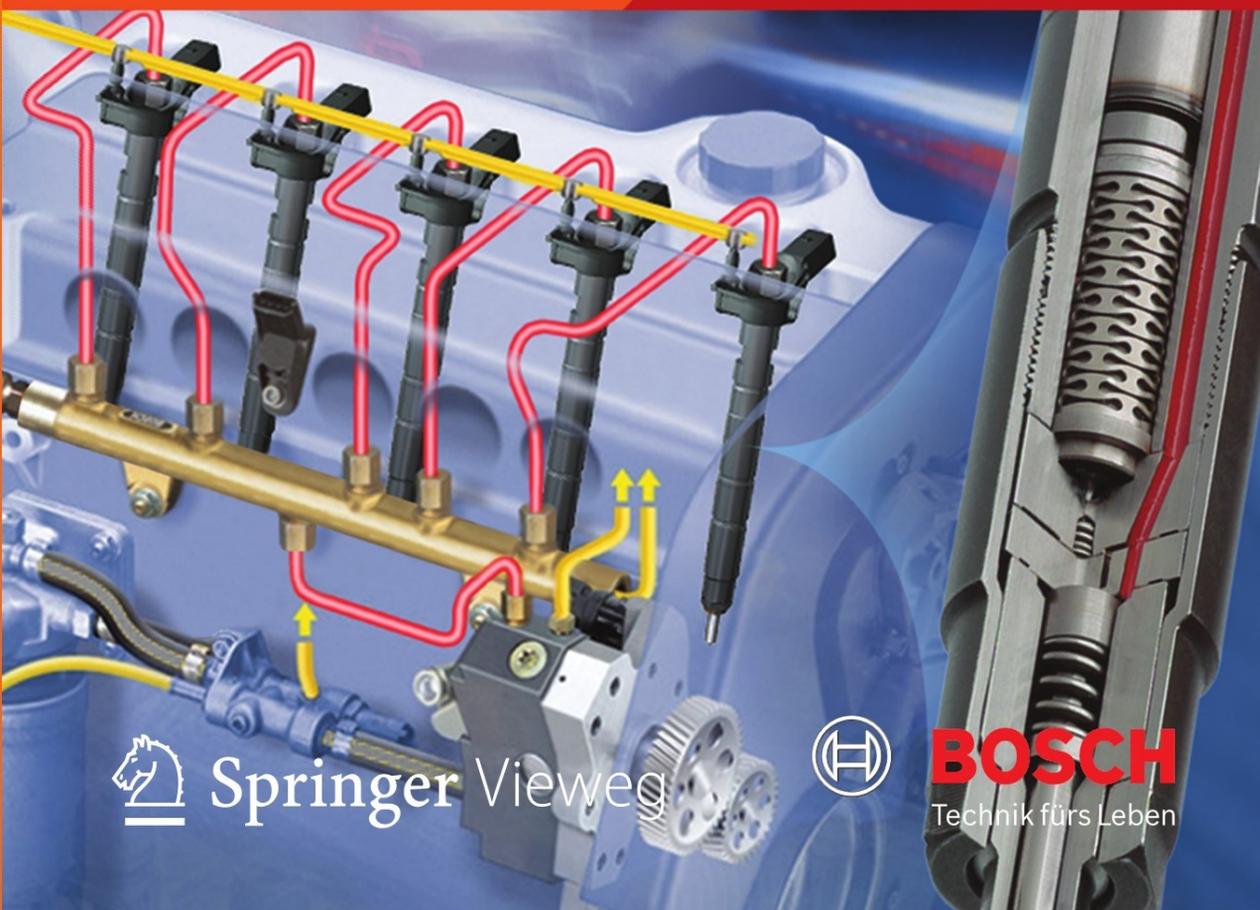


Konrad Reif (Hrsg.)

Dieselmotor- Management

Systeme, Komponenten, Steuerung und Regelung
5. Auflage

Bosch Fachinformation Automobil



Springer Vieweg



BOSCH
Technik fürs Leben

Dieselmotor-Management

Konrad Reif (Hrsg.)

Dieselmotor-Management

Systeme, Komponenten, Steuerung
und Regelung

5., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 566 Abbildungen und 18 Tabellen

Bosch Fachinformation Automobil

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Konrad Reif

Duale Hochschule Baden-Württemberg

Ravensburg, Campus Friedrichshafen

Studiengangsleiter

Fahrzeugelektronik und Mechatronische Systeme

konrad.reif@gmx.net

www.bosch-fachinformation-automobil.springer-vieweg.de

ISBN 978-3-8348-1715-0

ISBN 978-3-8348-2179-9 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-8348-2179-9

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

© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden 1998, 2002, 2004, 2012

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.

Einbandentwurf: KünkelLopka GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.springer-vieweg.de



Das vorliegende Buch *Dieselmotor-Management* enthält eine umfassende Darstellung der Steuerung und Regelung von Dieselmotoren. Wichtige Themen sind dabei nicht nur Einspritztechnik und Motorsteuerung, sondern auch Kraftstoffversorgung, Starthilfesysteme, Drehzahlregelung, Emissionsminderung und Abgasnachbehandlung. Wesentliche Komponenten wie Pumpen, Düsen, Hochdruckverbindungen, Steuergeräte und Sensoren sowie deren Funktionsweise und Zusammenspiel werden ausführlich erklärt. Es werden sowohl die klassischen Einspritzsysteme mit Reihen- oder Verteilereinspritzpumpen als auch die modernen Einspritzsysteme mit Common Rail oder Unit Injector behandelt. Ferner werden übergreifende Themen wie Abgasgesetzgebung, Abgasmesstechnik, Diagnose und Werkstatt-Technik erläutert.

In der hier vorliegenden 5. Auflage wurde das Kapitel über Dieselmotorkraftstoffe aktualisiert und ergänzt, insbesondere der Abschnitt über alternative Kraftstoffe wurde wesentlich erweitert. Das Kapitel über Füllungssteuerung wurde um die Biturbo-Aufladung und die HC-Falle ergänzt. Wesentlich überarbeitet wurde das Kapitel zum Niederdruckteil der Kraftstoffversorgung, wobei verschiedene Pumpentypen, das Rücklaufsystem und die Kraftstoffverteilung für das Unit Injector System und die Tankeinbaueinheit berücksichtigt wurden. Aktualisiert wurden auch die Kapitel über das Common Rail System, das Unit Injector System und das Unit Pump System. Im Kapitel über die Abgasnachbehandlung wurden die Themen SCR-System und Partikelfilter überarbeitet.

Der Schwerpunkt im vorliegenden Buch liegt bei den modernen Systemen. Für eine ausführliche Behandlung der mechanischen und elektronischen Regler für Reihen- und Verteilereinspritzpumpen wird auf das Buch „Klassische Diesel-Einspritzsysteme“ aus der gleichen Buchreihe verwiesen.

Außerdem soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass Teile dieses Buches in stark verkürzter Form in zwei broschiierten Büchern aus derselben Reihe erhältlich sind. Dies ist der Band „Dieselmotor-Management im Überblick“, in dem das Wichtigste zum Thema Dieselmotor-Management kurz und bündig beschrieben wird und der Band „Moderne Diesel-Einspritzsysteme“, der sich auf die Einspritzsysteme mit Common Rail, Unit Injector und Unit Pump konzentriert.

Das vorliegende Buch wendet sich in erster Linie an Ingenieure in der Motoren- und Fahrzeugentwicklung, Kfz-Meister und Kfz-Techniker sowie an Studenten der Fahrzeug- und Motorentechnik. Es ist aber auch für Gutachter und Sachverständige und für Elektroingenieure und Software-Entwickler in der Automobil- und Zulieferindustrie sehr gut geeignet, um sich einen Einblick in die Steuerung und Regelung der Dieselmotoren zu verschaffen.

Ohne die außerordentliche Unterstützung vieler hätte diese 5. Auflage nicht entstehen können. Für fachliche Diskussion und Unterstützung, vor allem während der Endphase der Bucherstellung, danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. S. Engelking und Frau Dipl.-Ing. A. Horozovic. Ferner danke ich auch allen Lesern, die uns wertvolle Hinweise für Korrekturen gegeben haben.

Inhaltsverzeichnis

Geschichte des Dieselmotors	14
Rudolf Diesel	15
Gemischbildung der ersten Dieselmotoren	16
Einsatz der ersten Fahrzeug-Dieselmotoren	17
Bosch-Dieseinspritzung	20
Einsatzgebiete der Dieselmotoren	24
Eigenschaftskriterien	24
Anwendungen	24
Motor kenndaten	27
Grundlagen des Dieselmotors	28
Arbeitsweise	28
Drehmoment und Leistung	31
Motorwirkungsgrad	32
Betriebszustände	35
Betriebsbedingungen	38
Einspritzsystem	41
Brennräume	42
Kraftstoffe	46
Diesekraftstoff	46
Alternative Kraftstoffe	52
Systeme zur Füllungssteuerung	56
Übersicht	56
Aufladung	57
Drallklappen	66
Motoransaugluftfilter	67
Grundlagen der Dieseleinspritzung	70
Gemischverteilung	70
Parameter der Einspritzung	72
Düsen- und Düsenhalter-Ausführung	81
Diesel-Einspritzsysteme im Überblick	82
Bauarten	82
Kraftstoffversorgung Niederdruckteil	88
Übersicht	88
Kraftstoffpumpe	90
Kraftstofffilter	95
Kraftstoffrücklauf und Kraftstoffverteilung beim Unit Injector System	100
Kraftstoffbehälter, Kraftstoffleitungen und Tankeinbaueinheit	102
Zusatzventile für Reiheneinspritzpumpen	104

