über- oder Tiefentladungen sind auch deshalb zu vermeiden, weil sie die Zellen zerstören können. Umfangreiche Sicherheitsvorkehrungen minimieren dieses Risiko – die Temperatur wird mittels Sensoren überwacht, elektrische Sicherungen und Überdruckventile in den Zellen unterbinden Kettenreaktionen im System. Der Ladezustand der HV-Batterie wird zwischen den batterieschonenden und lebensverlängernden 20 bis 80% Ladung gehalten. Im Schalttafeleinsatz in der Batterieladeanzeige wird, um den Fahrer nicht zu verunsichern, der nutzbare Bereich mit 0 bzw. 100% angezeigt.

Eine Vielzahl von **Batterieladestationen** und Ladestrategien hat sich mittlerweile in Deutschland etabliert. Dabei ist zu bedenken, dass sich der Verbrauch eines Diesels und Benziners relativ leicht ermitteln lässt. Beim Elektroauto sieht das anders aus. Denn während an der Zapfsäule meist der gesamte gezapfte Kraftstoff im Tank landet, geht beim Stromladen einiges an Energie verloren. Ganz vermeiden lassen sich Ladeverluste beim Elektroauto nicht. Der Strom aus der Steckdose kommt nie komplett in der Batterie an, sondern geht beispielsweise durch den elektrischen Widerstand in Kabeln und Leitungen als Wärme verloren. Die Faktoren, die dabei eine Rolle spielen, sind vielfältig: Zu ihnen zählen etwa Kabeldurchmesser und Kabellängen, die Temperatur, der Akkufüllstand oder die abgerufene Ladeleistung. Eine Schnellladung mit großer Leistung über wenige Minuten ist in der Regel weniger effizient als das langsame Laden über mehrere Stunden. Auch der Lademodus spielt eine Rolle: An der Haushaltssteckdose etwa fallen in der Regel höhere Verluste an als an einer Wallbox (Bild 5.6). Vernachlässigbar sind die Verluste nicht. Je nach Ladesituation fallen sie durchaus ins Gewicht, liegen bei bis zu 20%. Aus E-Autofahrersicht ist das zumindest ärgerlich, muss der verlorene Strom doch in der Regel bezahlt werden, obwohl er nicht nutzbar ist. Die Kosten können durchaus erheblich sein. So weist beispielsweise Smart den Normverbrauch des Fortwo EQ mit 14,5 kWh aus, wenn dieser an einer 22-kW-Wallbox geladen wird. Stöpselt man das gleiche Modell in einer einfachen Haushaltssteckdose ein, steigt der angegebene Wert auf 20,1 kWh. Die Differenz von 5,6 kWh kostet bei üblichen Autostrompreisen knapp 1,70 Euro auf 100 Kilometern. Nicht alle Autohersteller arbeiten beim Stromverbrauch so transparent wie die Daimler-Tochter, häufig wird lediglich einer der Werte angegeben, in der Regel wohl der bessere.

Die Technik für Ladesäulen entwickelt sich schneller als die dazu passenden E-Autos. Ladestationen für Elektroautos werden immer schneller. Ein Industriekonsortium um BMW, Porsche und Siemens hat nun eine Ladesäule entwickelt, die eine Ladeleistung



Bild 5.6 Ladedock mit Wandhalterung – Wallbox
[Bild: BMW]



Bild 5.7
Ultraschnelle Ladesäule
[Bild: Porsche]

von bis zu 450 kW bietet. Sie ermöglicht ultraschnelles Stromtanken (Bild 5.7) und kann einen Akku innerhalb von 3 Minuten für 100 Kilometer Fahrt füllen. Ein voller Schnellladevorgang, bei dem der Batteriefüllstand von 10 auf 80% erhöht wird, soll nach 15 Minuten abgeschlossen sein. Die schnellsten aktuellen Ladesäulen benötigen rund 3-mal so viel Zeit. Die Werte beziehen sich jeweils auf ein Fahrzeug mit einer 90 kWh großen Batterie wie z.B. der Porsche Taycan. Allerdings können auch Autos mit weniger leistungsfähiger Ladetechnik vor Ort laden – nur eben deutlich langsamer. Die Ladestation erreicht die extreme Leistung durch eine Erhöhung der Ladespannung auf bis zu 920 Volt. Sowohl Ladekabel als auch Fahrzeugakku müssen während des Ladens aktiv gekühlt werden. Zudem ist ein intelligentes Lademanagement nötig, das die Energiezufuhr über die Zeit regelt.

Energie tanken ohne Kabelsalat: BMW führt ein System für das induktive Laden (Bild 5.8) von Elektroautos ein. Die Option „Wireless Charging“ ist allerdings zunächst nur als Leasing-Sonderausstattung für die Plug-in-Hybrid-Limousine 530e zu haben. Sie besteht aus einer Bodenplatte zur Erzeugung des elektrischen Felds und dem Gegenstück am Fahrzeug. Zum Aufladen wird das Auto mit Kamerahilfe möglichst exakt über der Ladestation abgestellt. Dabei sind Abweichungen von bis zu 14 Zentimetern in Querrichtung und 7 Zentimeter in Längsrichtung erlaubt. Der Ladevorgang wird dann per Knopfdruck gestartet. Maximal fließen 3,2 kW pro Stunde in die Hochvolt-Akkus der Limousine, etwas weniger als an einer normalen Haushaltssteckdose. Die relativ kleine Batterie des Plug-in-Hybriden ist nach rund dreieinhalb Stunden gefüllt. Den Wirkungsgrad des Aufladens gibt der Hersteller mit 85% an; beim kabelgebundenen Laden liegt er bei 92%. Das umständliche Laden ist neben der begrenzten Reichweite ein Problem für die Akzeptanz von E-Autos. Induktive Systeme sollen das Beladen von E-Autos künftig komfortabler machen – allerdings hat auch das Nachteile. Beim Auto findet sich die Empfangsspule im Unterboden, gesendet wird von einer Spule auf der Fahrbahnoberfläche. Die frei werdende elektromagnetische Strahlung ist extrem gering und gilt als für den menschlichen Organismus ungefährlich. Der Reiz des induktiven Ladens liegt in seinem Komfort, nicht in der Schnelligkeit. Drahtloses Laden hat auch Nachteile. Zwischen Sendeantenne und Empfänger geht Leistung verloren, rund 10%. Der Schwund

