

Bosch Fachinformation Automobil



BOSCH
Technik fürs Leben

Konrad Reif *Hrsg.*

Ottomotor- Management

Steuerung, Regelung und Überwachung

4. Auflage



Springer Vieweg

BOSCH Fachinformation Automobil enthält das Basiswissen des weltweit größten Automobilzulieferers aus erster Hand. Anwendungsbezogene Darstellungen sind das Kennzeichen dieser Buchreihe. Ganz auf den Bedarf an praxisnahem Hintergrundwissen zugeschnitten, findet der Autofachmann ausführliche Angaben, die zum Verständnis moderner Fahrzeuge benötigt werden. Sie eignet sich damit hervorragend für den Alltag des Entwicklungsingenieurs, für die berufliche Weiterbildung, für Lehrgänge, zum Selbststudium oder zum Nachschlagen in der Werkstatt. Alle Informationen sind so gestaltet, dass sich auch ein Leser zurechtfindet, für den das Thema neu ist. Die bedarfsgerechte Angebotspalette beginnt beim Kraftfahrtechnischen Taschenbuch, das als handliches Nachschlagewerk den kompakten Einblick in die aktuelle Fahrzeugtechnik bietet. Einen umfassenden Einblick in größere, zusammenhängende Themengebiete bieten die ausführlichen Fachbücher im gebundenen Hardcover-Umschlag. Anschauliche Detailinformationen mit deutlich reduziertem Umfang werden, im flexiblen Einband, zu konkreten Aufgabenstellungen erklärt. Kleinere Lernhefte zu thematisch abgegrenzten Wissensgebieten stehen in den Lernordnern „Automobilelektronik lernen“ und „Motorsteuerung lernen“ bereit.

Konrad Reif
Herausgeber

Ottomotor-Management

Steuerung, Regelung und Überwachung

4., vollständig neubearbeitete Auflage



Springer Vieweg

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Konrad Reif
Duale Hochschule Baden-Württemberg
Ravensburg, Campus Friedrichshafen
Friedrichshafen, Deutschland
reif@dhbw-ravensburg.de

ISBN 978-3-8348-1416-6

ISBN 978-3-8348-2102-7 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-8348-2102-7

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 1998, 2003, 2005, 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Ottomotor-Management enthält eine umfassende Darstellung der Steuerung und Regelung von Ottomotoren. Neben einem kurzen Abriss der Geschichte inklusive der Motorsteuerungssysteme in der Vergangenheit werden die Grundlagen des Ottomotors und die für die Steuerung und Regelung zentralen Themen ausführlich dargestellt. Dies sind zum einen die klassischen Themen Kraftstoffversorgung, Füllungssteuerung, Einspritzung, Zündung und Abgasnachbehandlung. Zum anderen sind aber auch die typischen Elektronik-Themen Sensoren, elektronische Steuerung und Regelung, Steuergerät und Diagnose sehr wichtig. Die übergreifenden Themen Abgasgesetzgebung, alternative Kraftstoffe und Hybridantriebe runden das Buch ab.

Diese 4. Auflage ist eine grundlegende Neubearbeitung des Buches. Sowohl die inhaltliche Struktur des Buches als auch die Inhalte der einzelnen Kapitel sind neu. Alle Kapitel des Buches wurden entweder völlig neu geschrieben oder stark überarbeitet, erweitert und ergänzt. Dabei wurde jedoch Wert darauf gelegt, den wesentlichen Charakter des Buches beizubehalten. Dies betrifft insbesondere die fundierte, praxisbezogene und anschauliche Darstellung sowie die aussagekräftigen und übersichtlichen Bilder. Dies ist dadurch möglich, dass die Inhalte von Fachleuten verfasst wurden, die in der Regel bei Bosch und in einzelnen Ausnahmefällen bei anderen Fahrzeug- und Zulieferfirmen an genau den dargestellten Fachgebieten arbeiten. Soweit trotz der Vielzahl der Autoren möglich, wurde eine einheitliche Darstellungsweise und eine durchgängige Systematik und Nomenklatur des Buches angestrebt.

Ohne die außerordentliche Unterstützung Vieler hätte diese 4. Auflage nicht entstehen können. Zuerst gilt der Dank den Verfassern der einzelnen Beiträge, die mit großer Sorgfalt und Geduld selbst sehr umfangreiche und anspruchsvolle Kapitel termingerecht fertiggestellt haben. Alle sind im Autorenverzeichnis aufgeführt. An dieser Stelle sind besonders Herr Dr.-Ing. Klaus Benninger und Herr Dr.-Ing. Andreas Kufferath zu nennen, die dieses Buchprojekt mit unermüdlichem Einsatz unterstützt haben. Für fachliche Diskussion und Unterstützung, vor allem während der Endphase der Bucherstellung danke ich Frau Dipl.-Ing. Amira Horozovic und Herrn Prof. Dr. Stephan Engelking. Ferner danke ich auch allen Lesern, die mir wertvolle Hinweise zur Korrektur gegeben haben.

Friedrichshafen, im Dezember 2014

Konrad Reif



2 Geschichte des Automobils

- 2 Entwicklungsgeschichte
- 4 Pioniere der Kfz-Technik
- 8 Das Lebenswerk von Robert Bosch

10 Grundlagen des Ottomotors

- 10 Arbeitsweise
- 15 Zylinderfüllung
- 23 Verbrennung
- 27 Drehmoment, Leistung und Verbrauch
- 31 Thermodynamische Grundlagen:
Analyse und Simulation
- 39 Wirkungsgrad
- 47 Messtechnik an Verbrennungsmotoren
- 49 Exkurs: Kraftstoffverbrauch in der Praxis

50 Kraftstoffversorgung

- 50 Einführung und Überblick
- 55 Komponenten der Kraftstoffförderung
- 62 Rückhaltesysteme für Kraftstoffdämpfe,
Tankentlüftung
- 64 Ottokraftstoffe

74 Füllungssteuerung

- 74 Elektronische Motorleistungssteuerung
- 77 Dynamische Aufladung
- 80 Variable Ventilsteuerung
- 85 Aufladung
- 96 Ladungsbewegung
- 98 Abgasrückführung

100 Einspritzung

- 101 Saugrohreinspritzung
- 117 Benzin-Direkteinspritzung

138 Zündung

- 138 Magnetzündung
- 138 Batteriezündung
- 140 Induktive Zündanlage
- 146 Zündspulen
- 157 Zündkerzen
- 171 Simulationsbasierte Entwicklung
von Zündkerzen
- 172 Zündkerzen-Praxis

174 Abgasnachbehandlung

- 174 Abgasemissionen und Schadstoffe
- 177 Einflüsse auf Rohemissionen
- 182 Katalytische Abgasreinigung
- 203 Alternative Abgasnachbehandlungssysteme

206 Sensoren

- 206 Einsatz im Kraftfahrzeug
- 207 Temperatursensoren
- 209 Motordrehzahlsensoren
- 214 Heißfilm-Luftmassenmesser
- 217 Piezoelektrische Klopfensoren
- 218 Mikromechanische Drucksensoren
- 221 Hochdrucksensoren
- 222 λ -Sonden
- 223 Zweipunkt- λ -Sonden
- 226 Breitband- λ -Sonde
- 239 NO_x -Sensor

232 Elektronische Steuerung und Regelung

- 232 Übersicht
- 234 Betriebsdatenverarbeitung
- 237 Systembeispiele
- 242 Systemstruktur
- 253 Softwarestruktur
- 263 Steuergeräteapplikation

272 Steuergerät

- 272 Einführung, Anforderungen
und Einsatzbedingungen
- 272 Elektronischer Aufbau des Steuergeräts
- 275 Rechnerkern
- 278 Sensorik
- 280 Aktor-Ansteuerung
- 281 Applikation von Steuergeräten
in Fahrzeugprojekten
- 283 Hardware-nahe Software
- 285 Mechanik

288 Motorsteuerungssysteme in der Vergangenheit

- 291 Anfänge der Gemischbildung
- 298 Benzineinspritzsysteme
im Wandel der Zeit
- 314 Anfänge der Zündsysteme
- 322 Batterie-Zündsysteme
im Wandel der Zeit

328 Emissionsgesetzgebung

- 328 Einführung
- 331 EU und UN/ECE
- 337 USA
- 352 Japan
- 354 Weitere Länder
- 356 Testzyklen
- 360 Weltweit harmonisierte Testzyklen
- 361 Abgasmesstechnik

368 Diagnose

- 368 Überwachung im Fahrbetrieb
 - On-Board-Diagnose
- 370 OBD-System für Pkw und leichte Nfz
- 374 OBD-Funktionen
- 387 Diagnose in der Werkstatt

392 Alternative Kraftstoffe

- 392 Erdgas
- 406 Autogas
- 411 Flexfuel-Systeme

418 Hybridantriebe

- 418 Merkmale
- 419 Funktionalitäten
- 420 Funktionale Klassifikation
- 421 Antriebsstrukturen
- 427 Steuerung von Hybridfahrzeugen
- 430 Regeneratives Bremssystem

432 Abkürzungsverzeichnis

439 Sachwortverzeichnis

Geschichte des Automobils

Dipl.-Ing. Dietrich Kuhlitz,
Prof. Dr.-Ing. Konrad Reif,
Duale Hochschule Baden-Württemberg.

Grundlagen des Ottomotors

Dr.-Ing. David Lejsek,
Dr.-Ing. Andreas Kufferath,
Dr.-Ing. André Kulzer,
Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG,
Prof. Dr.-Ing. Konrad Reif,
Duale Hochschule Baden-Württemberg.

Kraftstoffversorgung

Dipl.-Ing. Andreas Posselt,
Dr.-Ing. Jens Wolber,
Ing.-grad. Peter Schelhas,
Dipl.-Ing. Manfred Franz,
Dipl.-Ing. (FH) Horst Kirschner,
Dipl.-Ing. Andreas Pape,
Dr. rer. nat. Winfried Langer,
Dipl.-Ing. Peter Kolb,
Dr. rer. nat. Jörg Ullmann,
Günther Straub,
Prof. Dr.-Ing. Konrad Reif,
Duale Hochschule Baden-Württemberg.

Füllungssteuerung

Dr.-Ing. Martin Brandt,
Dr.-Ing. Alex Grossmann,
Dipl.-Ing. Markus Deissler,
Prof. Dr.-Ing. Kurt Kirsten, IDK GmbH,
Dipl.-Ing. Michael Bäuerle,
Dipl.-Ing. Martin Rauscher,
Dr.-Ing. Jochen Müller, Bosch Mahle Turbo
Systems GmbH & Co. KG,
Dr.-Ing. Wolfgang Samenfink,
Prof. Dr.-Ing. Konrad Reif,
Duale Hochschule Baden-Württemberg.

Einspritzung

Dipl.-Ing. Andreas Posselt,
Dipl.-Ing. Markus Gesk,
Dipl.-Ing. Anja Melsheimer,

Dipl.-Ing. (BA) Ferdinand Reiter,
Dipl.-Ing. (FH) Klaus Joos,
Dipl.-Ing. Peter Schenk,
Dr.-Ing. Andreas Kufferath,
Dr.-Ing. Wolfgang Samenfink,
Dipl.-Ing. Andreas Glaser,
Dr.-Ing. Tilo Landefeld,
Dipl.-Ing. Uwe Mueller,
Prof. Dr.-Ing. Konrad Reif,
Duale Hochschule Baden-Württemberg.