Systemübersicht der Reiheneinspritzpumpen	106
Anwendungsgebiete	106
Ausführungen	106
Aufbau	107
Regelung	107
Vorförderpumpen für Reiheneinspritzpumpen	110
Anwendung	110
Aufbau und Arbeitsweise	111
Handpumpen	113
Vorreiniger	113
Falltankbetrieb	113
Standard-Reiheneinspritzpumpen PE	114
Einbau und Antrieb	115
Aufbau und Arbeitsweise	115
Ausführungen	124
Reiheneinspritzpumpen PE für andere Kraftstoffe	134
Betrieb der Reiheneinspritzpumpen	135
Regler für Reiheneinspritzpumpen	136
Steuerung und Regelung	136
Einwirkung des Reglers	138
Definitionen	138
P-Grad des Reglers	139
Aufgaben des Reglers	140
Reglerarten	143
Reglerübersicht	148
Spritzversteller	154
Elektrisches Stellwerk	156
Hubschieber-Reiheneinspritzpumpen	158
Aufbau und Arbeitsweise	159
Systemübersicht der Verteilereinspritzpumpen	162
Anwendungsgebiete	162
Ausführungen	162
Kantengesteuerte Systeme	164
Magnetventilgesteuerte Systeme	166
Kantengesteuerte Verteilereinspritzpumpen	170
Einsatzbereiche und Einbau	171
Aufbau	173
Niederdruckteil	176
Hochdruckpumpe mit Verteiler	179
Aufschaltgruppen für Verteilereinspritzpumpen	188
Übersicht	188
Drehzahlregler	190
Spritzversteller	197

Mechanische Anpassvorrichtungen	200
Lastinformation	213
Fördersignalsensor	214
Abstellvorrichtungen	215
Elektronische Dieselregelung	216
Diesel-Diebstahl-Schutz	219
Magnetventilgesteuerte Verteilereinspritzpumpen	220
Einsatzbereiche	220
Bauformen	220
Einbau und Antrieb	222
Aufbau und Arbeitsweise	224
Niederdruckteil	226
Hochdruckteil der Axialkolben-Verteilereinspritzpumpe	228
Hochdruckteil der Radialkolben-Verteilereinspritzpumpe	232
Druckventile	236
Hochdruckmagnetventil	238
Spritzverstellung	240
Steuergerät	246
Zusammenfassung	247
Systemübersicht der Einzelzylinder-Systeme	248
Einzeleinspritzpumpen PF	248
Unit Injector System UIS und Unit Pump System UPS	250
Systembild UIS für Pkw	252
Systembild UIS/UPS für Nkw	254
Einzeleinspritzpumpen PF	256
Aufbau und Arbeitsweise	256
Baugrößen	258
Unit Injector System UIS	260
Einbau und Antrieb	260
Aufbau	261
Arbeitsweise des UI für Pkw	264
Arbeitsweise des UI für Nkw	267
Hochdruckmagnetventil	269
Unit Pump System UPS	272
Einbau und Antrieb	272
Aufbau	272
Stromgeregelte Einspritzverlaufsformung CCRS	274
Systemübersicht Common Rail	276
Anwendungsgebiete	276
Aufbau	277
Arbeitsweise	278
Common Rail System für Pkw	282
Common Rail System für Nkw	287

Hochdruckkomponenten des Common Rail Systems	290
Übersicht	290
Injektor	292
Hochdruckpumpen	303
Rail (Hochdruckspeicher)	312
Hochdrucksensoren	313
Druckregelventil	314
Druckbegrenzungsventil	315
Einspritzdüsen	316
Zapfendüsen	318
Lochdüsen	320
Weiterentwicklung der Düse	324
Düsenhalter	326
Übersicht	326
Standard-Düsenhalter	328
Stufenhalter	329
Zweifeder-Düsenhalter	330
Düsenhalter mit Nadelbewegungssensor	331
Hochdruckverbindungen	332
Hochdruckanschlüsse	332
Hochdruck-Kraftstoffleitungen	333
Starthilfesysteme	336
Übersicht	336
Glühsysteme	337
Innere motorische Emissionsminderung	342
Brennverfahren	343
Weitere Einflüsse auf die Schadstoffemission	345
Entwicklung homogener Brennverfahren	347
Dieseleinspritzung	348
Abgasrückführung	360
Kurbelgehäuseentlüftung	363
Abgasnachbehandlung	364
NO _x -Speicherkatalysator	365
Selektive katalytische Reduktion von Stickoxiden	368
Partikelfilter DPF	374
Diesel-Oxidationskatalysator	382
Elektronische Dieselregelung EDC	384
Systemübersicht	384
Reiheneinspritzpumpen	387
Kantengesteuerte Axialkolben-Verteilereinspritzpumpen	388
Magnetventilgesteuerte Axial- und Radialkolben-Verteilereinspritzpumpen	389
Unit Injector System UIS für Pkw	390
Unit Injector System UIS und Unit Pump System UPS für Nkw	391

Common Rail System für Pkw	392
Common Rail System für Nkw	393
Datenverarbeitung	394
Regelung der Einspritzung	396
Zusätzliche Sonderanpassungen	407
Lambda-Regelung für Pkw-Dieselmotoren	408
Momentengeführte EDC-Systeme	413
Regelung und Ansteuerung von Aktoren	416
Ersatzfunktionen	417
Datenaustausch mit anderen Systemen	418
Serielle Datenübertragung mit CAN	419
Applikation Pkw-Motoren	424
Applikation Nkw-Motoren	428
Applikationstools	433
Steuergerät	436
Einsatzbedingungen	436
Aufbau	436
Datenverarbeitung	436
Sensoren	442
Einsatz im Kraftfahrzeug	442
Temperatursensoren	443
Mikromechanische Drucksensoren	444
Hochdrucksensoren	447
Induktive Motordrehzahlsensoren	448
Drehzahlsensoren und inkrementale Drehwinkelsensoren	449
Hall-Phasensensoren	450
Fahrpedalsensoren	452
Heißfilm-Luftmassenmesser HFM5	454
Planare Breitband-Lambda-Sonde LSU4	456
Halb-Differenzial-Kurzschlussringsensoren	458
Tankfüllstandsensor	459
Diagnose	460
Überwachung im Fahrbetrieb (On-Board-Diagnose)	460
On Board Diagnostic System für Pkw und leichte Nkw	463
On Board Diagnostic System für schwere Nkw	470
Werkstatt-Technik	472
Werkstattgeschäft	472
Diagnose in der Werkstatt	476
Prüf- und Testgeräte	478
Einspritzpumpen-Prüfstände	480
Prüfung von Reiheneinspritzpumpen	482
Prüfung von kantengesteuerten Verteilereinspritzpumpen	486
Düsenprüfung	490
Abgasemission	492
Übersicht	492
Hauptbestandteile	492
Nebenbestandteile (Schadstoffe)	494

Abgasgesetzgebung	496
Übersicht	496
CARB-Gesetzgebung (Pkw/LDT)	498
EPA-Gesetzgebung (Pkw/LDT)	502
EU-Gesetzgebung (Pkw/LDT)	504
Japan-Gesetzgebung (Pkw/LDT)	506
USA-Gesetzgebung (schwere Nkw)	507
EU-Gesetzgebung (schwere Nkw)	508
Japan-Gesetzgebung (schwere Nkw)	510
USA-Testzyklen für Pkw und LDT	511
Europäischer Testzyklus für Pkw und LDT	513
Japan-Testzyklus für Pkw und LDT	513
Testzyklen für schwere Nkw	514
Abgas-Messtechnik	516
Abgasprüfung für die Typzulassung	516
Abgas-Messgeräte	519
Abgasmessung in der Motoren-Entwicklung	521
Abgasuntersuchung (Trübungsmessung)	523
Sachwortverzeichnis	524

Autorenverzeichnis

Dipl.-Ing. Andreas Binder,
Dipl.-Ing. Markus Gesk,
Dipl.-Ing. Andreas Glaser
(Gemischbildung);

Dipl.-Ing. (FH) Hermann Grieshaber,
Dipl.-Ing. Joachim Lackner,
Dr.-Ing. Herbert Schumacher
(Einsatzgebiete der Dieselmotoren);

Dipl.-Ing. (FH) Hermann Grieshaber,
Dr.-Ing. Thorsten Raatz
(Grundlagen des Dieselmotors);

Dr. rer. nat. Jörg Ullmann
(Kraftstoffe, Dieseldieselkraftstoffe);

Dipl.-Ing. (FH) Thorsten Allgeier,
Dr. rer. nat. Jörg Ullmann
(Kraftstoffe, Alternative Kraftstoffe);

Dr.-Ing. Michael Durst
(Filterwerk Mann + Hummel, Ludwigsburg),
Dipl.-Betriebsw. Meike Keller,
Dr.-Ing. Thomas Wintrich
(Systeme zur Füllungssteuerung);

Dr.-Ing. Stefan Münz
(Bosch Mahle Turbo Systems
GmbH & Co. KG, Stuttgart)
(Aufladegeräte);

Dipl.-Ing. (FH) Hermann Grieshaber,
Dipl.-Ing. Jens Olaf Stein
(Grundlagen der Dieseleinspritzung);

Dipl.-Ing. (FH) Rolf Ebert,
Dipl.-Betriebsw. Meike Keller,
Dr.-Ing. Gunnar-Marcel Klein
(Filterwerk Mann + Hummel, Ludwigsburg),
Dr.-Ing. Ulrich Projahn
(Kraftstoffversorgung Niederdruckteil);

Henri Bruognolo,
Dr.-Ing. Ernst Ritter
(Systemübersicht der Reiheneinspritzpumpen
und ihre Regler);

Dipl.-Ing. (FH) Helmut Simon
(Kantengesteuerte Verteilereinspritzpumpen
und ihre Aufschaltgruppen);

Dipl.-Ing. Johannes Feger,
Dr. rer. nat. Dietmar Ottenbacher
(Magnetventilgesteuerte
Verteilereinspritzpumpen);

Dr. techn. Theodor Stipek
(Einzeleinspritzpumpen);