Bild 5.8

Induktives Laden
[Bild: BMW]



ist umso geringer, je exakter die beiden Spulen aufeinander liegen und je kleiner ihr Abstand ist. Während der optimale Aufbau der Anlage in der heimischen Garage noch problemlos sein dürfte, könnte genau das auf freier Strecke schwierig werden. Der Unterboden eines SUVs ist halt per Definition weiter vom Asphalt entfernt als der eines Sportwagens.

Wer mit seinem Elektroauto an einer Schnellladesäule tanken will, benötigt den passenden Anschluss und **Ladestecker** (Bild 5.9). Weltweit haben sich für die Schnellladung mittlerweile 5 Standards durchgesetzt. Um ein standardisiertes Kommunikationsprotokoll zwischen Fahrzeug und Ladestation zu entwickeln, ist es sinnvoll, dass die Stecker und Buchsen sowie die Steckerbelegungen unterschiedlicher Hersteller kompatibel sind. So hat die IEC (International Electrotechnical Commission) den weltweiten Ladestecker-Standard mit 3 System definiert. Einige davon konkurrieren allerdings miteinander, beispielsweise in Deutschland. Eine Übersicht der internationalen Situation und gebräuchlichsten Ladestecker im Folgenden:

Bild 5.9

Elektrofahrzeug Ladestecker
[Bild: BMW]



CCS (Combo 2): Das Combined Charging System kombiniert Normal- und Schnellladen in einem Stecker. Über den oberen, rundlichen Teil fließt normaler Wechselstrom; der gehaltvollere Gleichstrom wird über die beiden Kontakte im unteren Teil übertragen. Vorteil: Die gleiche fahrzeugseitige Buchse kann sowohl an normalen als auch an schnellen Ladesäulen genutzt werden. Schon Anfang des Jahrzehnts war CCS der Stecker-Favorit der deutschen Autohersteller, später stießen auch die US-Marken sowie verstärkt auch asiatische Anbieter hinzu, wodurch CCS zu einem der wichtigsten Standards weltweit wurde. Hierzulande wird die Europa-Variante CCS Typ 2 genutzt, die eine Ladeleistung bis zu 150 kW, in Einzelfällen auch bis zu 400 kW und mehr bietet. In der Regel geben die CCS-Schnellladesäulen aktuell allerdings meist nur maximal 50 kW ab.

CCS (Combo 1): Auch die US-Autohersteller haben sich für den CCS-Standard entschieden. Weil das Stromnetz in Amerika aber mit anderen Spannungen arbeitet und anders als in Europa nur 1- statt 3-phasig ausgelegt ist, sieht der Wechselstrom-Teil des Kombinations-Steckers leicht anders aus. Unter anderem fehlen die 2 Kontakte für die nicht benötigten Phasen. Darüber hinaus ist die Technik identisch; kompatibel sind die Stecker jedoch nicht.

Chademo: Der „CHARge DE MOve“-Standard ist das japanische Gegenstück zum deutschen CCS und wird hierzulande sowie in den USA daher vor allem von asiatischen Herstellern eingesetzt. Weil Gleichstrom- und Wechselstromladung im Gegensatz zu CCS nicht in einem Stecker vereint sind, haben Chademo-Fahrzeuge immer eine zweite Ladebuchse an Bord. Das japanische System hat aber auch Vorteile; so war es von Anfang an auf bidirektionales Laden ausgelegt, Elektroautos können so also auch Strom ins Netz zurückspeisen, etwa wenn in Katastrophenfällen die Elektrizität ausfällt. Aber auch zur intelligenten Belastungssteuerung im Netz. Bei den technischen Daten gibt es keine großen Unterschiede zu CCS. Wie dieses stellt Chademo in der Regel 50 kW zur Verfügung, maximal sind bis zu 200 kW möglich, in Zukunft auch 400 kW.

Tesla Supercharger: Der kalifornische E-Auto-Pionier brachte 2012 mit dem Model S nicht nur sein erstes alltags- und langstreckentaugliches Elektroauto auf den Markt, sondern gleich auch die passende Infrastruktur in Form von hunderten Schnellladesäulen (Bild 5.10) quer durch die USA und Europa. Weil damals noch kein künftiger Stecker-Standard erkennbar war, modifizierte man kurzerhand den europäischen Typ-2-Wechselstromstecker in einen Gleichstromstecker. Der dadurch geschaffene Supercharger-Anschluss kann ausschließlich von Tesla-Fahrzeugen genutzt werden. Aktuell ist er der schnellste auf dem Markt, bietet eine Ladeleistung bis 125 kW, teilweise sogar 145 kW und perspektivisch bis zu 350 kW.



Bild 5.10
Tesla Schnellladesäulen
– Supercharger
[Bild: Tesla]

GB/T: Hierzulande nicht zu finden, in China aber der nationale Standard für Normal- und Schnellladen und daher nahezu konkurrenzlos. Optisch ähneln die Stecker und Buchsen den westlichen Exemplaren, sind aber quasi als Negative ausgeführt. Wo der eine Löcher hat, haben die anderen Stifte und umgekehrt. Schnell- und Normalladen sind nicht kombiniert, für beides werden daher unterschiedliche Steckdosen genutzt. Die Ladeleistung liegt bei GB/T meist bei den auch in Europa und den USA üblichen 50 kW, maximal sind 237,5 kW möglich. Doch bereits in naher Zukunft wollen die Chinesen den Rest der Welt hinsichtlich der Ladegeschwindigkeit weit hinter sich lassen. Dann sollen bis zu 900 kW an Strom durch die Kabel rauschen – etwa doppelt so viel wie bei allen anderen Standards. China will so vor allem die Elektrifizierung von Fernbussen und Langstrecken-Lkw forcieren, bei denen innerhalb kurzer Zeit sehr viel Energie in den Akku fließen muss.