Zündung

Dipl.-Ing. Walter Gollin,
Dipl.-Ing. (FH) Klaus Lerchenmüller,
Dr.-Ing. Grit Vogt,
Prof. Dr.-Ing. Konrad Reif,
Duale Hochschule Baden-Württemberg.

Abgasnachbehandlung

Dipl.-Ing. Klaus Winkler,
Dr.-Ing. Wilfried Müller,
Umicore AG & Co. KG,
Prof. Dr.-Ing. Konrad Reif,
Duale Hochschule Baden-Württemberg.

Sensoren

Dr.-Ing. Manfred Strohmarm,
Dr.-Ing. Berndt Cramer,
Prof. Dr.-Ing. Konrad Reif,
Duale Hochschule Baden-Württemberg.

Elektronische Steuerung und Regelung

Dipl.-Ing. Stefan Schneider,
Dipl.-Ing. Andreas Blumenstock,
Dipl.-Ing. Oliver Pertler,
Prof. Dr.-Ing. Konrad Reif,
Duale Hochschule Baden-Württemberg.

Steuergerät

Dipl.-Ing. Hans-Walter Schmitt,
Dipl.-Ing. Hans-Peter Ströbele,
Dipl.-Ing. Axel Aue,
Dipl.-Ing. Norbert Jeggle,
Dipl.-Ing. Andreas Müller,

Dipl.-Ing. Wolfgang Löwl,
Dipl.-Ing. Jochen Schneider,
Dipl.-Ing. Jörg Gebers,
Prof. Dr.-Ing. Konrad Reif,
Duale Hochschule Baden-Württemberg.

Motorsteuerungssysteme in der Vergangenheit

Dipl.-Ing. (FH) Klaus Lerchenmüller,
Dipl.-Ing. Otto Glöckler,
Dr.-Ing. Klaus Benninger,
Prof. Dr.-Ing. Konrad Reif,
Duale Hochschule Baden-Württemberg.

Emissionsgesetzgebung

Dr. rer. nat. Matthias Tappe,
Dipl.-Phys. Martin-Andreas Drühe,
Prof. Dr.-Ing. Konrad Reif,
Duale Hochschule Baden-Württemberg.

Diagnose

Dr.-Ing. Markus Willimowski,
Dipl.-Ing. Jens Leideck,
Prof. Dr.-Ing. Konrad Reif,
Duale Hochschule Baden-Württemberg.

Alternative Kraftstoffe

Dipl.-Ing. Andreas Posselt,
Dr. rer. nat. Winfried Langer,
Dipl.-Ing. Peter Kolb,
Dr. rer. nat. Jörg Ullmann,
Prof. Dr.-Ing. Konrad Reif,
Duale Hochschule Baden-Württemberg.

Hybridantriebe

Dipl.-Ing. Thomas Huber,
Dr.-Ing. Jan Lichtermann,
Prof. Dr.-Ing. Konrad Reif,
Duale Hochschule Baden-Württemberg.

Soweit nicht anders angegeben, handelt es sich um Mitarbeiter der
Robert Bosch GmbH.

Geschichte des Automobils

Die Mobilität spielt für die Menschen seit jeher eine große Rolle. In fast jeder Epoche versuchte man Mittel zu finden, die Menschen über längere Strecken mit größtmöglicher Geschwindigkeit zu tragen vermochten. Mit der Entwicklung von zuverlässigen Verbrennungsmotoren, die mit flüssigen Kraftstoffen betrieben werden konnten, wurde der Traum des selbstfahrenden Automobils Wirklichkeit.

Entwicklungsgeschichte

Für die Entstehung eines Gefährtes, das in unserem Zeitalter nicht mehr wegzudenken ist, waren viele Voraussetzungen nötig, ohne die ein solches Projekt nicht hätte umgesetzt werden können. Einige Daten sind an dieser Stelle vorangestellt, die einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung des Automobils beitrugen:

- Circa 3500 v. Chr.
Entwicklung des Rades in Mittel- und Osteuropa sowie in Mesopotamien
- Circa 1300
Weiterentwicklung der Kutsche mit Elementen wie Lenkung, Radaufhängung und Federung

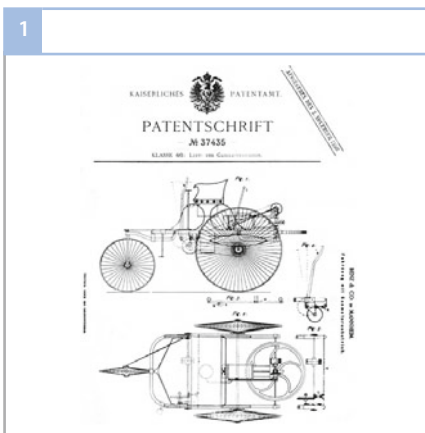
- 1769
Dampfwagen von Joseph Cugnot
- 1858
Gasmotor von Étienne Lenoir
- 1860
Viertakt-Verbrennungsmotor von Christian Reithmann, sowie später davon unabhängig von Alphonse Beau de Rochas und Nikolaus Otto

Viele heute noch zum Einsatz kommende Details im Verbrennungsmotor mit Fremdzündung wurden von Nikolaus Otto entwickelt, z. B. die Niederspannungszündung.

Carl Benz konstruierte den „Benz Patent-Motorwagen Nummer 1“ ([Bild 1](#)), auf den ihm 1886 das Patent erteilt wurde. Dieser Patent-Motorwagen Nummer 1 gilt als erstes praxistaugliches Kraftfahrzeug der Welt. Mit seinem Patent beginnt die rasante Entwicklung des Automobils mit Verbrennungsmotor. Die öffentliche Meinung war jedoch damals noch gespalten. Die Verfechter des neuen Zeitalters rühmten das Automobil als Inbegriff des Fortschritts, während der Großteil der Bevölkerung gegen die zunehmende Belästigung durch Staub, Lärm, Unfallgefahr und rücksichtslose Autofahrer protestierte. Dennoch war das Automobil

1

Bild 1
Das Patent für den „Benz Patent-Motorwagen Nummer 1“, das Benz am 29. Januar 1886 erteilt wurde, basierte nicht auf einer umgebauten Kutsche, sondern stellte eine eigenständige ganzheitliche Konstruktion dar (Daimler)



2

Daimler Motor-Kutsche von 1894 (Daimler)



3 Das T-Modell, „Tin Lizzie“ genannt, wurde mehr als 15 Millionen Mal gebaut (Ford).



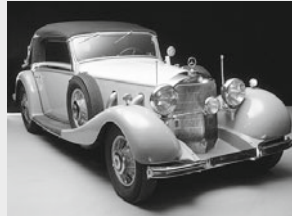
nicht mehr aufzuhalten.

In den Anfängen stellte der Kauf eines Automobils eine Herausforderung dar. Es gab praktisch kein Straßennetz, an Reparaturwerkstätten war nicht zu denken, Treibstoff erwarb man in der Apotheke und Ersatzteile ließ man vor Ort schmieden. Umso erwähnenswerter ist die erste Fernfahrt von Bertha Benz im Jahr 1888. Sie war der erste Mensch am Steuer eines motorisierten Fahrzeugs, der sich über kürzere Versuchs- und Probefahrten hinauswagte. Die Bewältigung der damals enormen Distanz über 100 km von Mannheim nach Pforzheim bekräftigte die Zuverlässigkeit des Automobils.

Am Anfang konzentrierten sich – außer Benz – in Deutschland jedoch wenige Unternehmer auf die weltweite Bedeutung der motorgetriebenen Fahrzeuge. Die Franzosen sollten das Automobil groß machen. Panhard & Levassor nutzten Lizenzen für Daimler-Motoren zum Bau eigener Automobile. Panhard sind Konstruktionsmerkmale wie Lenkrad, geneigte Lenksäule, Kuppelungspedal, Luftreifen und Röhrenkühler zu verdanken. In den folgenden Jahren entstanden Firmen wie Peugeot, Citroën, Renault, Fiat, Ford, Rolls-Royce, Austin und andere. Gottlieb Daimler, der seine Motoren nahezu weltweit vertrieb, hatte hierauf einen nicht unerheblichen Einfluss.

Die anfangs am Kutschenbau orientierten Wagen wurden sehr schnell zu Automobilen

4 Mercedes-Benz 500 K Cabriolet C, Baujahr 1934 (Daimler)



im heutigen Sinne weiterentwickelt. Allerdings wurde jedes Automobil einzeln in Handarbeit gefertigt. Das änderte sich grundlegend im Jahr 1913 mit der Einführung des Fließbandes durch Henry Ford. Mit dem T-Modell revolutionierte er die Automobilbranche in Amerika. Das Auto war ab diesem Zeitpunkt kein Luxusgut mehr. Höhere Stückzahlen machten eine rapide Senkung der Preise möglich, womit das Automobil den Massen zugänglich wurde. Citroën und Opel waren eine der ersten, die das Fließband nach Europa brachten, doch erst Mitte der 1920er-Jahre setzte es sich durch.

Die Automobilhersteller erkannten schnell, dass sie sich auf die Wünsche der Kunden einstellen mussten, um am Markt erfolgreich zu sein. Man nutzte Rennerfolge zu Werbemaßnahmen. Professionelle Fahrer prägten sich und ihre Automarke mit einem Geschwindigkeitsrekord in die Köpfe der Zuschauer ein. Weiterhin bemühte man sich um eine breitere Produktpalette. So entstand über die Jahrzehnte hinweg eine Vielfalt an Autoformen, die sich jeweils am Zeitgeist sowie den wirtschaftlichen und politischen Einflüssen orientierten. Zum Beispiel setzten sich Stromlinienfahrzeuge vor dem Zweiten Weltkrieg nicht durch; repräsentative Autos waren gefragt. Exklusivste Fahrzeuge wie der Mercedes-Benz 500 K, Rolls-Royce Phantom III, 855 Horch

5 VW-Käfer aus den 70er-Jahren



oder Bugatti Royale wurden entwickelt.

Der Zweite Weltkrieg hatte einen erheblichen Einfluss auf die Entwicklung von Kleinwagen. Der heute als Käfer bekannte Volkswagen wurde von Ferdinand Porsche konstruiert und in Wolfsburg produziert. Nach Ende des Krieges waren vor allem kleine, erschwingliche Wagen gefragt. Die Hersteller reagierten auf diese Nachfrage: So entstanden die Autos Goliath GP 700, Lloyd 300, Citroën 2CV, Trabant, Isetta oder Fiat 500 C. Autos wurden nun nach neuen Standards gebaut; man legte mehr Wert auf Technik, integriertes Zubehör und vor allem ein vernünftiges Preis-Leistungs-Verhältnis.

Heute wird ein hoher Standard der Insassensicherheit gewährt; Airbag, ABS, ESP und „intelligente“ Sensoren sind wegen der steigenden Anzahl von Verkehrsteilnehmern und der im Vergleich zu früher hohen Geschwindigkeiten unerlässlich. Das Auto wurde durch die Arbeit der Automobilindustrie aufgrund der gestiegenen Marktanforderungen stetig weiterentwickelt. Es gibt jedoch Gebiete, die auch für die Zukunft eine Herausforderung darstellen. Ein Beispiel ist die weitere Reduzierung der Umweltbelastungen und alternative Energiequellen.