Dipl.-Ing. (HU) Carlos Alvarez-Avila,
Dipl.-Ing. Guilherme Bittencourt,
Dr. rer. nat. Carlos Blasco Remacha,
Dr.-Ing. Günter Driedger,
Dipl.-Ing. Stefan Eymann,
Dipl.-Ing. Alessandro Fauda,
Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Matthias Hickl,
Dipl.-Ing. (FH) Andreas Hirt,
Dipl.-Ing. (FH) Guido Kampa,
Dipl.-Betriebsw. Meike Keller,
Dr. rer. nat. Walter Lehle,
Dipl.-Ing. Rainer Merkle,
Dipl.-Ing. Roger Potschin,
Dr.-Ing. Ulrich Projahn,
Dr. rer. nat. Andreas Rebmann,
Dipl.-Ing. Walter Reinisch,
Dipl.-Ing. Nestor Rodriguez-Amaya,
Dipl.-Ing. Friedemann Weber,
Dipl.-Ing. (FH) Willi Weippert,
Dipl.-Ing. Ralf Wurm
(Diesel-Einspritzsysteme Unit Injector und
Unit Pump Systeme)

Dipl.-Ing. Werner Brühmann,
Dipl.-Inform. Michael Heinzelmann,
Dr. techn. David Holzer,
Dipl.-Ing. Thilo Klam,
Dipl.-Ing. (FH) Andreas Koch,
Dipl.-Ing. Felix Landhäußer,
Dr.-Ing. Patrick Mattes,
Dr.-Ing. Ulrich Projahn,
Dipl.-Ing. (FH) Andreas Rettich,
Ing. Helmut Sattmann,
Dipl.-Ing. Sandro Soccol,
Ing. Herbert Strahberger,
Dr.-Ing. Ralf Wirth
(Common Rail System);

Dirk Dörhöfer,
Dipl.-Ing. Sandro Soccol
(Hochdruckpumpen);

Ing. Helmut Sattmann,
Ing. Herbert Strahberger
(Rail und Anbaukomponenten);

Dipl.-Ing. Klaus Ortner,
Ing. grad. Peter Schelhas
(Kraftstoffpumpen);

Dr.-Ing. Juan Luis Hernández Carabias
(Kraftstofffilter);

Dr.-Ing. Patrick Mattes
(Piezo-Inline-Injektor);

Dr. techn. David Holzer,
Dipl.-Ing. Thilo Klam,
Dipl.-Ing. (FH) Andreas Koch,
Dipl.-Ing. (FH) Andreas Rettich
(Magnetventil-Injektoren);

Dipl.-Ing. Thomas Kügler
(Einspritzdüsen und Düsenhalter);

Kurt Sprenger
(Hochdruckverbindungen);

Dr. rer. nat. Wolfgang Dreßler
(Starthilfesysteme);

Dipl.-Ing. Jens Olaf Stein
(Innermotorische Emissionsminderung);

Dr. rer. nat. Norbert Breuer,
Dr. rer. nat. Thomas Hauber,
Priv.-Doz. Dr.-Ing. Johannes K. Schaller,
Dr. Ralf Schernewski,
Dipl.-Ing. Stefan Stein,
Dr.-Ing. Ralf Wirth
(Abgasnachbehandlung);

Dipl.-Ing. Johannes Feger,
Dipl.-Ing. Lutz-Martin Fink,
Dipl.-Ing. Wolfram Gerwing,
Dipl.-Ing. (BA) Klaus Grabmaier,
Dipl.-Ing. Martin Grosser,

Dipl.-Inform. Michael Heinzlmann,
Dipl.-Math. techn. Bernd Illg,
Dipl.-Ing. (FH) Joachim Kurz,
Dipl.-Ing. Felix Landhäußer,
Dipl.-Ing. (FH) Mikel Lorente Susaeta,
Dipl.-Ing. Rainer Mayer,
Dr.-Ing. Andreas Michalske,
Dr. rer. nat. Dietmar Ottenbacher,
Dr. Ing. Michael Walther,
Dipl.-Ing. (FH) Andreas Werner,
Dipl.-Ing. Jens Wiesner
(Elektronische Dieselregelung);

Dipl.-Ing. Joachim Berger
(Sensoren);

Dr.-Ing. Günter Driedger,
Rainer Heinzmann,
Dr. rer. nat. Walter Lehle,
Dipl.-Ing. Wolfgang Schauer
(Diagnose);

Hans Binder,
Rainer Heinzmann,
Günter Mauderer,
Dipl.-Ing. Rainer Rehage,
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Stephan Sohnle,
Rolf Wörner
(Werkstatt-Technik);

Dr.-Ing. Stefan Becher,
Dr.-Ing. Torsten Eggert
(Abgasgesetzgebung);

Dipl.-Ing. Bernd Hinner,
Dipl.-Ing. Andreas Kreh,
Dipl.-Ing. Rainer Pelka
(Abgas-Messtechnik);

Dr.-Ing. Michael Durst
(Filterwerk Mann + Hummel, Ludwigsburg)
(Luftfiltration).

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

Geschichte des Dieselmotors

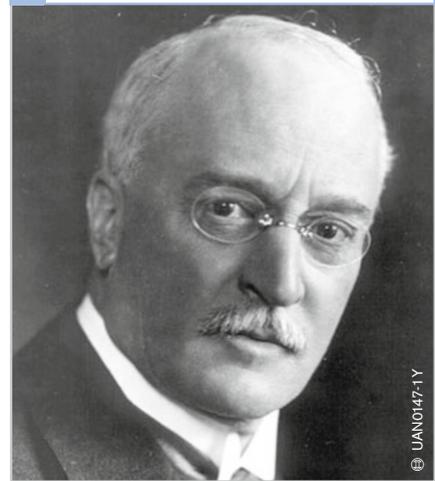
Bereits im Jahr 1863 unternahm der Franzose Etienne Lenoir eine Versuchsfahrt mit einem Fahrzeug, das von einer von ihm entwickelten Gasmachine angetrieben wurde. Dieser Antrieb erwies sich aber als untauglich für den Einbau und Antrieb von Fahrzeugen. Erst mit Nikolaus August Ottos Viertaktmotor mit Magnetzündung war der Betrieb mit flüssigem Kraftstoff und somit der mobile Einsatz möglich. Der Wirkungsgrad dieser Motoren war allerdings gering. Die Leistung des Rudolf Diesel bestand darin, einen Motor mit vergleichsweise sehr viel höherem Wirkungsgrad theoretisch zu entwickeln und seine Idee bis zur Serienreife zu verfolgen.

Rudolf Diesel baute 1897 in Zusammenarbeit mit der Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg (MAN) den ersten funktionierenden Prototypen eines Verbrennungsmotors, der mit billigem Schweröl betrieben werden konnte. Das Gewicht dieses ersten Dieselmotors betrug allerdings rund 4,5 Tonnen bei einer Höhe von drei Metern. Deshalb war an einen Einsatz dieses Motors für Landfahrzeuge vorerst noch nicht zu denken.

„Es ist meine feste Überzeugung, dass der Automobilmotor kommen wird, und dann betrachte ich meine Lebensaufgabe als beendet.“
(Zitat von Rudolf Diesel kurz vor seinem Tod)

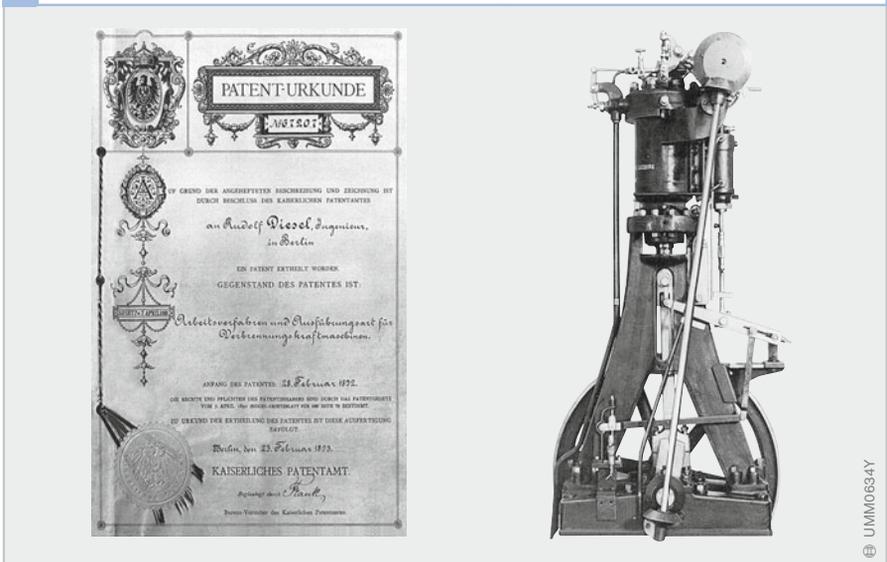
Mit weiteren Verbesserungen im Bereich der Einspritzung und Gemischbildung setzte sich Diesels Erfindung aber bald durch und es gab für Schiffs- und Stationärmotoren keine Alternativen mehr.

2 Rudolf Diesel



© UAN0147-1Y

1 Patenturkunde für den Dieselmotor und dessen erste Ausführung aus dem Jahr 1894



© UMM063-4Y

Rudolf Diesel

Rudolf Diesel (1858–1913), gebürtig aus Paris, fasste mit 14 Jahren den Entschluss, Ingenieur zu werden. Er schloss sein Examen am Polytechnikum München als Bester der bis dahin Examinierten ab.

Idee eines neuen Motors

Die Idee Diesels war, eine Maschine mit einem wesentlich höheren Wirkungsgrad gegenüber der damals populären Dampfmaschine zu konstruieren. Eine Maschine, die sich am isothermischen Kreisprozess orientiert, sollte nach der Theorie des französischen Physiker Sadi Carnot mit einem hohen Wirkungsgrad von über 90 % betrieben werden können.

Diesel entwickelte seinen Motor zunächst auf dem Papier, basierend auf Carnots Vorlagen. Sein Ziel war, einen leistungsstarken Motor bei vergleichsweise kleinen Abmessungen zu entwerfen. Von der Funktion und der Leistungsfähigkeit seines Motors war Diesel absolut überzeugt.

Diesels Patent

Diesel schloss seine theoretischen Studien 1890 ab und meldet am 27. Februar 1892 beim Kaiserlichen Patentamt zu Berlin ein Patent auf „Neue rationelle Wärmekraftmaschinen“ an. Am 23. Februar 1893 erhielt er die Patenturkunde DRP 67207 mit dem Titel „Arbeitsverfahren und Ausführungsart für Verbrennungsmaschinen“, datiert auf den 28. Februar 1892.