Für Autofahrer in Deutschland spielen lediglich drei der fünf Schnelllade-Standards eine Rolle. Aktuell liegt die Zahl der schnellen Ladepunkte mit CCS- und Chademo-Standard auf einem ähnlichen Niveau – rund 1.000 öffentliche Anschlüsse sind jeweils vorhanden. Viele Stationen – die sogenannten Triple-Charger – verfügen über Stecker für beide Typen. Kurzfristig wir CCS den japanischen Konkurrenten hierzulande aber wohl abhängen. Die deutschen Hersteller haben begonnen, das Ladesäulennetz selbstständig auszubauen – und verzichten bei den neuen Säulen auf den konkurrierenden Chademo-Standard. Auch die deutsche Ladesäulenverordnung schreibt diesen Steckertyp im Gegensatz zu CCS nicht vor.

Für die Kommunikation zwischen Elektrofahrzeug und Ladestation besitzen Ladestecker (Bild 5.11) und Ladekupplung einen separaten Kontakt (CP-Kontakt) zur Übertragung der Kommunikationssignale. Des Weiteren befindet sich im Ladestecker der Proximity Pilot (PP-Kontakt), der über einen genormten Widerstand mit dem PE-Leiter verbunden ist. Hierüber kann die Ladeelektronik auslesen, für welche maximale Stromstärke das Ladekabel geeignet ist. Die Anschlussstifte des Control Pilot liegen „tiefer“ als die anderen Stecker. Damit wird erreicht, dass der Stromkreis als Letzter (zum Einleiten des Ladens) geschlossen und als Erster geöffnet wird. Somit wird eine Funkenbildung beim An- und Abkoppeln verhindert.

Bild 5.11
CCS Typ 2 Ladestecker PI-Belegung
(Bild: Schmidt)



Ladestrategien: Die Hochvoltbatterie kann gemäß Mode 1 bis Mode 4 (laut der Internationalen Elektrotechnischen Kommission IEC 61851-1 von 2010) geladen werden. Das bedeutet, dass eine bidirektionale Kommunikation zwischen dem im Fahrzeug eingebauten Ladegerät (bei Mode 2 bis 4) und der Steuereinheit des Ladekabels oder der Ladestation

stattfindet. Das Ladegerät kommuniziert mit der Hochvoltbatterie, um sicherzustellen, dass der Ladevorgang störungsfrei erfolgt. Die Steuerungs- und Sicherheitsfunktionen sind unabhängig von der Einbaulage der Steuereinheit die gleichen. Im Mode 1 erfolgt das Laden mit Wechselstrom (AC) an einer gewöhnlichen Netzsteckdose oder einer CEE-Steckdose mit max. 16 Ampere. Es gibt keine Kommunikation zwischen Energieabgabestelle (Steckdose) und Fahrzeug. Wird aus sicherheitstechnischen Gründen nicht mehr eingesetzt. Im Mode 2 wird geladen wie im Mode 1, jedoch mit einer In-Cable Control Box (ICCB) im Ladekabel. Diese verbindet ein Elektrofahrzeug mit einer gewöhnlichen 16A/230V-Netz- oder CEE-Steckdose. Es gibt eine Kommunikation zwischen ICCB und Fahrzeug. Im Mode erfolgt das Laden mit Wechselstrom (AC) 1- oder 3-phasig wird an einer Ladestation oder Ladesäule mit einer Steckdose Typ 2 durchgeführt. Es gibt eine Kommunikation zwischen Energieabgabestelle (Steckdose) und Fahrzeug. Im Mode 4 geschieht das Laden mit Gleichstrom (DC) für Schnellladungen. Eine Kommunikation zwischen der Energieabgabestelle „Ladestation“ und dem Fahrzeug ist zwingend erforderlich. Bei dieser Ausführung befindet sich das Ladegerät außerhalb des Fahrzeugs in der Ladesäule und erzeugt die Gleichspannung zum Laden der Hochvolt-Batterie.

Das Ladekabel kann mit oder ohne Steuereinheit (ICCB) ausgestattet sein. Das Ladekabel mit ICCB wird vom Automobilhersteller werksseitig mitgeliefert (Bild 5.12). Bei Ladekabeln ohne Steuereinheit handelt es sich um ein Verbindungskabel zwischen Ladestation und Elektroauto, die Steuereinheit ist dann in die Ladestation oder -säule integriert. Für beide Ladekabelvarianten gilt, dass es neben Phase, Nullleiter und Schutzterde auch Signalleitungen zur Netzsteckdose und zur Ladebuchse des Fahrzeugs gibt. Die Steuereinheit (ICCB) des Ladekabels verfügt über einen integrierten Fehlerstromschutzschalter. Damit unterbricht die Steuereinheit im Fall eines Fehlerstroms den Stromfluss. Im Stecker ist meist auch ein Temperatursensor für den Netzstromkreis eingebaut, der bei einer Überhitzungsgefahr, beispielsweise bei 65°C, den Ladestrom verringert oder das Laden unterbricht. Das Ladekabel muss direkt an den Netzstecker angeschlossen werden. Somit wird vermieden, dass die Temperaturüberwachung an der Steckdose ausgeschaltet wird sowie eine Gefährdung durch unterdimensionierte Verlängerungskabel entsteht. Wenn das Ladekabel am Fahrzeug angeschlossen wird, kann der Motor aufgrund gesetzlicher Vorschriften nicht gestartet werden. In Verbindung mit Typ 2 CCS Stecker wird das Ladekabel in der Ladebuchse des Fahrzeugs und in der Ladesäule physikalisch verriegelt, damit es während des Ladevorgangs nicht abgezogen werden kann – unter anderem, um Stromdiebstahl zu