Eines wird sich in naher Zukunft wohl nicht ändern – der Begriff, für den das Auto seit mehr als 100 Jahren steht und schon dessen Urväter begeisterte: die individuelle Mobilität.

Pioniere der Kfz-Technik

Aufgrund der Vielzahl an Personen, die sich mit der Entwicklung des Automobils beschäftigt haben, stellt diese Auflistung keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

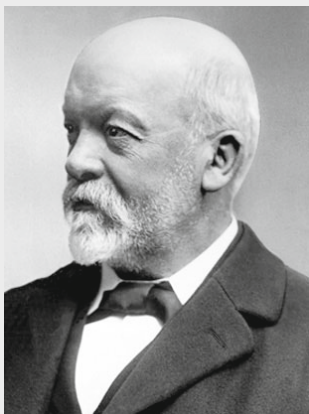
6 Nikolaus August Otto (Deutz)



Nikolaus August Otto (1832–1891), gebürtig aus Holzhausen, entwickelte schon früh sein Interesse für Technik. Neben seiner Anstellung als Reisender für Lebensmittelgroßhandlungen beschäftigte er sich mit der Funktion von Gasmotoren.

Ab 1862 spezialisierte sich Otto vollends auf den Motorenbau. Es gelang ihm, einen Viertakt-Gasmotor zu entwickeln. Dafür erhielt er 1867 auf der Pariser Weltausstellung die Goldmedaille. 1884 erfand er die Niederspannungszündung, womit Motoren mit Benzin betrieben werden konnten. Diese Neuheit stellte die Grundlage für das spätere Lebenswerk von Robert Bosch dar. Ottos Verdienst liegt darin, dass er als Erster den Viertakt-Verbrennungsmotor gebaut und dessen Überlegenheit über alle Vorläufer demonstriert hat.

7 Gottlieb Daimler (Daimler)



Gottlieb Daimler (1834–1900) stammte aus Schorndorf und studierte Maschinenbau am Polytechnikum in Stuttgart. 1865 lernte er den hoch begabten Ingenieur Wilhelm Maybach kennen. Beide sollte fortan eine dauernde Zusammenarbeit verbinden. Neben der Erfindung des ersten Motorrads beschäftigte sich Daimler vor allem mit der Entwicklung eines für den Einsatz in Fahrzeugen geeigneten Ottomotors. 1889 stellten Daimler und Maybach in Paris den ersten „Stahlradwagen“ mit Zwei-Zylinder-V-Motor vor.

Schon ein Jahr später pflegte Daimler internationale Beziehungen mit der Vermarktung des schnell laufenden Daimler-Motors. So ließ 1891 Armand Peugeot einen von ihm konstruierten Wagen bei der Rad-Fernfahrt Paris – Brest – Paris erfolgreich mitfahren und stellte sowohl seine Konstruktion als auch die Zuverlässigkeit des verwendeten Daimler-Motors unter Beweis. Daimlers Verdienst resultiert aus der stetigen Weiterentwicklung des Ottomotors und dem Vertrieb in andere Länder.

8 Wilhelm Maybach (MTU Friedrichshafen GmbH)

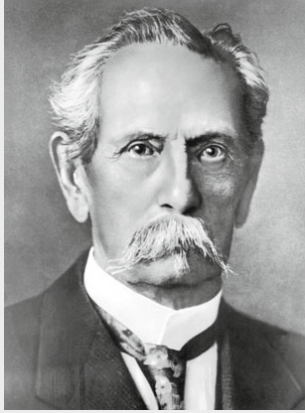


Wilhelm Maybach (1846–1929), geboren in Heilbronn, absolvierte eine Ausbildung zum Technischen Zeichner. Bald darauf war er als Detailkonstrukteur unter anderem bei der Firma Gasmotoren Deutz AG (von Otto gegründet) tätig.

Maybach überarbeitete den Ottomotor und brachte ihn zur Serienreife. Er entwickelte unter anderem auch die Wasserkühlung, den Spritzdüsenvergaser und die Doppelzündung. Im Jahr 1900 konstruierte Maybach unter Verwendung von Leichtmetall einen revolutionären Rennwagen. Auf Anregung des österreichischen Geschäftsmannes Jellinek wurde dieses Fahrzeug entwickelt. Er bestellte 36 Wagen mit der Bedingung, das Modell nach seiner Tochter „Mercedes“ zu benennen.

9

Carl Friedrich Benz (Daimler)



Carl Friedrich Benz (1844–1929), geboren in Karlsruhe, studierte Maschinenbau am Polytechnikum in Karlsruhe. 1871 gründete er seine erste Fabrik für Eisengießerei und Industrieteile in Mannheim.

Unabhängig von Daimler und Maybach beschäftigte er sich ebenfalls mit dem Einbau von Motoren in Fahrzeugen. Nachdem die wichtigsten Ansprüche aus Ottos Viertaktpatent für nichtig erklärt worden waren, entwickelte Benz neben einem eigenen Viertaktmotor auch einen Oberflächenvergaser, die elektrische Zündung, die Kupplung, die Wasserkühlung sowie eine Gangschaltung. 1886 meldete er sein Patent an und stellte der Öffentlichkeit seinen Motorwagen vor. Er gründete die Benz & Cie. Rheinische Gasmotorenfabrik in Mannheim. In dieser Firma wurde in der Zeit von 1894 bis 1901 das „Velo“ gefertigt, das mit einer produzierten Gesamtstückzahl von ca. 1 200 Exemplaren als erstes Großserien-Automobil bezeichnet werden kann. Diese Firma fusionierte 1926 mit der Daimler-Motoren-Gesellschaft zur „Daimler-Benz AG“. Carl Benz stellte das erste Automobil vor und schuf die Voraussetzungen für die industrielle Fertigung von Serienfahrzeugen.

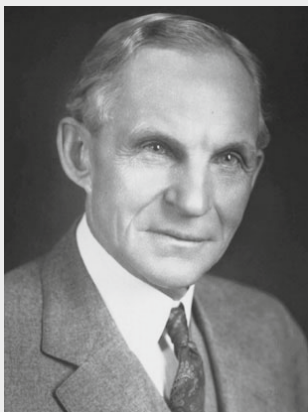
10

Cäcilie Bertha Benz, geborene Ringer, um 1871 (Daimler)



Cäcilie Bertha Benz (geborene Ringer; geboren am 3. Mai 1849 in Pforzheim; gestorben am 5. Mai 1944 in Ladenburg) war wesentlich daran beteiligt, das Automobil als allgemeines Fortbewegungsmittel zu etablieren. Sie ließ sich vorzeitig ihre Mitgift auszahlen, um mit diesem Kapital ihrem Ehemann Carl Benz die Weiterführung seines Unternehmens zu ermöglichen. Sie unternahm die erste erfolgreiche Fernfahrt mit einem Automobil von Mannheim nach Pforzheim. Sie war damit der erste Mensch, der sich über kürzere Versuchs- und Probefahrten hinauswagte. Ihre Fernfahrt trug wesentlich dazu bei, die noch bestehenden Vorbehalte der Kunden gegen das Fahrzeug zu zerstreuen, und ermöglichte in der Folge den wirtschaftlichen Erfolg der Firma.

11 Henry Ford (Ford)



Henry Ford (1863–1947) stammte aus Dearborn, Michigan (USA). Ford erarbeitete sich 1891 als Ingenieur bei der Edison Illuminating Company eine sichere Position, widmete sich aber persönlich der Weiterentwicklung des Ottomotors.

Die Gebrüder Duryea bauten 1893 das erste Automobil in Amerika. Ford konnte 1896 mit seinem Wagen, dem „Quadricycle Runabout“, nachziehen, der die Ausgangsbasis für zahlreiche Konstruktionen werden sollte. 1908 brachte Ford das „Model T“ heraus, das ab 1913 am Fließband gefertigt wurde. Ford dominierte ab dem Jahr 1921 den Automarkt der USA mit einem Anteil von 55 % der gesamten Industrieproduktion. Der Name Henry Ford steht für die Motorisierung Amerikas. Dank seiner Ideen wurde das Automobil einer breiten Bevölkerungsschicht zugänglich.

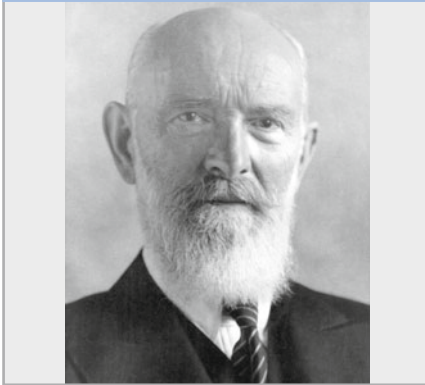
12 Rudolf Christian Karl Diesel (MAN AG)



Rudolf Christian Karl Diesel (1858–1913), gebürtig aus Paris, fasste mit 14 Jahren den Entschluss, Ingenieur zu werden. Er schloss sein Examen am Polytechnikum München mit der besten Leistung seit Bestehen der Anstalt ab.

1892 erhielt Diesel das Patent für den später nach ihm benannten „Diesel-Motor“, der schnell seine Verbreitung als stationärer Motor und als Schiffsmotor fand. 1908 fuhr der erste Lastwagen mit einem Dieselmotor. Sein Einzug in die Pkw-Welt dauerte jedoch Jahrzehnte. Erst im Jahr 1936 wurde er im Mercedes 260 D in Serie eingebaut. Heute ist der Dieselmotor so weit entwickelt, dass er in vielen Ländern ebenso verbreitet ist wie der Ottomotor. Rudolf Diesel hat mit seiner Erfindung wesentlich zu einer wirtschaftlicheren Nutzung des Verbrennungsmotors beigetragen. Mit Lizenzvergaben konnte Diesel international tätig werden, erntete aber zu Lebzeiten nicht mehr die gebührende Anerkennung.

13 Robert Bosch



Das Lebenswerk von Robert Bosch

Robert Bosch, geboren am 23. September 1861 in Albeck bei Ulm, entstammte einer wohlhabenden Bauernfamilie. Nach seiner Ausbildung zum Feinmechaniker arbeitete er zeitweise in verschiedenen Unternehmen, wobei er seine technischen sowie kaufmännischen Fähigkeiten und Erfahrungen weiter ausbaute. Nach einem halben Jahr als Gasthörer im Fach Elektrotechnik an der TH Stuttgart reiste er in die USA um bei „Edison Illuminating“ zu arbeiten. Später war er bei „Siemens Brothers“ in England beschäftigt.

1886 entschloss er sich, eine „Werkstätte für Feinmechanik und Elektrotechnik“ in einem Hinterhaus im Stuttgarter Westen zu eröffnen. Er beschäftigte einen weiteren Mechaniker sowie einen Lehrling. Am Anfang lag sein Arbeitsgebiet in der Installation und Repara-

tur von Telefonen, Telegrafen, Blitzableitern und anderen feinmechanischen Tätigkeiten. Sein Engagement in der schnellen Bearbeitung neuer Problemstellungen sollte ihm auch später stets einen Vorsprung verschaffen.

Die von Bosch entwickelte Niederspannungs-Magnetzündung im Jahr 1897 stellte – im Gegensatz zu den unzuverlässigen Vorläufern – den Durchbruch für die Automobilindustrie dar. Dieses Produkt war der Ausgangspunkt für die rasche Expansion des Unternehmens von Robert Bosch. Er verstand es immer, die Zweckbestimmtheit der technisch-wirtschaftlichen Welt mit den humanen Erfordernissen in Einklang zu bringen. Auf sozialem Gebiet galt Bosch als Vorreiter.