Diesen neuen Motor gab es zunächst nur in der Theorie. Die Richtigkeit von Diesels Berechnungen wurde mehrfach bestätigt, an der technischen Realisierbarkeit bestanden bei den Motorenherstellern jedoch Zweifel.

Realisierung des Motors

Die im Motorbau erfahrenen Firmen wie die Gasmotoren-Fabrik Deutz AG schreckten vor dem Diesel-Projekt zurück. Die erforderlichen Kompressionsdrücke von 250 bar lagen jenseits dessen, was technisch realisierbar erschien. Nach langem Bemühen kam es

schließlich 1893 zu einer Zusammenarbeit zwischen Diesel und der Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg (MAN). Der abgeschlossene Vertrag enthielt allerdings Konzessionen Diesels an den Idealmotor. Der Höchstdruck wurde von 250 auf 90 bar, später dann auf 30 bar gesenkt. Diese aus mechanischen Gründen erforderliche Absenkung des Drucks beeinträchtigte natürlich die Zündfähigkeit beträchtlich. Der von Diesel zunächst vorgesehene Kohlestaub als Kraftstoff wurde allerdings verworfen.

Schließlich begann man im Frühjahr 1893, den ersten, ungekühlten Versuchsmotor zu bauen. Als Kraftstoff war zunächst Petroleum vorgesehen. Man verwendete aber Benzin, weil man der Meinung war, dass sich dieser Kraftstoff leichter selbst entzündet (das war ein Irrtum). Das Prinzip der Selbstzündung – d. h. Einspritzen des Kraftstoffs in die während der Kompression hoch verdichtete und erwärmte Verbrennungsluft – wurde bei diesem Motor bestätigt.

Beim zweiten Versuchsmotor wurde der Kraftstoff nicht direkt, sondern mithilfe von Druckluft eingespritzt und zerstäubt. Zudem erhielt er eine Wasserkühlung.

Doch erst mit dem dritten Versuchsmotor – einer Neukonstruktion mit einer einstufigen Luftpumpe zur Drucklufteinblasung – gelang der Durchbruch. Am 17. Februar 1897 führte Prof. Moritz Schröder von der Technischen Hochschule München die Abnahmeversuche durch. Die Messergebnisse bestätigten den für eine Verbrennungskraftmaschine seinerzeit hohen Wirkungsgrad von 26,2 %.

Patentstreitigkeiten und Auseinandersetzungen mit dem Diesel-Konsortium hinsichtlich der Entwicklungsstrategie sowie Misserfolge beanspruchten die geistigen und körperlichen Kräfte des genialen Erfinders. Vermutlich stürzte er sich auf einer Kanalüberfahrt nach England am 29. September 1913 in die Fluten.

Gemischbildung der ersten Dieselmotoren

Drucklufteinblasung

Rudolf Diesel hatte nicht die Möglichkeit, den Kraftstoff auf die für Strahlausbreitung, Strahlerfall und Tropfenbildung erforderlichen Drücke zu verdichten. Der erste Dieselmotor aus dem Jahr 1897 arbeitete deshalb mit Drucklufteinblasung, bei der der Kraftstoff mithilfe von Druckluft in den Zylinder eingebracht wurde. Dieses Verfahren wandte später auch Daimler für seine Lkw-Dieselmotoren an.

Das Einspritzventil besaß einen Anschluss für die Druckluft (Bild 1, Pos. 1) sowie einen Anschluss für die Kraftstoffzuführung (2). Ein Kompressor erzeugte die Druckluft, die in das Ventil einströmte. Bei geöffneter Einspritzdüse (3) riss die in den Brennraum einströmende Luft den Kraftstoff mit und erzeugte in dieser Zweiphasenströmung die für eine schnelle Tropfenverdampfung und damit für die Selbstentzündung erforderlichen feinen Tröpfchen.

Ein Nocken sorgte für die kurbelwellensynchrone Betätigung der Einspritzdüse. Die einzuspritzende Kraftstoffmenge wurde über den Kraftstoffdruck gesteuert. Da der Einspritz-

druck von der Druckluft erzeugt wurde, reichte als Kraftstoffdruck ein geringer Wert aus.

Das Problem bei diesem Verfahren war – aufgrund des niedrigen Drucks an der Einspritzdüse – die geringe Eindringtiefe des Luft-Kraftstoff-Gemischs in den Brennraum. Deshalb war diese Gemischbildung für höhere Einspritzmengen (höhere Motorlasten) und Drehzahlen nicht geeignet. Die eingeschränkte Strahlausbreitung verhinderte die zur Leistungssteigerung erforderliche Luftausnutzung und ergab mit zunehmender Einspritzmenge lokale Überfettungen mit drastischem Rauchanstieg. Die Verdampfungszeit der relativ großen Kraftstofftropfen ließ zudem eine nennenswerte Steigerung der Motordrehzahl nicht zu. Ein weiterer Nachteil dieses Motors war der enorme Platzbedarf des Kompressors. Trotzdem konnte dieses Prinzip damals in Lkw eingesetzt werden.

Vorkammermotor

Beim Benz-Diesel handelte es sich um einen Vorkammermotor. Bereits 1909 hatte Prosper L'Orange dieses Verfahren zum Patent angemeldet. Mit dem Vorkammerprinzip konnte auf die komplizierte und aufwändige Lufteinblasung verzichtet werden.

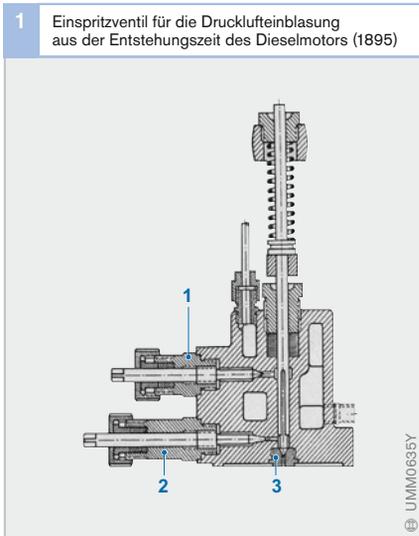


Bild 1

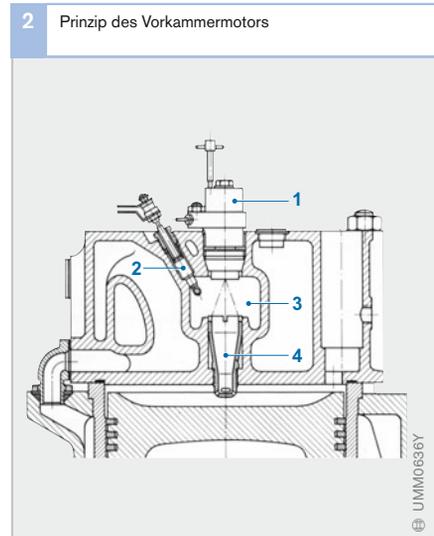
- 1 Druckluftzuführung
- 2 Kraftstoffzuführung
- 3 Einspritzdüse

Bild 2

(Bildquelle:

DaimlerChrysler)

- 1 Brennstoffventil
- 2 Glühspirale zum Anwärmen der Vorkammer
- 3 Vorkammer
- 4 Zündensatz



Die Gemischbildung im Hauptbrennraum dieses bis in die gegenwärtige Zeit angewandten Verfahrens wird durch eine Teilverbrennung in der Nebenkammer sichergestellt. Der Vorkammermotor verfügt über einen speziell geformten Verbrennungsraum, der einen halbkugelförmigen Kopf aufweist. Vorkammer und Brennraum sind über kleine Bohrungen miteinander verbunden. Das Volumen der Vorkammer beträgt ungefähr ein Fünftel des Kompressionsraums.

Die gesamte Kraftstoffmenge wird mit ca. 230 bis 250 bar in die Vorkammer eingespritzt. Wegen des begrenzten Luftangebots in der Vorkammer kann nur ein geringer Teil des Kraftstoffs verbrennen. Infolge der durch die Teilverbrennung bedingten Druckerhöhung in der Vorkammer wird der unverbrannte bzw. teilweise gecrackte Kraftstoff in den Hauptbrennraum gedrückt, wo er sich mit der Luft im Hauptbrennraum vermischt, entzündet und verbrennt.

Die Vorkammer hat hier die Aufgabe des Gemischbildners. Dieses Verfahren – auch als indirekte Einspritzung bezeichnet – hat sich schließlich durchgesetzt und so lange behauptet, bis die Entwicklung der Einspritztechnik die zur Gemischbildung im Hauptbrennraum erforderliche Einspritzdrücke lieferte.

Direkteinspritzung

Der erste Dieselmotor der Firma MAN arbeitete mit Direkteinspritzung, bei der der Kraftstoff über eine Einspritzdüse direkt in den Brennraum gelangt. Als Kraftstoff wurde ein sehr leichtes Öl eingesetzt, das von einem Kompressor in den Brennraum eingespritzt wurde. Durch den Kompressor waren die Abmessungen des Motors beträchtlich.

Im Nutzfahrzeugbereich tauchten direkt einspritzende Motoren wieder in den 1960er-Jahren auf und verdrängten langsam die Vorkammermotoren. Im Pkw-Sektor konnten sich die Vorkammermotoren wegen ihres geringeren Verbrennungsgeräusch bis in die 1990er-Jahre behaupten und wurden dann aber in kurzer Zeit vom Direkteinspritzer verdrängt.