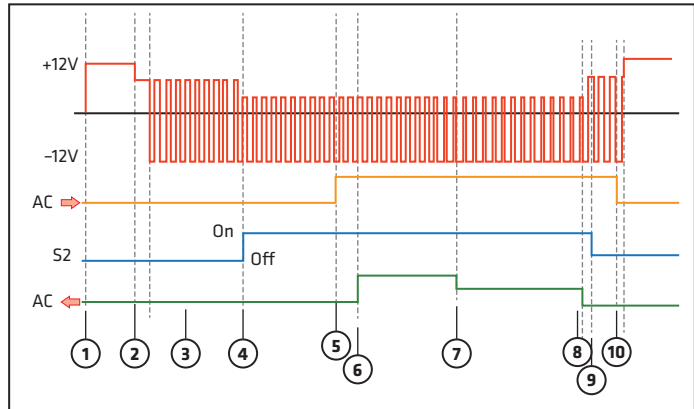


Bild 5.12

Das Mode-2-Ladekabel

[Bild: Mennekes]

Bild 5.13
Anliegendes Kommunikationssignal am Ladestecker



verhindern. Zusätzlich zum Stromanschluss baut das Fahrzeug dabei eine Kommunikation zur Ladestation/Stuereinheit auf. Um eine hohe Kompatibilität zu gewährleisten, wurde die Kommunikation zwischen Elektrofahrzeug und Ladestation sehr einfach gehalten. Beim Industriestandard IEC 61851 (1. Ausgabe 2001) wird bei angeschlossenem Stecker auf der Kommunikationsleitung (Control Pilot) ein Signal durch Pulsweitenmodulation (PWM) mit einer Frequenz von 1000 Hz gesendet (Bild 5.13). Die Signalspannung kann entweder eine Gleichspannung 12 V DC oder eine Wechselspannung + 12 V sein. In Bild 5.13 sind die einzelnen Etappen sichtbar, die beim Ladevorgang gestartet werden, wenn die Ladebuchse des Fahrzeugs über ein Ladekabel an einer Ladestation angeschlossen wird:

1. Das Pilotsignal beträgt 12 V und signalisiert, dass kein Fahrzeug angeschlossen ist. Die Ladestation bleibt spannungslos, bis ein Elektrofahrzeug angeschlossen wird.
2. Das Fahrzeug ist über das Ladekabel an der Ladestation bzw. mit der Steuereinheit im Ladekabel angeschlossen. Dieser Zustand wird durch ein 9-Volt-Signal erkannt.
3. Die Steuereinheit sendet jetzt über ein PWM-Signal den verfügbaren Ladestrom, dabei signalisiert die 9-Volt-Spannung weiterhin, dass das Fahrzeug und die Hochvoltbatterie angeschlossen sind.
4. Auf der Fahrzeugseite wird geprüft, ob die Bedingungen für die Stromaufnahme des Fahrzeugs erfüllt sind. Beispielsweise, ob die Steuereinheit auf der Fahrzeugseite über PE geerdet ist. Wenn kein PE vorhanden ist, kann der Ladevorgang nicht gestartet werden. Bei Bestätigung wird der Schalter 52 fahrzeugeitig geschlossen und das PWM-Signal beträgt dann 6 Volt.
5. Die Ladestation/Stuereinheit schließt den Stromkreis. Die Zeitsteuerung für das Schließen des Stromkreises kann von weiteren Kriterien abhängig sein, wie z.B. Bezahlung und Datenaustausch.
6. Der Ladestrom wird vom Fahrzeug empfangen. Die Zeitdauer wird vom Fahrzeug bestimmt, und das Tastverhältnis legt dabei den Ladestrom fest. Dabei darf der Ladestrom nicht höher sein als der vom Proximity-Widerstand im Ladekabel definierte Grenzwert.
7. Die Veränderung des Tastverhältnisses zeigt eine verringerte Leistungsanforderung, dies kann vom Leistungsstromkreis stammen oder durch eine manuelle Einstellung an der Steuereinheit.
8. Das Ende des Ladevorgangs wird vom Fahrzeug gesteuert. Das Fahrzeug fordert eine Trennung an, wenn der Ladevorgang abgeschlossen ist.
9. Auf der Fahrzeugseite öffnet der Schalter 52 wieder, und die Ladestation/Stuereinheit unterbricht die Stromversorgung. Das PWM-Signal beträgt jetzt wieder 9 Volt.

10. Das Entfernen des Ladekabels vom Fahrzeug oder von der Ladestation wird durch das permanente Spannungssignal von 12 Volt erkannt, das auf beiden Seiten – Fahrzeug und Ladestation/Steuereinheit – anliegt. Im Ladestecker befindet sich auch der Proximity Pilot (PP-Kontakt), der einen Motorstart verhindert, wenn das Ladekabel angeschlossen ist. Das Signal informiert aber auch die Steuereinheit fahrzeugseitig und die Ladestation/Steuereinheit über den maximalen Ladestrom, für den das Ladekabel ausgelegt ist. Die fahrzeugseitige Steuereinheit des Ladegeräts legt dazu eine 5-Volt-Spannung am Anschlussstift „Proximity Pilot“ an. Wird das Ladekabel angeschlossen, wird der Stromkreis über einen entsprechenden Widerstand und PE-Stromkreis gegen Masse geschlossen, was wiederum zu einem bestimmten Spannungsabfall führt und so den Maximalstrom des Ladekabels begrenzt. Der gesamte Ladevorgang der Hochvolt-Batterie bei Elektrofahrzeugen erfolgt überwacht, das Bordladegerät und die Ladestation kommunizieren dabei über eine Datenleitung im Ladekabel (Control Pilot, CP). Dabei werden Signale über die Bereitschaft und Ladung übertragen. Bei intelligenten Ladestationen erfolgt zusätzlich eine digitale Kommunikation über Powerline (PLC). Im intelligenten Laden steckt enorm viel Potenzial. Die Ladestation als logisches Knotenmodell ermöglicht das Auslesen und Steuern der Leistungsaufnahme des Fahrzeugs aus der Ferne.