Technische Pionierarbeit hat Bosch mit der Entwicklung und Ausreifung folgender Produkte geleistet:

- Niederspannungs-Magnetzünder,
- Hochspannungs-Magnetzünder für höhere Drehzahlen (konstruiert von seinem Mitarbeiter Gottlob Honold),
- Zündkerze,
- Zündverteiler,
- Batterie für Pkw und Motorrad,
- Anlasser (Starter),
- Lichtmaschine (Generator),
- Bosch-Licht, elektrische Beleuchtung für Pkw,
- Diesel-Einspritzpumpen,
- Autoradio (gefertigt bei den „Ideal-Werken“, ab 1938 „Blaupunkt“),
- erste Lichtenanlage für das Fahrrad,
- Bosch-Horn (elektrische Hupe),
- Batteriezündung,
- Bosch-Winker (damals als typisch für den deutschen Organisationsgeist belächelt – heute als Blinker unverzichtbar).

Viele weitere Entwicklungen, auch im gesellschaftlichen Bereich, könnte man hier aufzählen. Sie zeigen, dass Bosch seiner Zeit voraus war. Sein vorwärts strebender Geist hat die Automobilentwicklung stark

14 Erste Anzeige in der Stuttgarter Tageszeitung „Der Beobachter“, 1887



vorangetrieben. Mit der steigenden Zahl der selbstfahrenden „Automobilisten“ wuchs das Bedürfnis nach Werkstätten rasch an. In den 1920er-Jahren begann Robert Bosch mit dem systematischen Aufbau einer flächendeckenden Kundendienstorganisation. 1926 erhielten diese Werkstätten den einheitlichen, als Markenzeichen angemeldeten Namen „Bosch-Dienst“.

Einen ebenso hohen Anspruch hatte Bosch an die Umsetzung sozialer Ziele. Er führte 1906 den 8-Stunden-Tag ein und gewährte den Arbeitern hohe Löhne. 1910 stiftete er eine Million Mark zur Förderung der technischen Bildung. Die Fertigstellung des 500 000. Magnetzünders nahm er zum Anlass, den arbeitsfreien Samstagnachmittag einzuführen. Weitere Verbesserungen waren z. B. die Altersversorgung, Arbeitsplätze für Schwerbehinderte und die Urlaubsregelung. Boschs Aussage, „Beruf und Lehrpraxis sind ein kundigerer Erzieher als bloße Theorie“ führte 1913 zur Einrichtung einer Lehrwerkstatt, die 104 Lehrlingen Platz bot.

Mitte 1914 war der Name Bosch schon weltweit vertreten. Der Umsatzanteil der ins Ausland gelieferten Erzeugnisse stieg stetig und erreichte im Jahre 1913 88,7 %. Bosch konnte durch die großen Heereslieferungen weiterhin expandieren, doch missfielen ihm die Gewinne in Anbetracht der Gräueltaten dieser Jahre. Er spendete daraufhin im Jahre 1916 20 Mio. RM (Reichsmark) für soziale Zwecke.

Nach dem Ersten Weltkrieg war es schwer, im Ausland wieder Fuß zu fassen. Beispielsweise wurden in den USA die Bosch-Fabriken, Verkaufsniederlassungen sowie die Wort- und Bildmarke konfisziert und an ein US-Unternehmen verkauft. Das bedeutete unter anderem, dass Produkte unter dem Namen „Bosch“ erschienen, die nicht von ihm produziert waren. Erst Ende der 1920er-Jahre hatte Bosch alle Rechte zurückerwor-

ben und konnte sich wieder in den USA etablieren. Boschs unbeugsame Entschlossenheit, Schwierigkeiten zu meistern, brachte die Firma wieder auf den Weltmarkt und prägte den Mitarbeitern die internationale Bedeutung der Firma Bosch ins Bewusstsein ein.

Zwei beispielhafte Daten stellen noch einmal den sozialen Einsatz Boschs heraus:

1936 stiftete er Mittel zum Bau eines Krankenhauses, das 1940 eingeweiht wurde. In der Eröffnungsrede hob Bosch sein Engagement für eine soziale Zusammenarbeit hervor: „Jede Arbeit ist wichtig, auch die kleinste. Es soll sich keiner einbilden, seine Arbeit sei über die seines Mitarbeiters erhaben.“

1942 starb mit Robert Bosch ein Unternehmer, der sowohl auf dem technisch-elektrischen als auch auf sozialem Gebiet ein Pionier war. Noch heute gilt er als Vorbild für vorandrängenden Zeitgeist, unermüden Fleiß, soziale Verbesserungen, Unternehmensgeist und Bildungsförderung.

1964 wurde die Robert Bosch Stiftung GmbH gegründet, zu deren Aufgaben die Gesundheitspflege, Wohlfahrtspflege, Bildung, Erziehung, Förderung der Kunst, Kultur sowie Geistes- und Sozialwissenschaften zählen. Durch sie werden die Ideale von Robert Bosch bis in die heutige Zeit gepflegt.

15 Erstes Geschäftshaus in der Londoner Store Street



Grundlagen des Ottomotors

Der Ottomotor ist eine Verbrennungskraftmaschine mit Fremdzündung, die ein Luft-Kraftstoff-Gemisch verbrennt und damit die im Kraftstoff gebundene chemische Energie freisetzt und in mechanische Arbeit umwandelt. Hierbei wurde in der Vergangenheit das brennfähige Arbeitsgemisch durch einen Vergaser im Saugrohr gebildet. Die Emissionsgesetzgebung bewirkte die Entwicklung der Saugrohreinjection (SRE), welche die Gemischbildung übernahm. Weitere Steigerungen von Wirkungsgrad und Leistung erfolgten durch die Einführung der Benzin-Direktinjection (BDE). Bei dieser Technologie wird der Kraftstoff zum richtigen Zeitpunkt in den Zylinder eingespritzt, sodass die Gemischbildung im Brennraum erfolgt.

Arbeitsweise

Im Arbeitszylinder eines Ottomotors wird periodisch Luft oder Luft-Kraftstoff-Gemisch angesaugt und verdichtet. Anschließend wird die Entzündung und Verbrennung des Gemisches eingeleitet, um durch die Expansion des Arbeitsmediums (bei einer Kolbenmaschine) den Kolben zu bewegen. Aufgrund der periodischen, linearen Kolbenbewegung stellt der Ottomotor einen Hubkolbenmotor dar. Das Pleuel setzt dabei die Hubbewegung des Kolbens in eine Rotationsbewegung der Kurbelwelle um (**Bild 1**).

Viertakt-Verfahren

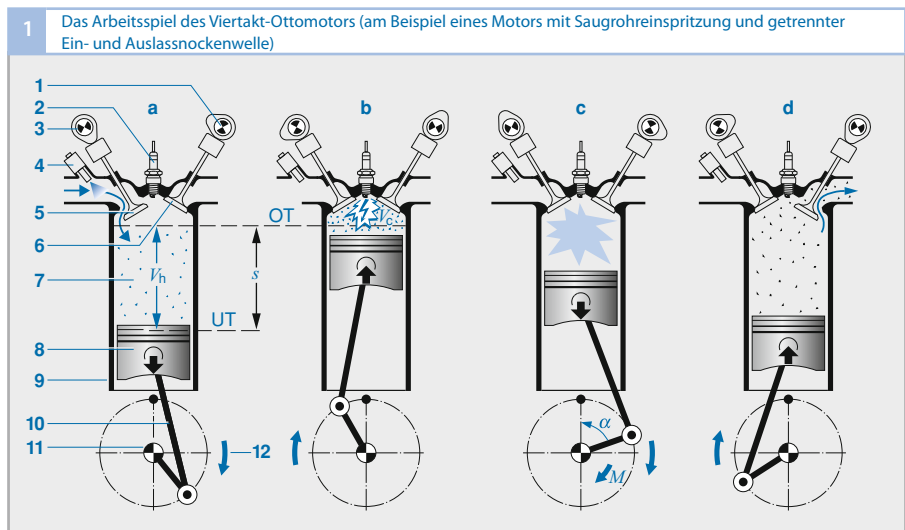
Die meisten in Kraftfahrzeugen eingesetzten Verbrennungsmotoren arbeiten nach dem Viertakt-Prinzip (**Bild 1**). Bei diesem Verfahren steuern Gaswechselventile den Ladungswechsel. Sie öffnen und schließen die Ein- und Auslasskanäle des Zylinders und steuern so die Zufuhr von Frischluft oder -gemisch und das Ausstoßen der Abgase.

Das verbrennungsmotorische Arbeitsspiel stellt sich aus dem Ladungswechsel (Aus-schiebetakt und Ansaugtakt), Verdichtung,

Bild 1

- a Ansaugtakt
- b Verdichtungstakt
- c Arbeitstakt
- d Ausstoßtakt

- 1 Auslassnockenwelle
- 2 Zündkerze
- 3 Einlassnockenwelle
- 4 Einspritzventil
- 5 Einlassventil
- 6 Auslassventil
- 7 Brennraum
- 8 Kolben
- 9 Zylinder
- 10 Pleuellstange
- 11 Kurbelwelle
- 12 Drehrichtung
- M Drehmoment
- α Kurbelwinkel
- s Kolbenhub
- V_h Hubvolumen
- V_c Kompressionsvolumen



Verbrennung und Expansion zusammen. Nach der Expansion im Arbeitstakt öffnen die Auslassventile kurz vor Erreichen des unteren Totpunkts, um die unter Druck stehenden heißen Abgase aus dem Zylinder strömen zu lassen. Der sich nach dem Durchschreiten des unteren Totpunkts aufwärts zum oberen Totpunkt bewegende Kolben stößt die restlichen Abgase aus.

Danach bewegt sich der Kolben vom oberen Totpunkt (OT) abwärts in Richtung unteren Totpunkt (UT). Dadurch strömt Luft (bei der Benzin-Direkteinspritzung) bzw. Luft-Kraftstoffgemisch (bei Saugrohrein-spritzung) über die geöffneten Einlassventile in den Brennraum. Über eine externe Abgasrückführung kann der im Saugrohr befindlichen Luft ein Anteil an Abgas zugemischt werden. Das Ansaugen der Frischladung wird maßgeblich von der Gestalt der Ventilhubkurven der Gaswechselventile, der Phasenstellung der Nockenwellen und dem Saugrohrdruck bestimmt.

Nach Schließen der Einlassventile wird die Verdichtung eingeleitet. Der Kolben bewegt sich in Richtung des oberen Totpunkts (OT) und reduziert somit das Brennraumvolumen. Bei homogener Betriebsart befindet sich das Luft-Kraftstoff-Gemisch bereits zum Ende des Ansaugtaktes im Brennraum und wird verdichtet. Bei der geschichteten Betriebsart, nur möglich bei Benzin-Direkteinspritzung, wird erst gegen Ende des Verdichtungstaktes der Kraftstoff eingespritzt und somit lediglich die Frischladung (Luft und Restgas) komprimiert. Bereits vor Erreichen des oberen Totpunkts leitet die Zündkerze zu einem gegebenen Zeitpunkt (durch Fremdzündung) die Verbrennung ein. Um den höchstmöglichen Wirkungsgrad zu erreichen, sollte die Verbrennung kurz nach dem oberen Totpunkt abgelaufen sein. Die im Kraftstoff chemisch gebundene Energie wird durch die Verbrennung freigesetzt und

erhöht den Druck und die Temperatur der Brennraumladung, was den Kolben abwärts treibt. Nach zwei Kurbelwellenumdrehungen beginnt ein neues Arbeitsspiel.