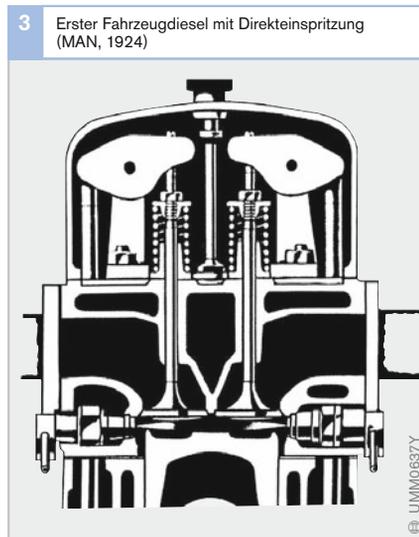
Einsatz der ersten Fahrzeug-Dieselmotoren

Dieselmotor in Nutzfahrzeugen

Die ersten Dieselmotoren waren aufgrund der hohen Zylinderdrücke große und schwere Aggregate und damit für den mobilen Einsatz in Fahrzeugen völlig ungeeignet. Erst Anfang der 1920er-Jahre konnten die ersten Dieselmotoren in Nutzfahrzeuge eingebaut werden.

Unterbrochen durch den Ersten Weltkrieg führte Prosper L'Orange – Vorstandsmitglied von Benz & Cie – die Entwicklungsarbeit am Dieselmotor weiter. Im Jahr 1923 wurden die ersten Dieselmotoren für Straßenfahrzeuge in Fünftonner-Lkw eingebaut. Diese Vierzylinder-Vorkammermotoren mit 8,8 l Hubraum leisteten 45...50 PS. Die erste Probefahrt mit dem Benz-Lkw fand am 10. September statt. Als Kraftstoff wurde Braunkohlenteeröl verwendet. Der Kraftstoffverbrauch lag gegenüber den Benzolmotoren um 25 % niedriger. Zudem kosteten Betriebsstoffe wie Braunkohlenteeröl weit weniger als das hoch besteuerte Benzol.

Bereits vor dem Ersten Weltkrieg beschäftigte sich auch die Firma Daimler mit der



4 Der stärkste Diesel-Lkw der Welt aus dem Jahr 1926 von MAN mit 150 PS (110 kW) für eine Nutzlast von 10 t



Weiterentwicklung des Dieselmotors. Nach Kriegsende wurde an Dieselmotoren für Nutzfahrzeuge gearbeitet. Fast zeitgleich mit dem Benz-Lkw konnte am 23. August 1923 die erste Versuchsfahrt stattfinden. Ende September 1923 führte eine weitere Versuchsfahrt vom Berliner Daimler-Werk nach Stuttgart und zurück.

Die ersten Lkw-Serienmodelle mit Dieselmotor waren 1924 auf der Automobilausstellung in Berlin zu sehen. Drei Hersteller waren mit jeweils unterschiedlichen Systemen vertreten, sie hatten die Diesel-Entwicklung mit eigenen Ideen vorangetrieben.

- Der Dieselmotor von Daimler mit Drucklufteinblasung,
- der Benz-Diesel mit Vorkammer,
- der Dieselmotor der Firma MAN mit Direkteinspritzung.

Im Laufe der Zeit wurden die Dieselmotoren immer leistungsfähiger. Die ersten Typen waren Vierzylinderaggregate mit einer Leistung von 40 PS. Bereits 1928 waren Motorleistungen von mehr als 60 PS keine Seltenheit mehr. Schließlich wurden für schwere Nutzfahrzeuge noch leistungsstärkere Motoren mit sechs und acht Zylindern gefertigt.

Im Jahr 1932 reichte das Leistungsspektrum bis 140 PS.

Der Durchbruch des Dieselmotors kam 1932 mit einem Lastwagenprogramm der Firma Daimler-Benz, die 1926 aus der Fusion der Automobilhersteller Daimler und Benz hervorging. Angeführt wurde dieses Programm vom Modell Lo2000 mit einer Nutzlast von 2 t und einem Gesamtgewicht von knapp 5 t. In ihm war der Vierzylindermotor OM59 mit 3,8 l Hubraum und 55 PS eingebaut. Das Programm reichte bis zum L5000 (Nutzlast 5 t, Gesamtgewicht 10,8 t). Alle Fahrzeuge waren auch mit Ottomotor gleicher Leistung lieferbar, der gegen den wirtschaftlichen Dieselmotor aber nicht bestehen konnte.

Bis heute hat der Dieselmotor im Nutzfahrzeugbereich weltweit aufgrund seiner Wirtschaftlichkeit seine dominierende Stellung beibehalten. Nahezu alle schweren Nutzfahrzeuge werden von einem Dieselmotor angetrieben. Dabei handelt es sich in Japan fast ausschließlich um großvolumige Saugmotoren. In den USA und Europa haben sich dagegen die hoch aufgeladenen Motoren mit Ladeluftkühlung durchgesetzt.

Dieselmotor in Pkw

Bis der Dieselmotor im Pkw Einzug halten konnte, sollten noch einige Jahre vergehen. 1936 war es so weit – der Mercedes 260D wurde mit einem Vierzylinder-Dieselmotor und einer Leistung von 45 PS ausgeliefert.

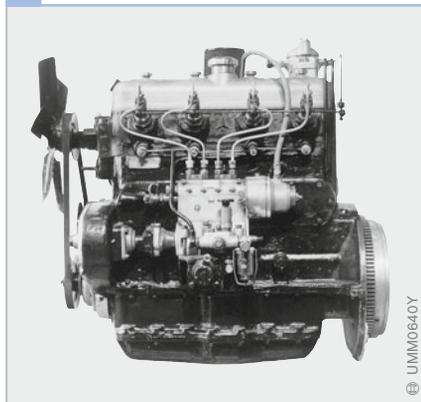
Als Antriebsaggregat für Pkw führte der Dieselmotor lange Zeit ein Schattendasein. Im Vergleich zum Ottomotor war er zu „lahm“. Erst in den 1990er-Jahren änderte sich das Erscheinungsbild. Mit der Abgas- turboaufladung und neuen Hochdruck-Einspritzsystemen ist der Dieselmotor dem Ottomotor mittlerweile gleichwertig. Leistung und Umweltverhalten sind vergleichbar. Da der Dieselmotor im Gegensatz zum Ottomotor nicht klopft, kann er auch im unteren Drehzahlbereich hoch aufgeladen werden, was ein hohes Drehmoment und sehr gutes Fahrverhalten bedingt. Ein weiteres Vorteil des Dieselmotors ist natürlich sein guter Wirkungsgrad. Das führt auch zu einer wachsenden Akzeptanz beim Autofahrer – in Europa ist mittlerweile rund jeder zweite neu zugelassene Pkw ein Diesel.

Weitere Einsatzgebiete

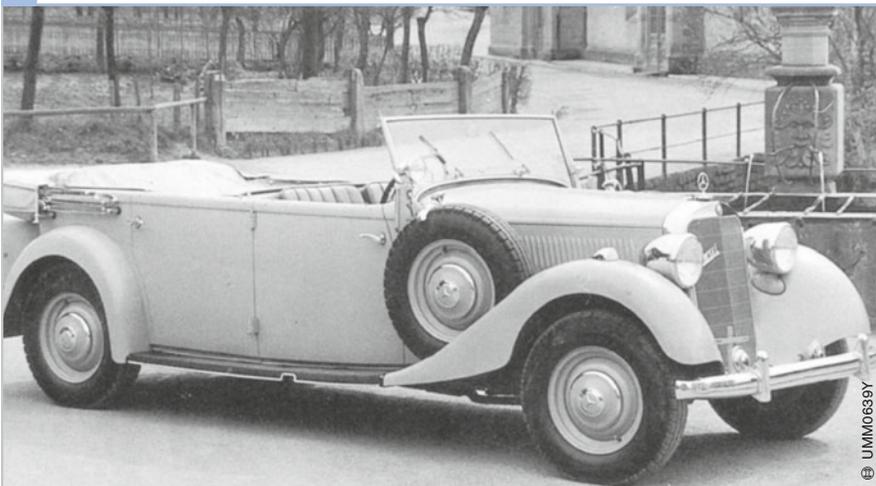
Mit dem Ende der Ära von Dampf- und Segelschiffen auf den Weltmeeren Anfang

des 20. Jahrhunderts trat der Dieselmotor auch als Antriebsquelle für diese Verkehrsmittel in Erscheinung. Das erste mit einem 25-PS-Dieselmotor ausgerüstete Schiff ging 1903 in Betrieb. Die erste von einem Dieselmotor angetriebene Lokomotive wurde 1913 vorgestellt. Die Motorleistung betrug 1000 PS. Aber auch die Luftfahrtpioniere zeigten Interesse am Dieselmotor. An Bord der Graf Zeppelin sorgten Dieselmotoren für den Vortrieb.

6 Bosch-Reiheneinspritzpumpe am Motor des Mercedes 260D

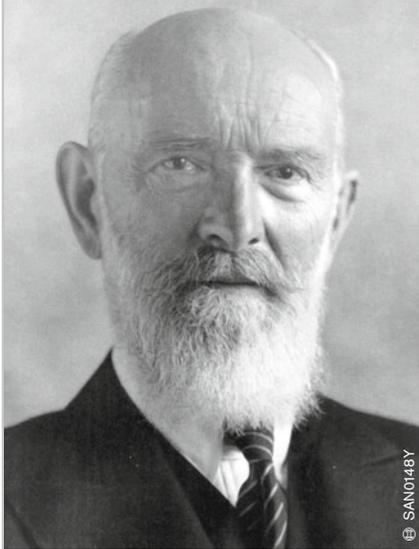


5 Erster Diesel-Pkw: Mercedes-Benz 260D aus dem Jahr 1936 mit einer Motorleistung von 45 PS (33 kW) und einem Kraftstoffverbrauch von 9,5 l/100 km



Bosch-Dieseleinspritzung

1 Robert Bosch



Boschs Einstieg in die Dieselmotortechnik

Robert Bosch (1861–1942) eröffnete 1886 in Stuttgart eine „Werkstätte für Feinmechanik und Elektrotechnik“. Er beschäftigte einen weiteren Mechaniker und einen Lehrling. Am Anfang lag sein Arbeitsgebiet in der Installation und Reparatur von Telefonen, Telegrafien, Blitzableitern und anderen feinmechanischen Tätigkeiten.