Die **Leistungselektronik** übernimmt die Aufgabe der Steuerung des Energieflusses (Inverter/Umrichter) von der Batterie zum Elektromotor (z.B. Boosten, elektrisches Fahren) und umgekehrt vom Motor zur Batterie (z.B. Rekuperation). Es handelt sich um einen Pulswechselgleichrichter, der die Gleichspannung der Batterie zu einer 3-phasigen Wechselspannung wandelt, wie sie der Elektromotor benötigt. Das Gehäuse verbirgt ein Modul aus mehreren zusammenschalteten Halbleiter-Bauelementen, sogenannten IGBTs (Insulated-Gate Bipolar Transistor). Im Inneren der Leistungselektronik erreichen die Temperaturen deutlich über 100°C. Die Wärme im Metallgehäuse wird durch eine Flüssigkeitskühlung abgeführt. Weiterhin stellt sie optional über einen DC/DC-(Gleichspannungs-)Wandler die Verbindung zwischen dem herkömmlichen Bordnetz (14 Volt) und der Batterie für den Elektroantrieb her. Da nur Gleichspannung speicherbar ist, muss der zuvor erzeugte Drehstrom (AC) vom Hochvolt-Generator zudem in Gleichstrom umgewandelt werden (AC/DC-Wandler). Damit ist die Leistungselektronik das Herz des Hybridantriebs. Das Hochvolt-Bordnetz in Hybridfahrzeugen arbeitet je nach Fahrzeughersteller mit Gleichspannungen bis zu 800 Volt. An dem größeren Querschnitt und der orangenen Farbe erkennt man die Hochvoltleitungen. Sie besitzen spezielle Steckkontakte und haben kein Potenzial zur Karosserie. Zudem sind sie gegen Verpolen gesichert. Die Potenzialausgleichsleitung wird sicherheitshalber vom Hybridsystem überwacht.

Der **Elektromotor** ist eine der wichtigsten Komponenten von Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Elektromotoren sind wahre Alleskönner. Sie bestechen in einem relativ weiten Drehzahlbereich durch hohe Wirkungsgrade um 93 bis 97%, eine hohe Zuverlässigkeit sowie ein relativ geringes Gewicht. Elektromotoren können im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren ihr maximales Drehmoment schon bei kleinen Umdrehungszahlen praktisch vom Stand weg zur Verfügung stellen. Im Gegensatz zum Verbrennungsmotor wird beim Fahrzeugelektromotor zwischen einer maximalen Leistung und einer Dauerleistung unterschieden. Die Maximalleistung ist unter anderem abhängig von der verwendeten Leistungselektronik und der Wärmeabfuhr des Motors. Die Dauerleistung ist davon abhängig, wie oft innerhalb eines bestimmten Zeitabschnitts die maximale Leistung des Elektromotors, z.B. beim Beschleunigen an der Ampel oder einer rasanten Bergfahrt, abgerufen wird. Während heutige Verbrennungsmotoren vollgasfest ausge-

legt sind und somit klaglos stundenlange Vollastfahrten verkraften, ist bei Elektroantrieben oft schon nach wenigen Minuten ein kritischer Temperaturbereich erreicht, in dem das System zum Bauteileschutz mit deutlicher Leistungsminderung reagiert und den Antrieb so in ein sicheres Temperaturfenster zurückführt. Gebräuchliche Spannungen (Gleichspannung) für den Elektroantrieb liegen entweder bei 48 V oder fast 400 V. Bei 48 V spricht man von einem Niedervoltsystem (NV), bei Spannungen ab 60 V aufwärts von einem Hochvoltsystem (HV). Die Erhöhung der Spannungslage bei gleicher Eingangsleistung ergibt für den Elektromotor keinen signifikanten Vorteil. Allerdings haben Ladetechnologie und Ausführungen der Kabelstränge im Hochvoltsystem Vorteile gegenüber dem Niedervoltsystem. Das geringe Massenträgheitsmoment des Elektromotors in Kombination mit Drehzahlen bis $20\,000\text{ min}^{-1}$ verspricht für den Fahrer enorme Beschleunigungszeiten, vor allem beim Beschleunigen aus dem Stand. Nur das hochfrequente Sirren ist manchmal störend. Verantwortlich dafür sind die elektromagnetischen Oberwellen. In der Vergangenheit wurde die Mehrzahl der Elektrofahrzeuge durch Gleichstrommotoren angetrieben. Moderne Fahrzeuge nutzen inzwischen Wechselstrommotoren, entweder permanenterregte Synchronmaschinen PSM oder Asynchronmaschinen ASM. Beide Systeme lassen sich mit einer modernen Leistungselektronik sehr gut regeln. Für die Rotor-Magnete der Synchronmaschine wird meistens Neodym-Eisen-Bor (NdFeB) eingesetzt. Der Rotor der PSM kann bis zu einer Temperatur von 150°C belastet werden. Ihre hohe Leistungsdichte begünstigt eine kompakte und leichte Bauweise. Für Asynchronmaschinen beträgt die maximale Rotortemperatur dagegen 200°C . Sie haben keine Permanentmagnete und sind einfach im Aufbau, robust, wartungsarm und langlebig, eignen sich aber nur bedingt für getriebeintegrierte Anwendungen. Allerdings hat die ASM gegenüber der PSM einen etwas geringeren Wir-

Bild 5.14 Das Hybridmodul dient zum Starten des Verbrennungsmotors, zum Laden der Hochvolt-Batterie und als elektrischer Motor zum Antrieb des Fahrzeugs
[Bild: Audi]



kungsgrad. Nachteilig ist, dass zur Herstellung der Rotormagnete auf sogenannte „Seltene Erden“ zurückgegriffen werden muss. Diese Rohstoffe sind – wie der Name bereits sagt – selten, nur begrenzt verfügbar und daher sehr teuer.