Arbeitsprozess: Ladungswechsel und Verbrennung

Der Ladungswechsel wird üblicherweise durch Nockenwellen gesteuert, welche die Ein- und Auslassventile öffnen und schließen. Dabei werden bei der Auslegung der Steuerzeiten (Bild 2) die Druckschwingungen in den Saugkanälen zum besseren Füllen und Entleeren des Brennraums berücksichtigt. Die Kurbelwelle treibt die Nockenwelle über einen Zahnriemen, eine Kette oder Zahnräder an. Da ein durch die Nockenwellen zu steuerndes Viertakt-Arbeitsspiel zwei Kurbelwellenumdrehungen andauert, dreht sich die Nockenwelle nur halb so schnell wie die Kurbelwelle.

Ein wichtiger Auslegungsparameter für den Hochdruckprozess und die Verbrennung beim Ottomotor ist das Verdichtungsverhältnis ε , welches durch das Hubvolumen V_h und Kompressionsvolumen V_c folgendermaßen definiert ist:

$$\varepsilon = \frac{V_h + V_c}{V_c}. \quad (1)$$

Dieses hat einen entscheidenden Einfluss auf den idealen thermischen Wirkungsgrad η_{th} , da für diesen gilt:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}, \quad (2)$$

wobei κ der Adiabatenexponent ist [4]. Des Weiteren hat das Verdichtungsverhältnis Einfluss auf das maximale Drehmoment, die maximale Leistung, die Klopfneigung und die Schadstoffemissionen. Typische Werte beim Ottomotor in Abhängigkeit der Füllungssteuerung (Saugmotor, aufgeladener Motor) und der Einspritzart (Saugrohrein-

spritzung, Direkteinspritzung) liegen bei ca. 8 bis 13. Beim Dieselmotor liegen die Werte zwischen 14 und 22. Das Hauptsteuerelement der Verbrennung ist das Zündsignal, welches elektronisch in Abhängigkeit vom Betriebspunkt gesteuert werden kann.

Unterschiedliche Brennverfahren können auf Basis des ottomotorischen Prinzips dargestellt werden. Bei der Fremdzündung sind homogene Brennverfahren mit oder ohne Variabilitäten im Ventiltrieb (von Phase und Hub) möglich. Mit variablem Ventiltrieb wird eine Reduktion von Ladungswechselverlusten und Vorteile im Verdichtungs- und Arbeitstakt erzielt. Dies erfolgt durch erhöhte Verdünnung der Zylinderladung mit Abgas, welches mittels interner (oder auch externer) Rückführung in die Brennkammer gelangt. Diese Vorteile werden noch weiter durch das geschichtete Brennverfahren ausgenutzt. Ähnliche Potentiale kann die so genannte homogene Selbstzündung beim Ottomotor erreichen, aber mit erhöhtem

Regelungsaufwand, da die Verbrennung durch reaktionskinetisch relevante Bedingungen (thermischer Zustand, Zusammensetzung) und nicht durch einen direkt steuerbaren Zündfunken initiiert wird. Hierfür werden Steuerelemente wie die Ventilsteuerung und die Benzin-Direkteinspritzung herangezogen.

Darüber hinaus werden Ottomotoren je nach Zufuhr der Frischladung in Saugmotoren- und aufgeladene Motoren unterschieden. Bei letzteren wird die maximale Luftdichte, welche zur Erreichung des maximalen Drehmomentes benötigt wird, z. B. durch eine Strömungsmaschine erhöht.

Luftverhältnis und Abgasemissionen

Setzt man die pro Arbeitsspiel angesaugte Luftmenge m_L ins Verhältnis zur pro Arbeitsspiel eingespritzten Kraftstoffmasse m_K , so erhält man mit m_L/m_K eine Größe zur Unterscheidung von Luftüberschuss (großes m_L/m_K) und Luftmangel (kleines m_L/m_K). Der genau passende Wert von m_L/m_K für eine stöchiometrische Verbrennung hängt jedoch vom verwendeten Kraftstoff ab. Um eine kraftstoffunabhängige Größe zu erhalten, berechnet man das Luftverhältnis λ als Quotient aus der aktuellen pro Arbeitsspiel angesaugten Luftmasse m_L und der für eine stöchiometrische Verbrennung des Kraftstoffs erforderliche Luftmasse m_{Ls} , also

$$\lambda = \frac{m_L}{m_{Ls}} \quad (3)$$

Für eine sichere Entflammung homogener Gemische muss das Luftverhältnis in engen Grenzen eingehalten werden. Des Weiteren nimmt die Flammengeschwindigkeit stark mit dem Luftverhältnis ab, so dass Ottomotoren mit homogener Gemischbildung nur in einem Bereich von $0,8 < \lambda < 1,4$ betrieben werden können, wobei der beste Wirkungs-

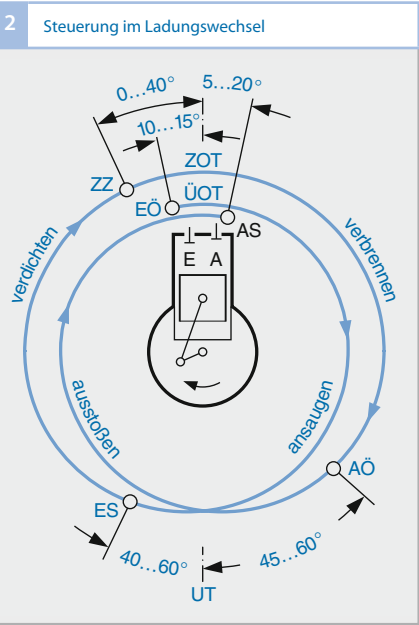
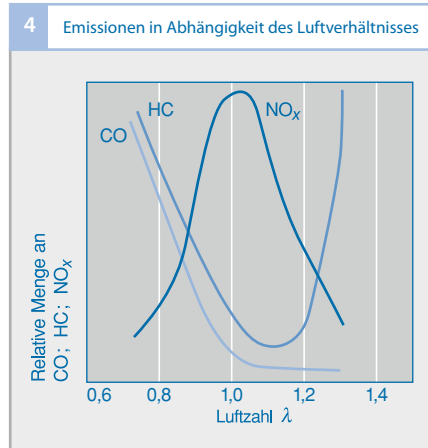
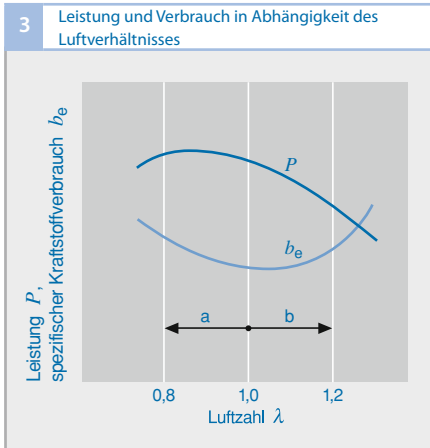


Bild 2
Im Ventilsteuerzeiten-Diagramm sind die Öffnungs- und Schließzeiten der Ein- und Auslassventile aufgetragen.
E Einlassventil
EÖ Einlassventil öffnet
ES Einlassventil schließt
A Auslassventil
AÖ Auslassventil öffnet
AS Auslassventil schließt
OT oberer Totpunkt
ÜOT Überschneidungs-OT
ZOT Zünd-OT
UT unterer Totpunkt
ZZ Zündzeitpunkt

**Bild 3**

- a fettes Gemisch (Luftmangel)
- b mageres Gemisch (Luftüberschuss)

grad im homogen mageren Bereich liegt ($1,3 < \lambda < 1,4$). Für das Erreichen der maximalen Last liegt andererseits das Luftverhältnis im fetten Bereich ($0,9 < \lambda < 0,95$), welches die beste Homogenisierung und Sauerstoffoxidation erlaubt, und dadurch die schnellste Verbrennung ermöglicht (Bild 3).

Wird der Emissionsausstoß in Abhängigkeit des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses betrachtet (Bild 4), so ist erkennbar, dass im fetten Bereich hohe Rückstände an HC und CO verbleiben. Im mageren Bereich sind HC-Rückstände aus der langsameren Verbrennung und der erhöhten Verdünnung erkennbar, sowie ein hoher NO_x -Anteil, der sein Maximum bei $1 < \lambda < 1,05$ erreicht. Zur Erfüllung der Emissionsgesetzgebung beim Ottomotor wird ein Dreiwegekatalysator eingesetzt, welcher die HC- und CO-Emissionen oxidiert und die NO_x -Emissionen reduziert. Hierfür ist ein Luft-Kraftstoff-Verhältnis von $\lambda \approx 1$ notwendig, das durch eine entsprechende Gemischregelung eingestellt wird.

Weitere Vorteile können aus dem Hochdruckprozess im mageren Bereich ($\lambda > 1$) nur mit einem geschichteten Brennverfahren (→ **Grundlagen Ottomotor** → Turbulente vorgemischte teildiffusive Verbrennung) gewonnen werden. Hierbei werden weiterhin

HC- und CO-Emissionen im Dreiwegekatalysator oxidiert. Die NO_x -Emissionen müssen über einen gesonderten NO_x -Speicherkatalysator gespeichert und nachträglich durch Fett-Phasen reduziert oder über einen kontinuierlich reduzierenden Katalysator mittels zusätzlichem Reduktionsmittel (durch selektive katalytische Reduktion) konvertiert werden.

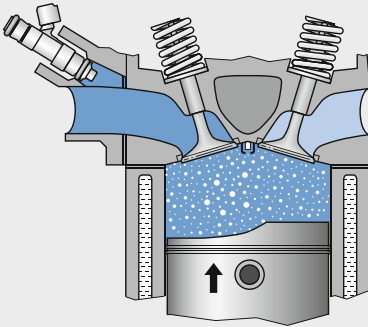
Gemischbildung

Ein Ottomotor kann eine äußere (mit Saugrohreinspritzung) oder eine innere Gemischbildung (mit Direkteinspritzung) aufweisen (Bild 5). Bei Motoren mit Saugrohreinspritzung liegt das Luft-Kraftstoff-Gemisch im gesamten Brennraum homogen verteilt mit dem gleichen Luftverhältnis λ vor (Bild 5a). Dabei erfolgt üblicherweise die Einspritzung ins Saugrohr oder in den Einlasskanal schon vor dem Öffnen der Einlassventile.