Die von Bosch entwickelte Niederspannungs-Magnetzündung sorgte seit 1897 für die zuverlässige Zündung im Benzinmotor. Dieses Produkt war der Ausgangspunkt für die rasche Expansion des Unternehmens von Robert Bosch. 1902 folgte dann die Hochspannungs-Magnetzündung mit Zündkerze. Der Anker dieser Zündanlage ist noch heute im Logo der Firma Robert Bosch GmbH enthalten.

1922 wandte sich Robert Bosch dem Dieselmotor zu. Er glaubte, dass bestimmte Zubehörteile für diese Motoren einmal in ähnlicher Weise geeignete Gegenstände für die Bosch-Präzisionsmengenfertigung abgeben könnten wie die Magnetzündung und

Zündkerzen. Die Zubehörteile für Dieselmotoren waren Einspritzpumpen und Einspritzdüsen.

Schon Rudolf Diesel wollte den Kraftstoff unmittelbar einspritzen, konnte es aber nicht durchführen, weil die hierfür erforderlichen Einspritzpumpen und -düsen nicht zur Verfügung standen. Diese Einspritzpumpen mussten, im Gegensatz zu der bei der Drucklufteinblasung verwendeten Kraftstoffpumpen, für Gegendrucke bis zu mehreren hundert Atmosphären geeignet sein. Die Einspritzdüsen mussten ganz feine Austrittsöffnungen erhalten, weil jetzt der Pumpe und der Düse allein die Aufgabe zufiel, den Kraftstoff zu dosieren und zu zerstäuben.

Die Einspritzpumpen, die Bosch entwickeln wollte, sollten nicht nur den Anforderungen aller damals bestehenden Schweröl-Kleinmotoren mit unmittelbarer Kraftstoffeinspritzung, sondern auch künftigen Kraftfahrzeug-Dieselmotoren gewachsen sein. Am 28. Dezember 1922 wurde der Beschluss zur Aufnahme dieser Entwicklung gefasst.

Anforderungen an die Einspritzpumpen

Die zu entwickelnde Einspritzpumpe sollte imstande sein, auch kleine Mengen Kraftstoff mit nur ganz geringen Unterschieden bei den einzelnen Pumpenelementen einzuspritzen. Damit war ein runder und gleichförmiger Motorlauf auch bei niedrigen Leerlaufdrehzahlen möglich. Für den Vollastbedarf musste sich die Fördermenge auf das Vier- oder Fünffache steigern lassen. Die erforderlichen Einspritzdrücke betragen damals schon über 100 bar. Bosch forderte, dass diese Eigenschaften der Pumpe über 2000 Betriebsstunden gewährleistet sein sollten.

Das waren für den damaligen Stand der Technik hohe Anforderungen. Nicht nur strömungstechnisch war einiges zu leisten, auch für die Fertigungs- und Werkstofftechnik war diese Vorgabe eine Herausforderung.

Entwicklung der Einspritzpumpe

Zunächst wurden verschiedene Pumpenbauarten erprobt. Die Pumpen hatten teils Schieber-, teils Ventilsteuerung. Die Einspritzmenge wurde durch Verändern des Kolbenhubs geregelt. Bereits Ende 1924 stand eine Pumpenbauart zur Verfügung, die in Bezug auf ihre Förderleistung, ihre Dauerhaftigkeit und ihren geringen Raumbedarf den Ansprüchen sowohl des auf der Berliner Automobilausstellung vorgestellten Vorkammermotors der Benz-Werke als auch des MAN-Direkteinspritzers genügte.

Im März 1925 sicherte sich Bosch durch Verträge mit der Acro AG die Übernahme der Verwertung der Acro-Patente auf ein Dieselmotorsystem mit Luftspeicher und der dazugehörigen Einspritzpumpe und -düse. Die Acro-Pumpe, von Franz Lang in München entwickelt, war eine Einspritzpumpe an sich bekannter Art. Sie hatte aber einen besonderen Steuerschieber mit Schrägkante, der zum Regeln der Fördermenge gedreht wurde. Später verlagerte Lang diese Steuerkante an den Pumpenkolben.

Die Fördereigenschaften der Acro-Einspritzpumpe entsprachen zwar nicht dem, was Boschs eigene Versuchspumpen geboten hatten. Bosch wollte aber mit dem Acro-Motor mit einem für kleine Zylindereinheiten und hohe Drehzahlen besonders geeigneten Dieselmotor in Berührung kommen und auf diese Weise einen festen Boden für die Weiterentwicklung von Einspritzpumpen und -düsen gewinnen. Daneben hatte Bosch der Gedanke geleitet, durch Vergabe von Lizenzen auf die Acro-Patente an Motorfabriken die Ausbreitung des Fahrzeug-Dieselmotors zu fördern und damit zur Motorisierung des Verkehrs beizutragen.

Nach dem Ausscheiden Langs aus der Firma im Oktober 1926 verschob sich der Schwerpunkt der Tätigkeit im Hause Bosch wieder hin zur Pumpenentwicklung. Bald darauf entstand die erste serienreife Bosch-Dieseinspritzpumpe.

2 Ausführung einer Bosch-Einspritzpumpe von 1923/1924

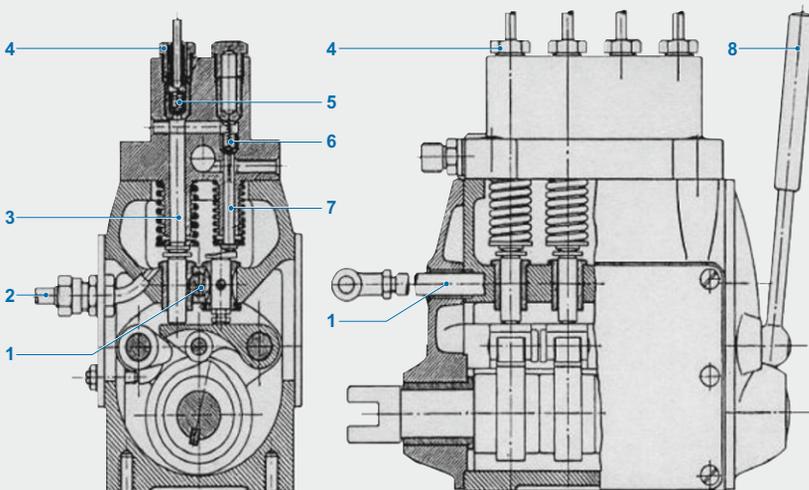


Bild 2

- 1 Regelstange
- 2 Zulaufanschluss
- 3 Pumpenkolben
- 4 Druckleitungsanschluss
- 5 Druckventil
- 6 Saugventil
- 7 Ventilstößel
- 8 Abstell- und Aufpumphebel

Serienreife Bosch-Dieseleinspritzpumpe

Die Bosch-Einspritzpumpe hatte wie schon dem Plan des Konstrukteurs von 1925 entsprechend und wie die abgeänderte Acro-Pumpe eine schräg verlaufende Steuerkante am Pumpenkolben. Sonst unterschied sie sich aber wesentlich von all ihren Vorgängern.

Anstelle des außen liegenden Hebelwerks der Acro-Pumpe zum Verdrehen der Pumpenkolben trat die gezahnte Regelstange, die in Ritzel auf Regelhülsen der Pumpenelemente eingreift.

Um die Druckleitung am Ende der Einspritzung zu entlasten und ein Nachtropfen von Kraftstoff zu verhindern, wurde das Druckventil der Pumpe mit einem saugend in die Ventilführung eingepassten Kölbchen versehen. Dadurch wurde im Gegensatz zu den früher angewendeten Entlastungsmitteln eine große Stetigkeit der Förderung bei verschiedenen Drehzahlen und Mengenein-

stellungen erreicht und das Einstellen von Mehrzylinderpumpen auf gleiche Förderung aller Elemente wesentlich erleichtert und verkürzt.

Der einfache und klare Aufbau ermöglichte ein einfaches Zusammensetzen und Prüfen der Einspritzpumpe. Zudem wurde der Ersatz von Teilen gegenüber früheren Bauarten wesentlich erleichtert. Das Gehäuse entsprach in erster Linie den Anforderungen der Gießerei und der übrigen Fertigung. Die ersten Muster dieser wirklich für Mengenfertigung geeigneten Bosch-Einspritzpumpe wurden im April 1927 hergestellt. Die Freigabe für die Fertigung in größerer Stückzahl und in Ausführungen für Zwei-, Vier- und Sechszylindermotoren erfolgte am 30. November 1927, nachdem sich die Muster in der scharfen Prüfung im Hause und im praktischen Betrieb ausgezeichnet bewährt hatten.

3 Erste Serien-Dieseleinspritzpumpe von Bosch (1927)

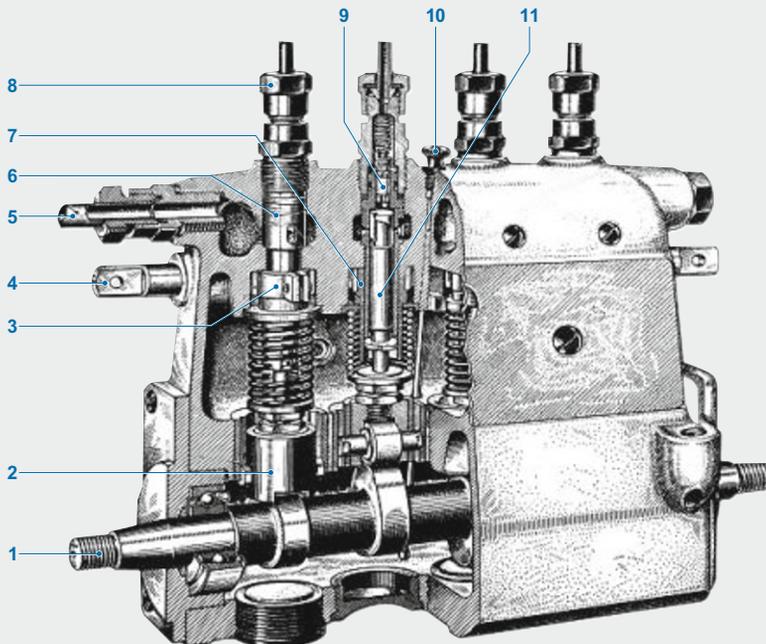


Bild 3

- 1 Nockenwelle
- 2 Rollenstößel
- 3 Zahnsegment
- 4 Regelstange
- 5 Zulaufanschluss
- 6 Pumpenzylinder
- 7 Regelhülse
- 8 Druckleitungsanschluss
- 9 Druckventil mit Kölbchen
- 10 Ölpegel
- 11 Pumpenkolben

Düsen und Düsenhalter

Die Entwicklung der Einspritzdüsen und Düsenhalter verlief parallel zur Pumpenentwicklung. Zunächst wurden Zapfendüsen für Vorkammermotoren eingesetzt. Mit dem Einsatz der Bosch-Pumpe für den direkt-einspritzenden Dieselmotor kamen Anfang 1929 die Lochdüsen hinzu.