Auch im Audi Q7 Hybrid nutzt Audi eine PSM-Maschine, die speziell auf hohe Drehmomente ausgelegt ist. Das Hybridmodul (Bild 5.14) hat einen großen Durchmesser, ist jedoch nur wenige Zentimeter lang und lässt sich damit gut zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe integrieren. Sein optimaler Drehzahlbereich liegt zwischen 500 und 2550 min^{-1} und unterstützt die ohnehin kräftige Drehmomentcharakteristik des V6-Dieselmotors mit weiteren 350 Nm Drehmoment. Alle von Audi eingesetzten Elektro-Antriebsmotoren sind flüssigkeitsgekühlt. So ist sichergestellt, dass die zulässige Betriebstemperatur von maximal 180°C nicht überschritten wird. Der Faktor Temperatur begrenzt das Leistungspotenzial, kurzfristige Überschreitungen sind jedoch zulässig.

5.1.1 Der 48-Volt-Niedervolt-Hybridantrieb

Renault startete im Scenic mit einem Niedervolt-Hybridantrieb auf Basis eines 48-Volt-Teilbordnetzes und weitere Hersteller wie z.B. Mercedes folgten. Die erste Serienlösung im Renault Scenic Hybrid Assist (Bild 5.15) kombiniert einen effizienten, wassergekühlten Induktionsmotor mit einem integrierten Wechselrichter. Der Elektromotor wirkt dabei über einen Riementrieb direkt auf die Kurbelwelle des Verbrennungsmotors, diese Anordnung wird von Experten als „PO-Topologie“ bezeichnet. Wie das jeweilige Prinzip genannt wird, hängt von der Einbauposition der Elektromaschine ab. Bild 5.16 zeigt die möglichen Positionen der Elektromaschine (P1 bis P4) sowie die Lage eventuell notwendiger Kupplungen (K0 und K1).

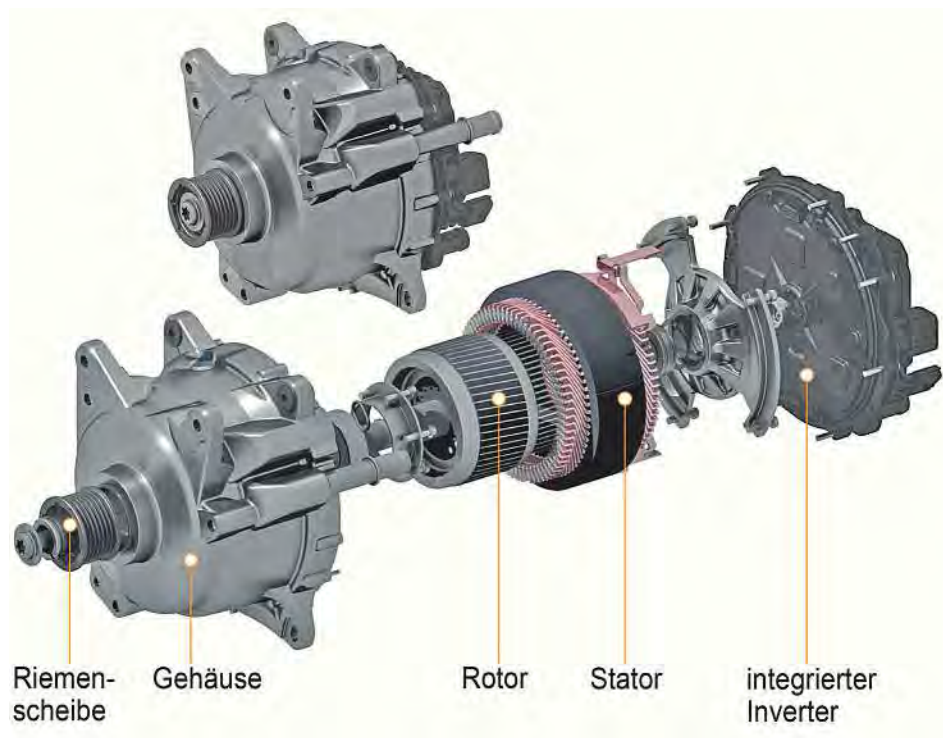
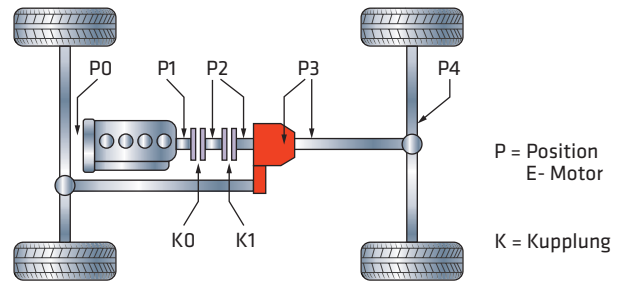


Bild 5.15

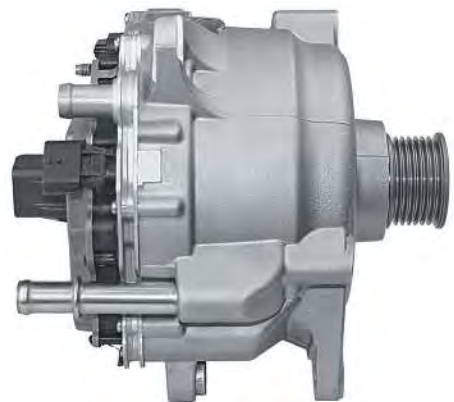
Der 48-Volt-Mildhybrid ist an der Position des Generators eingebaut.