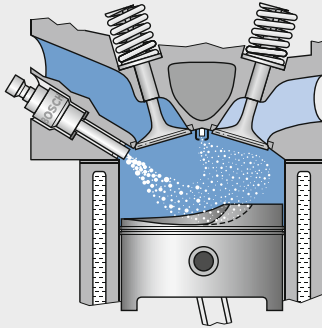
Neben der Gemischhomogenisierung muss das Gemischbildungssystem geringe Abweichungen von Zylinder zu Zylinder sowie von Arbeitsspiel zu Arbeitsspiel garantieren. Bei Motoren mit Direkteinspritzung sind sowohl eine homogene als auch eine heterogene Betriebsart möglich. Beim

5 Gemischbildung

a



b



c

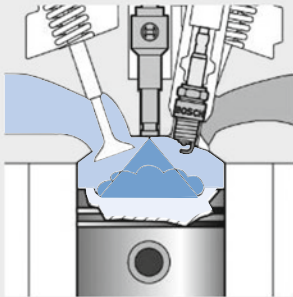


Bild 5

- a homogene Gemischverteilung (mit Saugrohreinjection)
- b Schichtladung, wand- und luftgeführtes Brennverfahren
- c Schichtladung, strahlgeführtes Brennverfahren

Die homogene Gemischverteilung kann sowohl mit der Saugrohreinjection (Bildteil a) als auch mit der Direkteinspritzung (Bildteil c) realisiert werden.

homogenen Betrieb wird eine saughubsynchrone Einspritzung durchgeführt, um eine möglichst schnelle Homogenisierung zu erreichen. Beim heterogenen Schichtbetrieb befindet sich eine brennfähige Gemischwolke mit $\lambda \approx 1$ als Schichtladung zum Zündzeitpunkt im Bereich der Zündkerze. Bild 5 zeigt die Schichtladung für wand- und luftgeführte (Bild 5b) sowie für das strahlgeführte Brennverfahren (Bild 5c). Diese Brennverfahren werden im Abschnitt → **Einspritzung** genauer erklärt. Der restliche Brennraum ist mit Luft oder einem sehr mageren Luft-Kraftstoff-Gemisch gefüllt, was über den gesamten Zylinder gemittelt ein mageres Luftverhältnis ergibt. Der Ottomotor kann dann ungedrosselt betrieben werden. Infolge der Innenkühlung durch die direkte Einspritzung können solche Motoren höher verdichten. Die Entdrosselung und das höhere Verdichtungsverhältnis führen zu höheren Wirkungsgraden.

Zündung und Entflammung

Das Zündsystem einschließlich der Zündkerze entzündet das Gemisch durch eine Funkenentladung zu einem vorgegebenen Zeitpunkt. Die Entflammung muss auch bei instationären Betriebszuständen hinsichtlich wechselnder Strömungseigenschaften und lokaler Zusammensetzung gewährleistet werden. Durch die Anordnung der Zündkerze kann die sichere Entflammung insbesondere bei geschichteter Ladung oder im mageren Bereich optimiert werden.

Die notwendige Zündenergie ist grundsätzlich vom Luft-Kraftstoff-Verhältnis abhängig. Im stöchiometrischen Bereich wird die geringste Zündenergie benötigt, dagegen erfordern fette und magere Gemische eine deutlich höhere Energie für eine sichere Entflammung. Der sich einstellende Zündspannungsbedarf ist hauptsächlich von der im Brennraum herrschenden Gasdichte abhän-

gig und steigt nahezu linear mit ihr an. Der Energieeintrag des durch den Zündfunken entflammten Gemisches muss ausreichend groß sein, um die angrenzenden Bereiche entflammen zu können und somit eine Flammenausbreitung zu ermöglichen.

Der Zündwinkelbereich liegt in der Teillast bei einem Kurbelwinkel von ca. 50 bis 40 ° vor ZOT (vgl. Bild 2) und bei Saugmotoren in der Volllast bei ca. 20 bis 10 ° vor ZOT. Bei aufgeladenen Motoren im Volllastbetrieb liegt der Zündwinkel wegen erhöhter Klopfneigung bei ca. 10 ° vor ZOT bis 10 ° nach ZOT. Üblicherweise werden im Motorsteuergerät die positiven Zündwinkel als Winkel vor ZOT definiert.

Zylinderfüllung

Eine wichtige Phase des Arbeitspiels wird von der Verbrennung gebildet. Für den Verbrennungsvorgang im Zylinder ist ein Luft-Kraftstoff-Gemisch erforderlich. Das Gasgemisch, das sich nach dem Schließen der Einlassventile im Zylinder befindet, wird als Zylinderfüllung bezeichnet. Sie besteht aus der zugeführten Frischladung (Luft und gegebenenfalls Kraftstoff) und dem Restgas (Bild 6).

Bestandteile

Die Frischladung besteht aus Luft, und bei Ottomotoren mit Saugrohreinspritzung (SRE) dem dampfförmigen oder flüssigen Kraftstoff. Bei Ottomotoren mit Benzindirekteinspritzung (BDE) wird der für das Arbeitspiel benötigte Kraftstoff direkt in den Zylinder eingespritzt, entweder während des Ansaugtaktes für das homogene Verfahren oder – bei einer Schichtladung – im Verlauf der Kompression.

Der wesentliche Anteil an Frischluft wird über die Drosselklappe angesaugt. Zusätz-

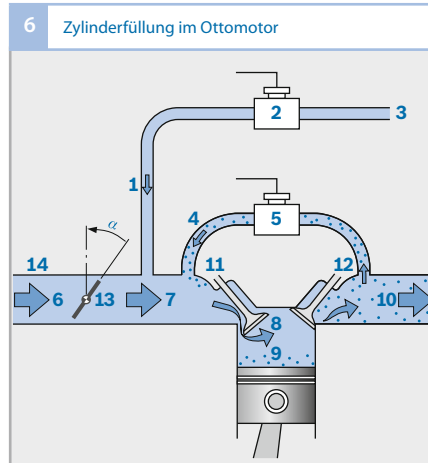


Bild 6

- 1 Luft- und Kraftstoffdämpfe (aus Kraftstoffverdunstungs-Rückhaltesystem)
- 2 Regenerierventil mit variablem Ventilöffnungsquerschnitt
- 3 Verbindung zum Kraftstoffverdunstungs-Rückhaltesystem
- 4 rückgeführtes Abgas
- 5 Abgasrückführventil (AGR-Ventil) mit variablem Ventilöffnungsquerschnitt
- 6 Luftmassenstrom (mit Umgebungsdruck p_u)
- 7 Luftmassenstrom (mit Saugrohrendruck p_s)
- 8 Frischgasfüllung (mit Brennraumdruck p_B)
- 9 Restgasfüllung (mit Brennraumdruck p_B)
- 10 Abgas (mit Abgasgegendruck p_A)
- 11 Einlassventil
- 12 Auslassventil
- 13 Drosselklappe
- 14 Ansaugrohr
- α Drosselklappenwinkel

liches Frischgas kann über das Kraftstoffverdunstungs-Rückhaltesystem angesaugt werden. Die nach dem Schließen der Einlassventile im Zylinder befindliche Luftmasse ist eine entscheidende Größe für die während der Verbrennung am Kolben verrichtete Arbeit und damit für das vom Motor abgegebene Drehmoment. Maßnahmen zur Steigerung des maximalen Drehmomentes und der maximalen Leistung des Motors bedingen eine Erhöhung der maximal möglichen Füllung. Die theoretische Maximalfüllung ist durch den Hubraum, die Ladungswechselaggregate und ihre Variabilität begrenzt. Bei aufgeladenen Motoren markiert der erzielbare Ladedruck zusätzlich die Drehmomentausbeute.

Aufgrund des Totvolumens verbleibt stets zu einem kleinen Teil Restgas aus dem letzten Arbeitszyklus (internes Restgas) im Brennraum. Das Restgas besteht aus Inertgas und bei Verbrennung mit Luftüberschuss (Magerbetrieb) aus unverbrannter Luft. Wichtig für die Prozessführung ist der Anteil des Inertgases am Restgas, da dieses keinen Sauerstoff mehr enthält und an der Verbrennung des folgenden Arbeitspiels nicht teilnimmt.

Ladungswechsel

Der Austausch der verbrauchten Zylinderfüllung gegen Frischgas wird Ladungswechsel genannt. Er wird durch das Öffnen und das Schließen der Einlass- und Auslassventile im Zusammenspiel mit der Kolbenbewegung gesteuert. Die Form und die Lage der Nocken auf der Nockenwelle bestimmen den Verlauf der Ventilerhebung und beeinflussen dadurch die Zylinderfüllung. Die Zeitpunkte des Öffnens und des Schließens der Ventile werden Ventil-Steuerzeiten genannt. Die charakteristischen Größen des Ladungswechsels werden durch Auslass-Öffnen (AÖ), Einlass-Öffnen (EÖ), Auslass-Schließen (AS), Einlass-Schließen (ES) sowie durch den maximalen Ventilhub gekennzeichnet. Realisiert werden Ottomotoren sowohl mit festen als auch mit variablem Steuerzeiten und Ventilhuben (→ **Füllungsteuerung**).

Die Qualität des Ladungswechsels wird mit den Größen Luftaufwand, Liefergrad und Fanggrad beschrieben. Zur Definition dieser Kennzahlen wird die Frischladung herangezogen. Bei Systemen mit Saugrohrreinspritzung entspricht diese dem frisch eintretenden Luft-Kraftstoff-Gemisch, bei Ottomotoren mit Benzindirekteinspritzung und Einspritzung in den Verdichtungsakt (nach ES) wird die Frischladung lediglich durch die angesaugte Luftmasse bestimmt. Der Luftaufwand beschreibt die gesamte während des Ladungswechsels durchgesetzte Frischladung bezogen auf die durch das Hubvolumen maximal mögliche Zylinderladung. Im Luftaufwand kann somit zusätzlich jene Masse an Frischladung enthalten sein, welche während einer Ventilüberschneidung direkt in den Abgastrakt überströmt. Der Liefergrad hingegen stellt das Verhältnis der im Zylinder tatsächlich verbliebenen Frischladung nach Einlass-Schließen zur theoretisch maximal möglichen La-

dung dar. Der Fanggrad, definiert als das Verhältnis von Liefergrad zum Luftaufwand, gibt den Anteil der durchgesetzten Frischladung an, welcher nach Abschluss des Ladungswechsels im Zylinder eingeschlossen wird. Zusätzlich ist als weitere wichtige Größe für die Beschreibung der Zylinderladung der Restgasanteil als das Verhältnis aus der sich zum Einlassschluss im Zylinder befindlichen Restgasmasse zur gesamt eingeschlossenen Masse an Zylinderladung definiert.

Um im Ladungswechsel das Abgas durch das Frischgas zu ersetzen, ist ein Arbeitsaufwand notwendig. Dieser wird als Ladungswechsel- oder auch Pumpverlust bezeichnet. Die Ladungswechselverluste verbrauchen einen Teil der umgewandelten mechanischen Energie und senken daher den effektiven Wirkungsgrad des Motors. In der Ansaugphase, also während der Abwärtsbewegung des Kolbens, ist im gedrosselten Betrieb der Saugrohrdruck kleiner als der Umgebungsdruck und insbesondere kleiner als der Druck im Kurbelgehäuse (Kolbenrückraum). Zum Ausgleich dieser Druckdifferenz wird Energie benötigt (Drosselverluste). Insbesondere bei hohen Drehzahlen und Lasten (im entdrosselten Betrieb) tritt beim Ausstoßen des verbrannten Gases während der Aufwärtsbewegung des Kolbens ein Staudruck im Brennraum auf, was wiederum zu zusätzlichen Energieverlusten führt, welche Ausschleiverluste genannt werden.