Düsen und Düsenhalter wurden in ihrer Größe immer sofort den neu aufgenommenen Pumpengrößen angepasst. Die Motorenhersteller wünschten dann bald auch, dass der Düsenhalter mit der Düse in gleicher Weise in den Zylinderkopf eingeschraubt werden kann wie die Zündkerze beim Ottomotor. Bosch stellte sich auf diesen Wunsch ein und fertigte einschraubbare Düsenhalter.

Regler für die Einspritzpumpe

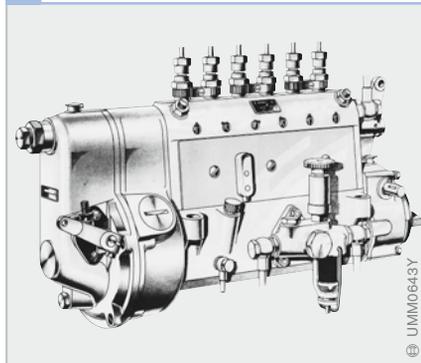
Da der Dieselmotor nicht wie der Ottomotor selbstregelnd ist, sondern zum Aufrechterhalten einer bestimmten Drehzahl und zum Schutz vor dem Überdrehen mit Selbstzerstörung einen Regler benötigt, mussten die Fahrzeug-Dieselmotoren von Anfang an mit solch einer Vorrichtung ausgestattet werden. Die Motorenfabriken stellten diese Regler zunächst selbst her. Bald kam jedoch der Wunsch auf, den Antrieb für den Regler, der durchweg ein Fliehkraftregler war, einzusparen und diesen mit der Einspritzpumpe zusammenzubauen. Dieser Forderung kam Bosch im Jahr 1931 mit dem Bosch-Regler nach.

Verbreitung der Bosch-Dieseleinspritztechnik

Bis August 1928 waren schon tausend Bosch-Einspritzpumpen ausgeliefert. Als der Aufschwung des Fahrzeug-Dieselmotors begann, stand Bosch gut vorbereitet da und konnte die Motorenfabriken mit einer ausgereiften Einspritzausrüstung bedienen. Als sich die Bosch-Pumpen und -Düsen bewährt hatten, verzichteten die meisten Firmen ganz auf die Eigenherstellung dieses Zubehörs.

Bosch kam bei der Entwicklung der Dieseleinspritzpumpen seine Erfahrung in der Feinmechanik (z. B. bei der Fertigung von Schmierpumpen) zugute. Seine Produkte konnten nicht „nach den reinen Grundsätzen des Maschinenbaus“ hergestellt werden. Das verhalf ihm zu einem Marktvorteil. Bosch hatte damit einen wesentlichen Anteil daran, dass sich der Dieselmotor zu dem entwickeln konnte, was er heute ist.

4 Bosch-Einspritzpumpe mit angebautes Fliehkraftregler



5 Werbeplakat für die Bosch-Dieseleinspritzung



Einsatzgebiete der Dieselmotoren

Kein anderer Verbrennungsmotor wird so vielfältig eingesetzt wie der Dieselmotor¹⁾. Dies ist vor allem auf seinen hohen Wirkungsgrad und der damit verbundenen Wirtschaftlichkeit zurückzuführen.

Die wesentlichen Einsatzgebiete für Dieselmotoren sind:

- Stationärmotoren,
- Pkw und leichte Nkw,
- schwere Nkw,
- Bau- und Landmaschinen,
- Lokomotiven und
- Schiffe.

Dieselmotoren werden als Reihenmotoren und V-Motoren gebaut. Sie eignen sich grundsätzlich sehr gut für die Aufladung, da bei ihnen im Gegensatz zum Ottomotor kein Klopfen auftritt (siehe Kapitel „Systeme zur Füllungssteuerung“).

Eigenschaftskriterien

Folgende Merkmale und Eigenschaften sind für den Einsatz eines Dieselmotors von Bedeutung (Beispiele):

- Motorleistung,
- spezifische Leistung,
- Betriebssicherheit,
- Herstellungskosten,
- Wirtschaftlichkeit im Betrieb,
- Zuverlässigkeit,
- Umweltverträglichkeit,
- Komfort und
- Gefälligkeit (z. B. Motorraumdesign).

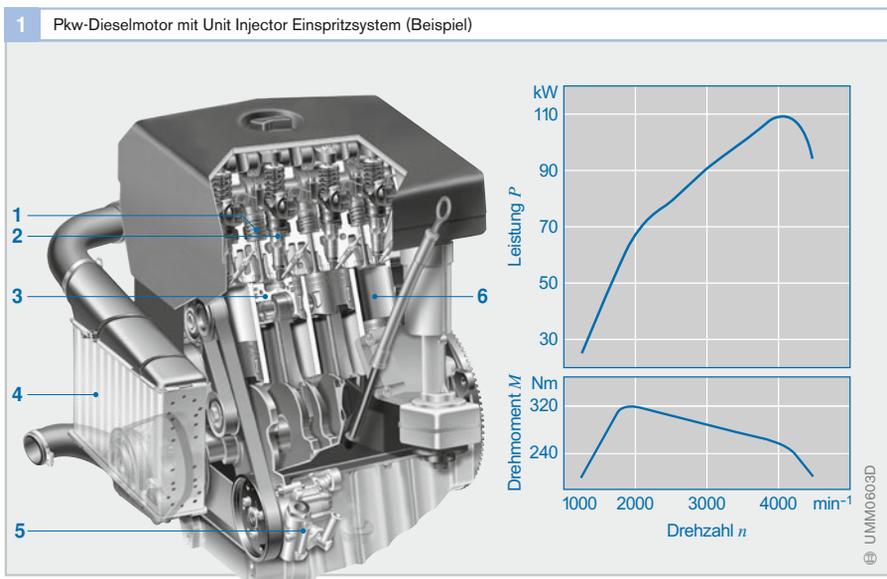
Je nach Anwendungsbereich ergeben sich für die Auslegung des Dieselmotors unterschiedlich Schwerpunkte.

Anwendungen

Stationärmotoren

Stationärmotoren (z. B. für Stromerzeuger) werden oft mit einer festen Drehzahl betrieben. Motor und Einspritzsystem können somit optimal auf diese Drehzahl abgestimmt werden. Ein Drehzahlregler ver-

¹⁾ Benannt nach Rudolf Diesel (1858 bis 1913), der 1892 sein erstes Patent auf „Neue rationelle Wärmekraftmaschinen“ anmeldete. Es erforderte jedoch noch viel Entwicklungsarbeit, bis 1897 der erste Dieselmotor bei MAN in Augsburg lief.



ändert die Einspritzmenge entsprechend der geforderten Last. Für diese Anwendungen werden weiterhin auch Einspritzanlagen mit mechanischer Regelung eingesetzt.

Auch Pkw- und Nkw-Motoren können als Stationärmotoren eingesetzt werden. Die Regelung des Motors muss jedoch ggf. den veränderten Bedingungen angepasst sein.

Pkw und leichte Nkw

Besonders von Pkw-Motoren (Bild 1) wird ein hohes Maß an Durchzugskraft und Laufruhe erwartet. Auf diesem Gebiet wurden durch weiterentwickelte Motoren und neue Einspritzsysteme mit Elektronischer Dieselregelung (Electronic Diesel Control EDC) große Fortschritte erzielt. Das Leistungs- und Drehmomentverhalten konnte auf diese Weise seit Beginn der 1990er Jahre wesentlich verbessert werden. Deshalb hat der „Diesel“ unter anderem auch den Einzug in die Pkw-Oberklasse geschafft.

In Pkw werden Schnellläufer mit Drehzahlen bis 5500 min^{-1} eingesetzt. Das Spektrum reicht vom 10-Zylinder mit 5000 cm^3 in Limousinen bis zum 3-Zylinder 800 cm^3 -Motor in Kleinwagen.

Neue Pkw-Dieselmotoren werden in Europa nur noch mit Direkteinspritzung (DI, Direct Injection engine) entwickelt, da der Kraftstoffverbrauch bei DI-Motoren ca. 15...20 % geringer ist als bei Kammermotoren. Diese heute fast ausschließlich mit einem Abgas-turbolader ausgerüsteten Motoren bieten deutlich höhere Drehmomente als vergleichbare Ottomotoren. Das im Fahrzeug maximal mögliche Drehmoment wird meist von den zur Verfügung stehenden Getrieben und nicht vom Motor bestimmt.

Die immer schärfer werdenden Abgasgrenzwerte und die gestiegenen Leistungsanforderungen erfordern Einspritzsysteme mit sehr hohen Einspritzdrücken. Die steigenden Anforderungen an das Abgasverhalten bilden auch zukünftig eine Herausforderung für die Entwickler von Dieselmotoren. Deshalb wird es in Zukunft besonders auf dem Gebiet der Abgasnachbehandlung zu weiteren Veränderungen kommen.