Bild 5.16
Antriebsvarianten für
Hybrid-Konzepte im Vergleich



Die 48-Volt-Technik gilt als zukunftsweisend, weil die im Vergleich zu aktuellen Hybridfahrzeugen relativ niedrige Spannung vielfältige Vorteile bei moderaten Mehrkosten ermöglicht. Ziel solcher Systeme ist nicht das Erreichen möglichst großer elektrischer Reichweite, sondern vielmehr die Verbrauchs- und Schadstoffreduktion bei gleichzeitiger Verbesserung von Komfort und Fahrzeugdynamik. Dazu leistet das vergleichsweise geringe Mehrgewicht des Systems einen erheblichen Beitrag. Angesichts der einfachen Adaptierbarkeit des modularen Systems an bestehende Fahrzeug-Antriebsstrangkonzepte wird mit einer schnellen Marktdurchdringung gerechnet, so dass bereits im Jahr 2020 weltweit vier Millionen Fahrzeuge mit solchen Niedervolt-Hybridantrieben produziert werden. Neben der einfachen Adaptierbarkeit legten die Ingenieure besonderen Wert auf einen hohen Wirkungsgrad des Gesamtsystems. Der Wirkungsgrad eines 48-Volt-Systems ist wesentlich davon abhängig, wie hoch die zur Verfügung stehende Antriebs- und Regenerationsleistung im Dauerbetrieb ist. Daher wird ein wassergekühlter Induktionsmotor, der direkt an den Motor-Kühlkreislauf angeschlossen werden kann, verwendet. So ist es möglich, im Bauraum eines konventionellen Startergenerators dauerhaft eine Leistung von 6 Kilowatt und ein Drehmoment von 60 Newtonmetern bereitzustellen. Die Übersetzung des Riementriebs einkalkuliert, werden so bis zu 150 Newtonmeter auf die Kurbelwelle übertragen (Bild 5.17).

Bild 5.17
Der Generator mit integriertem Inverter erreicht bei geringem Platzbedarf eine hohe Leistungsdichte
[Bild: Continental]



Zur Leistungs- und Drehzahlregelung des Motors ist ein Wechselrichter notwendig, der zur besseren Raumausnutzung und guten Kühlung platzsparend in den Gehäusedeckel integriert wird. Der Wechselrichter arbeitet auf Basis eines Metalloxid-Halbleiter-Feldefekt-Transistors (MOSFET), was einen hohen Wirkungsgrad verspricht. Die Anbindung an das 12-Volt-Standardnetz erfolgt über einen DC/DC-Wandler (Bild 5.18), der es zudem

**Bild 5.18**

Der kompakt aufgebaute Konverter überzeugt mit einem hohen Wirkungsgrad

erlaubt, einen Teil der im Lithium-Ionen-Akku gespeicherten Energie auch für die Stabilisierung des konventionellen Bordnetzes zu verwenden.

Der gegenüber Hochvolt-Hybriden vergleichsweise kleine, aber auch leichte Energiespeicher hat eine Kapazität von 1,31 kWh. Dieser kompakte Speicher reicht nicht für rein elektrisches Fahren aus. Die Vorteile dieses Konzepts, bei dem der antreibende Elektromotor direkt mit der Kurbelwelle verbunden ist (TO-Prinzip), liegen neben dem geringen Gewicht und den überschaubaren Mehrkosten vor allem in der signifikanten Verbrauchs- und Emissionsreduzierung. Besonders verbrauchssenkend wirkt dabei die Boost- und Rekuperationswirkung des Elektromotors, aber auch die Lastpunktverschiebung bei dem in Kombination verbauten 81 kW/110 PS starken Turbodieselmotor. In der Summe kann so im WLTP eine Verbrauchseinsparung erreicht werden, die sich im Realverkehr, vor allem in der Stadt, durch den höheren Anteil an Rekuperationsphasen steigern kann. Dazu trägt auch bei, dass der Verbrennungsmotor beim Heranfahen an eine Ampel bereits bei Geschwindigkeiten von weniger als 20 km/h abgeschaltet werden kann. Gestartet wird der Verbrennungsmotor grundsätzlich durch den 48-Volt-Antrieb und innerhalb von nur 0,2 Sekunden – ein konventioneller Starter benötigt rund die doppelte Zeit. Wird der 48-Volt-Antrieb, wie im Scenic Energy dCi 110 Hybrid Assist, mit einem Dieselmotor kombiniert, werden vor allem beim Beschleunigen aus niedriger Drehzahl heraus die entstehenden Stickoxid-Emissionen um bis zu 10% reduziert, da ein Teil des benötigten Drehmoments über den Elektromotor erzeugt wird. Den Verbrauchsvorteil gegenüber dem konventionellen Diesel beziffert Renault mit 0,4 Litern Diesel auf 100 Kilometer.

Einen kleinen, aber nicht unwichtigen Beitrag dazu liefert beim PO-Konzept auch die sogenannte Lastpunktverschiebung. Mit ihr kann erreicht werden, dass der Dieselmotor möglichst häufig nahe dem optimalen Schnittpunkt zwischen Verbrauch und Antriebsmoment, dem Bestpunkt, betrieben werden kann. Wird geringe Last unterhalb des Bestpunkts vom Verbrenner abgefordert, kann etwa zusätzlich der Speicher aufgeladen werden, um so längere verbrauchsneutrale Segelphasen zu ermöglichen. Bei Lastanforderungen über dem Bestpunkt kann der Elektromotor unterstützen, um so den Verbrauch zu minimieren. In der Praxis kann der Fahrer eines Scenic Energy dCi 110 Hybrid Assist mit 6-Gang-Schaltung elektrisch unterstützt noch früher hochschalten. Alternativ kann er bei niedertouriger Fahrweise zügiger beschleunigen, ohne herunterzuschalten. Beides kommt einem geringen Kraftstoffverbrauch zugute.