Steuerung der Luftfüllung

Der Motor saugt die Luft über den Luftfilter und den Ansaugtrakt an (**Bilder 7 und 8**), wobei die Drosselklappe aufgrund ihrer Verstellbarkeit für eine dosierte Luftzufuhr sorgt und somit das wichtigste Stellglied für den Betrieb des Ottomotors darstellt. Im weiteren Verlauf des Ansaugtraktes erfährt der angesaugte Luftstrom die Beimischung von Kraftstoffdampf aus dem Kraftstoffverduns-

tungs-Rückhaltesystem sowie von rückgeführtem Abgas (AGR). Mit diesem kann zur Entdrosselung des Arbeitsprozesses – und damit einer Wirkungsgradsteigerung im Teillastbereich – der Anteil des Restgases an der Zylinderfüllung erhöht werden. Die äußere Abgasrückführung führt das ausgestoßene Restgas vom Abgassystem zurück in den Saugkanal. Dabei kann ein zusätzlich installierter AGR-Kühler das rückgeführte Abgas vor dem Eintritt in das Saugrohr auf ein niedrigeres Temperaturniveau kühlen und damit die Dichte der Frischladung erhöhen. Zur Dosierung der äußeren Abgasrückführung wird ein Stellventil verwendet.

Der Restgasanteil der Zylinderladung kann jedoch im großen Maße ebenfalls durch die Menge der im Zylinder verbleibenden Restgasmasse geändert werden. Zu deren Steuerung können Variabilitäten im Ventiltrieb eingesetzt werden. Zu nennen sind hier insbesondere Phasensteller der Nockenwellen, durch deren Anwendung die Steuerzeiten im breiten Bereich beeinflusst werden können und dadurch das Einhalten einer gewünschten Restgasmasse ermöglichen. Durch eine Ventilüberschneidung kann beispielsweise der Restgasanteil für das folgende Arbeitsspiel wesentlich beeinflusst werden. Während der Ventilüberschneidung sind Ein- und Auslassventil gleichzeitig geöffnet, d. h., das Einlassventil öffnet, bevor das Auslassventil schließt. Ist in der Überschneidungsphase der Druck im Saugrohr niedriger als im Abgastrakt, so tritt eine Rückströmung des Restgases in das Saugrohr auf. Da das so ins Saugrohr gelangte Restgas nach dem Auslass-Schließen wieder angesaugt wird, führt dies zu einer Erhöhung des Restgasgehalts.

Der Einsatz von variablen Ventiltrieben ermöglicht darüber hinaus eine Vielzahl an Verfahren, mit welchen sich die spezifische Leistung und der Wirkungsgrad des Otto-

motors weiter steigern lassen. So ermöglicht eine verstellbare Einlassnockenwelle beispielsweise die Anpassung der Steuerzeit für die Einlassventile an die sich mit der Drehzahl veränderliche Gasdynamik des Saugtraktes, um in Volllastbetrieb die optimale Füllung der Zylinder zu ermöglichen.

Zur Wirkungsgradsteigerung im gedrosselten Betrieb bei Teillast ist zudem die Anwendung vom späten oder frühen Schließen der Einlassventile möglich. Beim Atkinson-Verfahren wird durch spätes Schließen der Einlassventile ein Teil der angesaugten Ladung wieder aus dem Zylinder in das Saugrohr verdrängt. Um die Ladungsmasse der Standardsteuerzeit im Zylinder einzuschließen, wird der Motor weiter entdrosselt und damit der Wirkungsgrad erhöht. Aufgrund der langen Öffnungsdauer der Einlassventile beim Atkinson-Verfahren können insbesondere bei Saugmotoren zudem gasdynamische Effekte ausgenutzt werden.

Das Miller-Verfahren hingegen beschreibt ein frühes Schließen der Einlassventile. Dadurch wird die im Zylinder eingeschlossene Ladung im Fortgang der Abwärtsbewegung des Kolbens (Saugtakt) expandiert. Verglichen mit der Standard-Steuerzeit erfolgt die darauf folgende Kompression auf einem niedrigeren Druck- und Temperaturniveau. Um das gleiche Moment zu erzeugen und hierfür die gleiche Masse an Frischladung im Zylinder einzuschließen, muss der Arbeitsprozess (wie auch beim Atkinson-Verfahren) entdrosselt werden, was den Wirkungsgrad erhöht. Aufgrund der weitgehenden Bremsung der Ladungsbewegung während der Expansion vor dem Verdichtungstakt wird allerdings die Verbrennung verlangsamt und das theoretische Wirkungsgradpotential daher zum großen Teil wieder kompensiert. Da beide Verfahren die Temperatur der Zylinderladung während der Kompression senken, können sie insbesondere bei aufgelade-

7

Strukturbild eines Ottomotors mit Saugrohreinjection ohne Aufladung einschließlich Komponenten für die elektronische Steuerung und Regelung

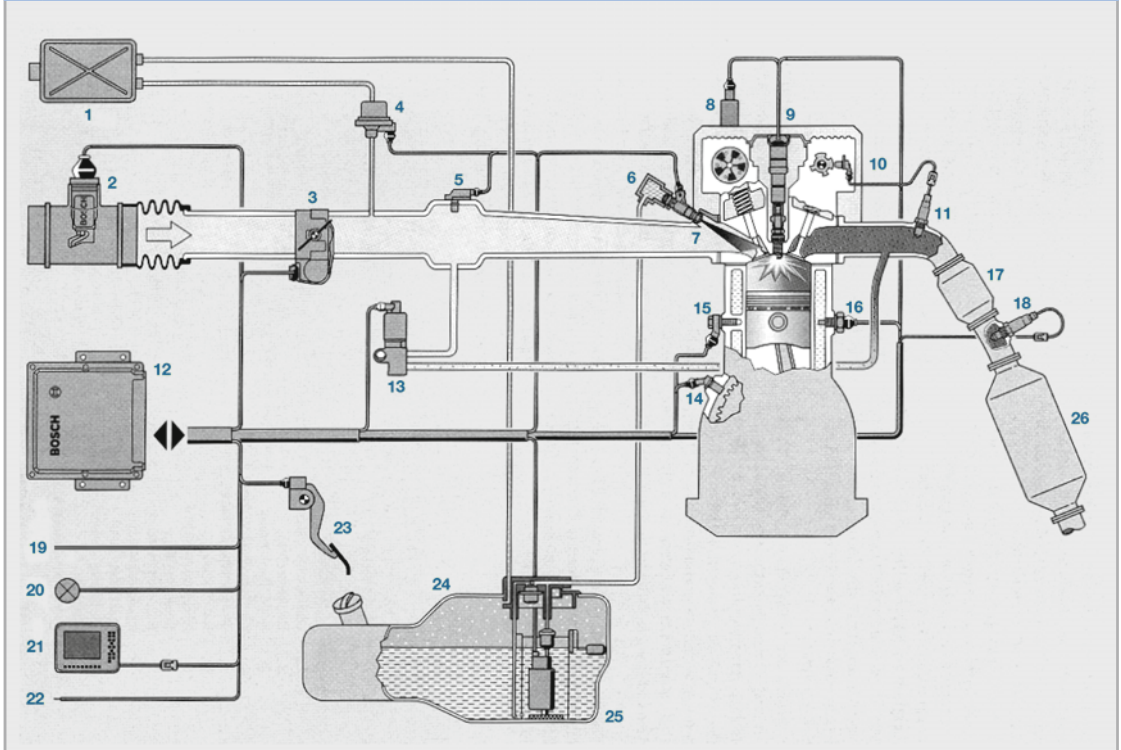


Bild 7

- | | |
|---|--|
| 1 Aktivkohlebehälter | 17 Vorkatalysator (Dreiwegekatalysator) |
| 2 Heißfilm-Luftmassenmesser (HFM) mit integriertem Temperatursensor | 18 λ-Sonde nach dem Vorkatalysator |
| 3 Drosselvorrichtung (EGAS) | 19 CAN-Schnittstelle |
| 4 Tankentlüftungsventil | 20 Motorkontrollleuchte |
| 5 Saugrohrdrucksensor | 21 Diagnoseschnittstelle |
| 6 Kraftstoffverteilerstück | 22 Schnittstelle zur Wegfahrsperrung |
| 7 Einspritzventil | 23 Fahrpedalmodul mit Pedalwegsensoren |
| 8 Aktoren und Sensoren für variable Nockenwellensteuerung | 24 Kraftstoffbehälter |
| 9 Zündkerze mit aufgesteckter Zündspule | 25 Tankeinbaueinheit mit Elektrokraftstoffpumpe, Kraftstofffilter und Kraftstoffregler |
| 10 Nockenwellen-Phasensensor | 26 Hauptkatalysator (Dreiwegekatalysator) |
| 11 λ-Sonde vor dem Vorkatalysator | |
| 12 Motorsteuergerät | |
| 13 Abgasrückführventil | |
| 14 Drehsensors | |
| 15 Klopfsensor | |
| 16 Motortemperatursensor | |

Der in Bild 7 dargestellte Systemumfang bezüglich der On-Board-Diagnose entspricht den Anforderungen der EOBD.

nen Ottomotoren an der Volllast ebenfalls zur Senkung der Klopfneigung und damit zur Steigerung der spezifischen Leistung verwendet werden.

Die Anwendung variabler Ventihubverfahren ermöglicht durch die Darstellung von Teilhuben der Einlassventile ebenfalls eine Entdrosselung des Motors an der Drosselklappe und damit eine Wirkungsgradsteigerung. Zudem kann durch unterschiedliche Hubverläufe der Einlassventile eines Zylinders die Ladungsbewegung deutlich erhöht werden, was insbesondere im Bereich niedriger Lasten die Verbrennung deutlich stabilisiert und damit die Anwendung hoher Restgasraten erleichtert. Eine weitere Möglichkeit zur Steuerung der Ladungsbewegung bilden Ladungsbewegungskappen,

8 Strukturbild eines aufgeladenen Ottomotors mit Direkteinspritzung einschließlich Komponenten für die elektronische Steuerung und Regelung