Bild 5.19
 ISAG integrierter
 Starter-Generator
 [Bild: Daimler]



Mercedes setzt mit dem P0- und P2-Konzept (vgl. Bild 5.16) auf die 48-Volt-Elektrifizierung bei zwei neuen Ottomotoren: dem 3,0-l-Reihensechszylinder M 256 mit 300 kW/408 PS und mehr als 500 Nm sowie dem 2,0-l-Vierzylinder M 264 mit 200 kW/272 PS. Während die Vierzylindermotoren mit riemengetriebenem Startergenerator (RSG) ausgestattet sind, kommt bei den Sechszylindern ein integrierter Startergenerator (ISG) zum Einsatz. Wie auch bei der im Renault Scenic eingesetzten Technik wirkt der E-Antrieb bei den Mercedes-Vierzylindern per Riemen auf die Kurbelwelle (P0-Konzept) und ist seitlich am Triebwerk angebracht. Die Stuttgarter geben die Antriebs- und Rekuperationsleistung der E-Maschine mit je 12,5 kW, das Startdrehmoment mit 150 Nm an. Eine Boost-Funktion steht bis 2500 min^{-1} zur Verfügung. Über die Fähigkeiten des Renault-Scenic-Antriebs hinaus soll bei geeigneter Getriebe-Konfiguration auch ein Segeln mit abgestelltem Verbrenner sowie ein Stopp/Start mit intelligentem Motorabschalten bereits bei niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten möglich sein. Der Komfort-Start und Hochlauf des Motors sollen laut Mercedes nahezu unmerklich vonstatten gehen. Hohen Komfort erwartet man natürlich erst recht von der Mild-Hybridisierung der Mercedes-Sechszylindermodelle mit P2-Konzept. Hier befindet sich der Elektromotor zwischen Benziner und Getriebe (Integrierter Starter-Generator ISAG) (Bild 5.19). Er kann so völlig unabhängig vom Verbrennungsmotor betrieben werden. Ein rein elektrisches Fahren mit Geschwindigkeiten von kurzzeitig bis zu 50 km/h soll mit diesem 48-Volt-Antrieb möglich sein. Dafür leistet die E-Maschine am Mercedes-Sechszylinder maximal 15 kW und kann den Antrieb im Boost-Betrieb mit bis zu 220 Nm Drehmoment unterstützen. Wie üblich übernimmt der integrierte Startergenerator auch die Energierückgewinnung und das Segeln, zusätzlich aber auch die Leerlaufregelung des Verbrennungsmotors, was unliebsame Vibrationen und Schwingungen wirkungsvoll eliminiert. Auch dieses System wird durch einen vergleichsweise kleinen 0,9-kWh-Li-Ionen-Akku gespeist. Auf diesen Speicher greift auch der elektrisch angetriebene Zusatz-Turbolader zu, der dem Fahrzeug besonders aus nied-

rigen Motordrehzahlen zusätzliche Agilität verleiht. Beide Technologien – E-Turbo plus Hybrid-Boost – sichern dem neuen Reihensechser kräftigen Antritt und satten Durchzug ohne Turboloch. Gegenüber dem V6-Vorgängermotor mit 245 kW/333 PS soll eine Verbrauchsminderung um etwa 15% möglich sein.

5.1.2 Opel Ampera 1. Generation (Range Extender)

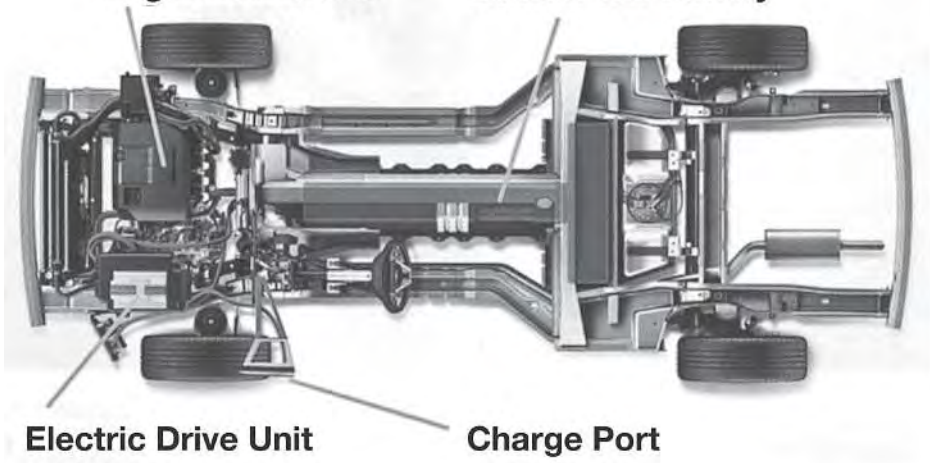
Der Ampera ist im Prinzip ein serieller Vollhybrid mit Elektroantrieb und einer Reichweite von mehreren Hundert Kilometern (Bild 5.20). Kurze Strecken bis zu 60 km legt der Ampera rein elektrisch und völlig CO₂-frei zurück, die Energie kommt aus einer 16 kWh fassenden Lithium-Ionen-Batterie, die an einer normalen 230-V-Steckdose geladen werden kann.

Richtig leer wird der Akku nie, denn Opel entlädt den Stromspeicher aus Haltbarkeitsgründen nur zu 70%. In 5,5 Stunden ist er am 230-Volt-Netz wieder vollgeladen. Dies entspricht dem Energiegehalt von ca. 1,8 Liter Benzin.



Engine Generator

Lithium-Ion Battery



Electric Drive Unit

Charge Port

Bild 5.20 Das als E-REV bezeichnete Antriebssystem des Opel Ampera der 1. Generation besteht aus einem T-förmigen Batteriepack, einem 111 kW starken elektrischen Antriebsmotor sowie einem On-Board-Stromgenerator [Bild: ams]