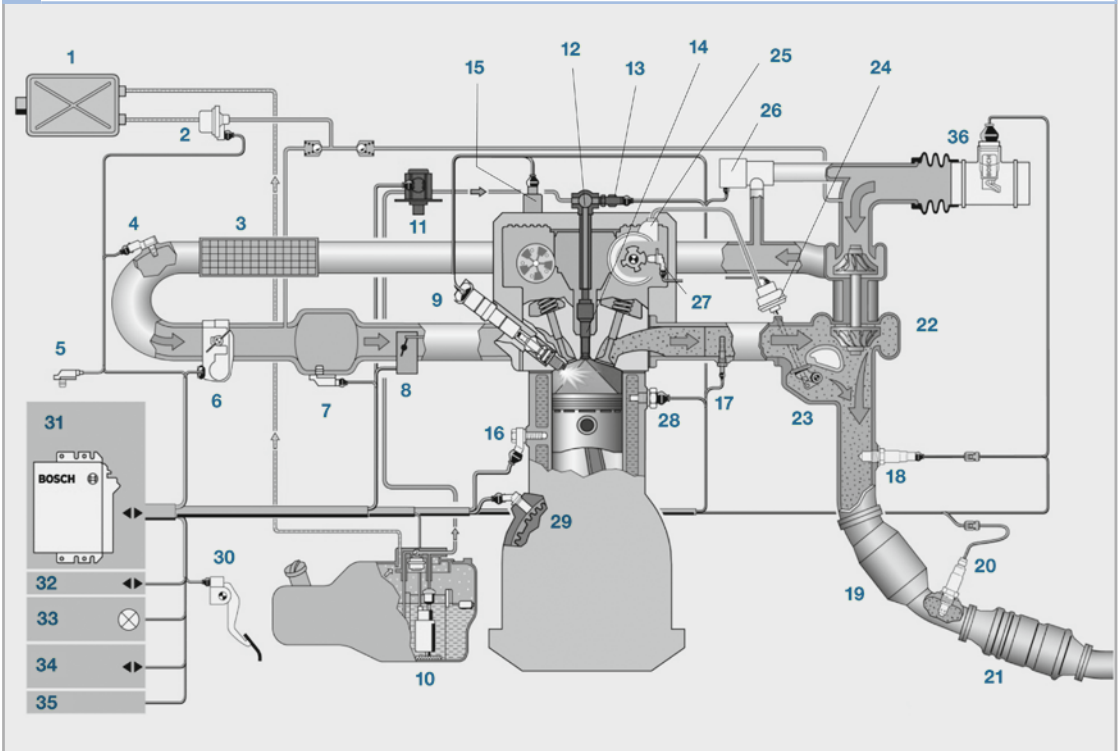


Bild 8

- | | |
|--|------------------------------------|
| 1 Aktivkohlebehälter | 18 λ -Sonde |
| 2 Tankentlüftungsventil | 19 Vorkatalysator |
| 3 Heißfilm-Luftmassenmesser | 20 λ -Sonde |
| 4 kombinierter Ladedruck- und Ansauglufttemperatursensor | 21 Hauptkatalysator |
| 5 Umgebungsdrucksensor | 22 Abgasturbolader |
| 6 Drosselvorrichtung (EGAS) | 23 Waste-Gate |
| 7 Saugrohrdrucksensor | 24 Waste-Gate-Steller |
| 8 Ladungsbewegungsklappe | 25 Vakuumpumpe |
| 9 Zündspule mit Zündkerze | 26 Schub-Umluftventil |
| 10 Kraftstofffördermodul mit Elektrokraftstoffpumpe | 27 Nockenwellen-Phasensensor |
| 11 Hochdruckpumpe | 28 Motortemperatursensor |
| 12 Kraftstoff-Verteilerrohr | 29 Drehzahlsensor |
| 13 Hochdrucksensor | 30 Fahrpedalmodul |
| 14 Hochdruck-Einspritzventil | 31 Motorsteuergerät |
| 15 Nockenwellenversteller | 32 CAN-Schnittstelle |
| 16 Klopfsensor | 33 Motorkontrollleuchte |
| 17 Abgastemperatursensor | 34 Diagnoseschnittstelle |
| | 35 Schnittstelle zur Wegfahrsperre |

welche durch ihre Stellung im Saugkanal des Zylinderkopfs die Strömungsbewegung beeinflussen. Allerdings ergibt sich hier aufgrund der höheren Strömungsverluste auch eine Steigerung der Ladungswechselarbeit.

Insgesamt lassen sich durch die Anwendung variabler Ventiltriebe, welche eine Kombination aus Steuerzeit- und Ventilhubverstellung bis hin zu voll-variablen Systemen umfassen, beträchtliche Steigerungen der spezifischen Leistung sowie des Wirkungsgrades erreichen. Auch die Anwendung eines geschichteten Brennverfahrens ($\rightarrow$ Grundlagen Ottomotor $\rightarrow$ Turbulente vorgemischte teildiffusive Verbrennung) erlaubt aufgrund des hohen Luftüberschusses einen weitgehend ungedrosselten Betrieb, welcher insbesondere in der Teillast des Ot-

tomotors zur einer erheblichen Steigerung des effektiven Wirkungsgrades führt.

Das bei homogener, stöchiometrischer Gemischverteilung erreichbare Drehmoment ist proportional zu der Frischgasfüllung. Daher kann das maximale Drehmoment lediglich durch die Verdichtung der Luft vor Eintritt in den Zylinder (Aufladung) gesteigert werden. Mit der Aufladung kann der Liefergrad, bezogen auf Normbedingungen, auf Werte größer als eins erhöht werden. Eine Aufladung kann bereits allein durch Nutzung gasdynamischer Effekte im Saugrohr erzielt werden (gasdynamische Aufladung). Der Aufladungsgrad hängt von der Gestaltung des Saugrohrs sowie vom Betriebspunkt des Motors ab, im Wesentlichen von der Drehzahl, aber auch von der Füllung. Mit der Möglichkeit, die Saugrohrgeometrie während des Fahrbetriebs beispielsweise durch eine variable Saugrohrlänge zu ändern, kann die gasdynamische Aufladung in einem weiten Betriebsbereich für eine Steigerung der maximalen Füllung herangezogen werden.

Eine weitere Erhöhung der Luftdichte erzielen mechanisch angetriebene Verdichter bei der mechanischen Aufladung, welche von der Kurbelwelle des Motors angetrieben werden. Die komprimierte Luft wird dabei durch das Ansaugsystem, welches dann zugunsten eines schnellen Ansprechverhaltens des Motors mit kleinem Sammlervolumen und kurzen Saugrohrängen ausgeführt wird, in die Zylinder gepumpt.

Bei der Abgasturboaufladung wird im Unterschied zur mechanischen Aufladung der Verdichter des Abgasturboladers nicht von der Kurbelwelle angetrieben, sondern von einer Abgasturbine, welche sich im Abgasstrakt befindet und die Enthalpie des Abgases ausnutzt. Die Enthalpie des Abgases kann zusätzlich erhöht werden, in dem durch die Anwendung einer Ventilüberschneidung ein

Teil der Frischladung durch die Zylinder gespült (Scavenging) und damit der Massenstrom an der Abgasturbine erhöht wird. Zusätzlich sorgt eine hohe Spülrate für niedrige Restgasanteile. Da bei Motoren mit Abgasturboaufladung im unteren Drehzahlbereich an der Volllast ein positives Druckgefälle über dem Zylinder gut eingestellt werden kann, erhöht dieses Verfahren wesentlich das maximale Drehmoment in diesem Betriebsbereich (Low-End-Torque).

Füllungserfassung und Gemischregelung

Beim Ottomotor wird die zugeführte Kraftstoffmenge in Abhängigkeit der angesaugten Luftmasse eingestellt. Dies ist nötig, weil sich nach einer Änderung des Drosselklappenwinkels die Luftfüllung erst allmählich ändert, während die Kraftstoffmenge arbeitspielindividuell variiert werden kann. In der Motorsteuerung muss daher für jedes Arbeitsspiel je nach der Betriebsart (Homogen, Homogen-mager, Schichtbetrieb) die aktuell vorhandene Luftmasse bestimmt werden (durch Füllungserfassung). Es gibt grundsätzlich drei Verfahren, mit welchen dies erfolgen kann. Das erste Verfahren arbeitet folgendermaßen: Über ein Kennfeld wird in Abhängigkeit von Drosselklappenwinkel α und Drehzahl n der Volumenstrom bestimmt, der über geeignete Korrekturen in einem Luftmassenstrom umgerechnet wird. Die auf diesem Prinzip arbeitenden Systeme heißen α - n -Systeme.

Beim zweiten Verfahren wird über ein Modell (Drosselklappenmodell) aus der Temperatur vor der Drosselklappe, dem Druck vor und nach der Drosselklappe sowie der Drosselklappenstellung (Winkel α) der Luftmassenstrom berechnet. Als Erweiterung dieses Modells kann zusätzlich aus der Motordrehzahl n , dem Druck p im Saugrohr (vor dem Einlassventil), der Temperatur im Einlasskanal und weiteren Einflüssen

(Nockenwellen- und Ventilhubverstellung, Saugrohrumschaltung, Position der Ladebewegungsclappe) die vom Zylinder angesaugte Frischluft berechnet werden. Nach diesem Prinzip arbeitende Systeme werden *p-n*-Systeme genannt. Je nach Komplexität des Motors, insbesondere die Variabilitäten des Ventiltriebs betreffend, können hierfür aufwendige Modelle notwendig sein. Das dritte Verfahren besteht darin, dass ein Heißfilm-Luftmassenmesser (HFM) direkt den in das Saugrohr einströmenden Luftmassenstrom misst. Weil mittels eines Heißfilm-Luftmassenmessers oder eines Drosselklappenmodells nur der in das Saugrohr einfließende Massenstrom bestimmt werden kann, liefern diese beiden Systeme nur im stationären Motorbetrieb einen gültigen Wert für die Zylinderfüllung. Ein stationärer Betrieb setzt die Annahme eines konstanten Saugrohrdrucks voraus, so dass die dem Saugrohr zufließenden und den Motor verlassenden Luftmassenströme identisch sind.

Die Anwendung sowohl des Heißfilm-Luftmassenmessers als auch des Drosselklappenmodells liefert bei einem plötzlichen Lastwechsel (d. h. bei einer plötzlichen Änderung des Drosselklappenwinkels) eine augenblickliche Änderung des dem Saugrohr zufließenden Massenstroms, während sich der in den Zylinder eintretende Massenstrom und damit die Zylinderfüllung erst ändern, wenn sich der Saugrohrdruck erhöht oder erniedrigt hat. Daher muss für die richtige Abbildung transienter Vorgänge entweder das *p-n*-System verwendet oder eine zusätzliche Modellierung des Speicherverhaltens im Saugrohr (Saugrohrmodell) erfolgen.

Kraftstoffe

Für den ottomotorischen Betrieb werden Kraftstoffe benötigt, welche aufgrund ihrer Zusammensetzung eine niedrige Neigung zur Selbstzündung (hohe Klopfestigkeit) aufweisen. Andernfalls kann die während

Tabelle 1
Eigenschaftswerte flüssiger Kraftstoffe.
Die Viskosität bei 20 °C liegt für Benzin bei etwa 0,6 mm²/s, für Methanol bei etwa 0,75 mm²/s, für Ethanol bei etwa 1,5 mm²/s.

Stoff	Dichte in kg/l	Haupt- bestand- teile in Gewichts- prozent	Siedetempe- ratur in °C	Spezifische Verdamp- fungswärme in kJ/kg	Spezifischer Heizwert in MJ/kg	Zündtempe- ratur in °C	Luftbedarf, stöchio- metrisch in kg/kg	Zündgrenze	
								untere	obere
								in Volumenprozent Gas in Luft	
Ottokraft- stoff									
Normal	0,720...0,775	86 C, 14 H	25...210	380...500	41,2...41,9	≈ 300	14,8	≈ 0,6	≈ 8
Super	0,720...0,775	86 C, 14 H	25...210	–	40,1...41,6	≈ 400	14,7	–	–
Flugbenzin	0,720	85 C, 15 H	40...180	–	43,5	≈ 500	–	≈ 0,7	≈ 8
Kerosin	0,77...0,83	87 C, 13 H	170...260	–	43	≈ 250	14,5	≈ 0,6	≈ 7,5
Dieselskraft- stoff	0,820...0,845	86 C, 14 H	180...360	≈ 250	42,9...43,1	≈ 250	14,5	≈ 0,6	≈ 7,5
Ethanol C ₂ H ₅ OH	0,79	52 C, 13 H, 35 O	78	904	26,8	420	9	3,5	15
Methanol CH ₃ OH	0,79	38 C, 12 H, 50 O	65	1 110	19,7	450	6,4	5,5	26
Rapsöl	0,92	78 C, 12 H, 10 O	–	–	38	≈ 300	12,4	–	–
Rapsölme- thylester (Biodiesel)	0,88	77 C, 12 H, 11 O	320...360	–	36,5	283	12,8	–	–