Schwere Nkw

Motoren für schwere Nkw (Bild 2) müssen vor allem wirtschaftlich sein. Deshalb sind in diesem Anwendungsbereich nur Diesel-

2 Nkw-Dieselmotor mit Common Rail System (Beispiel)

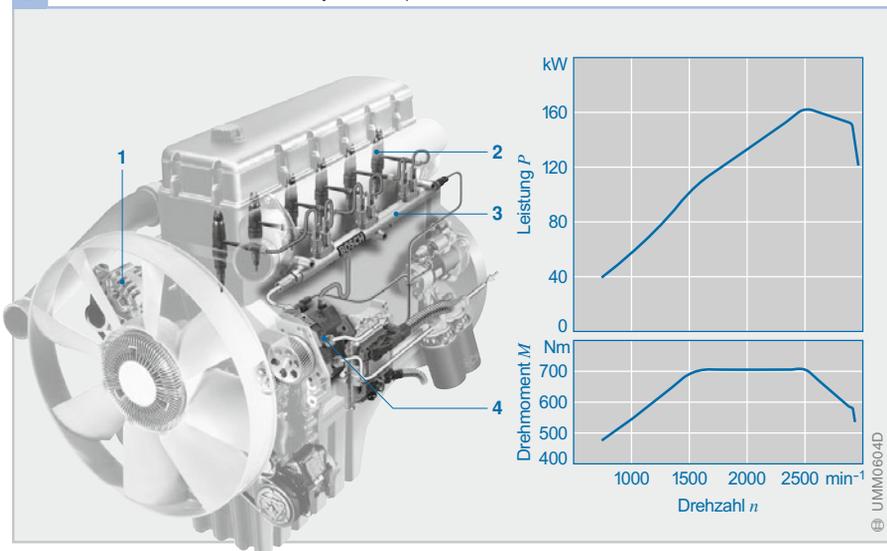


Bild 2

- 1 Generator
- 2 Injektor
- 3 Rail
- 4 Hochdruckpumpe

motoren mit Direkteinspritzung (DI) zu finden. Der Drehzahlbereich dieser Mittelschnellläufer reicht bis ca. 3500 min^{-1} .

Auch die Abgasgrenzwerte für Nkw werden immer weiter herabgesetzt. Dies bedeutet hohe Anforderungen auch an das jeweilige Einspritzsystem und die Entwicklung von neuen Systemen zur Abgasnachbehandlung.

Bau- und Landmaschinen

Im Bereich der Bau- und Landmaschinen hat der Dieselmotor seinen klassischen Einsatzbereich. Bei der Auslegung dieser Motoren wird außer auf die Wirtschaftlichkeit besonders hoher Wert auf Robustheit, Zuverlässigkeit und Servicefreundlichkeit gelegt. Die maximale Leistungsausbeute und die Geräuschoptimierung haben einen geringeren Stellenwert als zum Beispiel bei Pkw-Motoren. Bei dieser Anwendung werden Motoren mit Leistungen ab ca. 3 kW bis hin zu Leistungen schwerer Nkw eingesetzt.

Bei Bau- und Landmaschinen kommen vielfach noch Einspritzsysteme mit mechanischer Regelung zum Einsatz. Im Gegensatz zu allen anderen Einsatzbereichen, in denen

vorwiegend wassergekühlte Motoren verwendet werden, hat bei den Bau- und Landmaschinen die robuste und einfach realisierbare Luftkühlung noch große Bedeutung.

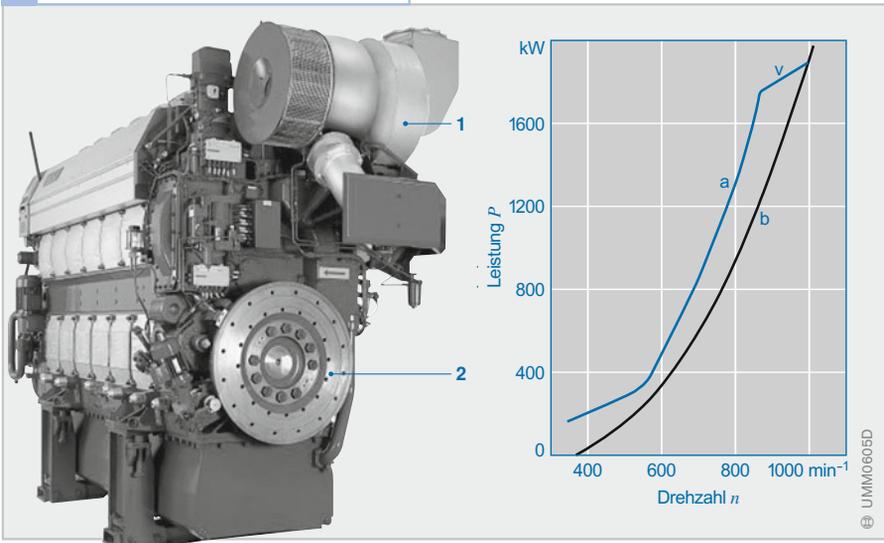
Lokomotiven

Lokomotivmotoren sind, ähnlich wie größere Schiffsdieselmotoren, besonders auf Dauerbetrieb ausgelegt. Außerdem müssen sie gegebenenfalls auch mit schlechteren Dieselmotoren-Qualitäten zurechtkommen. Ihre Baugröße umfasst den Bereich großer Nkw-Motoren bis zu mittleren Schiffsmotoren.

Schiffe

Die Anforderungen an Schiffsmotoren sind je nach Einsatzbereich sehr unterschiedlich. Es gibt ausgesprochene Hochleistungsmotoren für z. B. Marine- oder Sportboote. Für diese Anwendung werden 4-Takt-Mittelschnellläufer mit einem Drehzahlbereich zwischen $400 \dots 1500 \text{ min}^{-1}$ und bis zu 24 Zylindern eingesetzt (Bild 3). Andererseits finden auf äußerste Wirtschaftlichkeit im Dauerbetrieb ausgelegte 2-Takt-Großmotoren Verwendung. Mit diesen Langsamläufern ($n < 300 \text{ min}^{-1}$) werden auch die

3 Schiffsdiesel mit Einzelspritzpumpen (Beispiel)



höchsten mit Kolbenmotoren erreichbaren effektiven Wirkungsgrade von bis zu 55 % erreicht.

Großmotoren werden meist mit preiswertem Schweröl betrieben. Dazu ist eine aufwändige Kraftstoff-Aufbereitung an Bord erforderlich. Der Kraftstoff muss je nach Qualität auf bis zu 160 °C aufgeheizt werden. Erst dadurch wird seine Viskosität auf einen Wert gesenkt, der ein Filtern und Pumpen ermöglicht.

Für kleinere Schiffe werden oft Motoren eingesetzt, die eigentlich für schwere Nkw bestimmt sind. Damit steht ein wirtschaftlicher Antrieb mit niedrigen Entwicklungskosten zur Verfügung. Auch bei diesen Anwendungen muss die Regelung an das veränderte Einsatzprofil angepasst sein.

Mehr- oder Vielstoffmotoren

Für Sonderanwendungen (z. B. Einsatz in Gebieten mit sehr schlechter Infrastruktur und Militäranwendungen) wurden Dieselmotoren mit der Eignung für wechselweisen Betrieb mit Diesel-, Otto- und ähnlichen Kraftstoffen entwickelt. Sie haben zurzeit nahezu keine Bedeutung, da mit solchen Motoren die heutigen Anforderungen an das Emissions- und Leistungsverhalten nicht zu erfüllen sind.

Motorkenndaten

Tabelle 1 zeigt die wichtigsten Vergleichsdaten verschiedener Diesel- und Ottomotoren.

Bei Ottomotoren mit Benzin-Direkteinspritzung BDE liegt der Mitteldruck um ca. 10 % höher als bei den in der Tabelle angegebenen Motoren mit Saugrohrein-spritzung. Der spezifische Kraftstoffverbrauch ist dabei um bis zu 25 % geringer. Das Verdichtungsverhältnis bei diesen Motoren geht bis $\varepsilon=13$.

1 Vergleichsdaten für Diesel- und Ottomotoren						
Einspritzsystem	Nenn-drehzahl n_{Nenn} [min ⁻¹]	Verdichtungs- verhältnis ε	Mitteldruck ¹⁾ p_e [bar]	spezifische Leistung $p_{e, \text{spez.}}$ [kW/l]	Leistungs- gewicht $\eta_{\text{spez.}}$ [kg/kW]	spez. Kraftstoff- verbrauch ²⁾ b_e [g/kWh]
Dieselmotoren						
IDI ³⁾ Pkw Saugmotoren	3500...5000	20...24	7...9	20...35	5...3	320...240
IDI ³⁾ Pkw mit Aufladung	3500...4500	20...24	9...12	30...45	4...2	290...240
DI ⁴⁾ Pkw Saugmotoren	3500...4200	19...21	7...9	20...35	5...3	240...220
DI ⁴⁾ Pkw mit Aufladung u. LLK ⁵⁾	3600...4400	16...20	8...22	30...60	4...2	210...195
DI ⁴⁾ Nkw Saugmotoren	2000...3500	16...18	7...10	10...18	9...4	260...210
DI ⁴⁾ Nkw mit Aufladung	2000...3200	15...18	15...20	15...25	8...3	230...205
DI ⁴⁾ Nkw mit Aufladung u. LLK ⁵⁾	1800...2600	16...18	15...25	25...35	5...2	225...190
Bau- und Landmaschinen	1000...3600	16...20	7...23	6...28	10...1	280...190
Lokomotiven	750...1000	12...15	17...23	20...23	10...5	210...200
Schiffe (4-Takt)	400...1500	13...17	18...26	10...26	16...13	210...190
Schiffe (2-Takt)	50...250	6...8	14...18	3...8	32...16	180...160
Ottomotoren						
Pkw Saugmotoren	4500...7500	10...11	12...15	50...75	2...1	350...250
Pkw mit Aufladung	5000...7000	7...9	11...15	85...105	2...1	380...250
Nkw	2500...5000	7...9	8...10	20...30	6...3	380...270

Tabelle 1

1) Aus dem Mitteldruck p_e kann das mit folgender Formel spezifische Drehmoment $M_{\text{spez.}}$ [Nm] ermittelt werden:

$$M_{\text{spez.}} = \frac{25}{\pi \cdot p_e}$$

- 2) Bestverbrauch
3) IDI Indirect Injection (Kammernmotoren)
4) DI Direct Injection (Direkteinspritzer)
5) Ladeluftkühlung

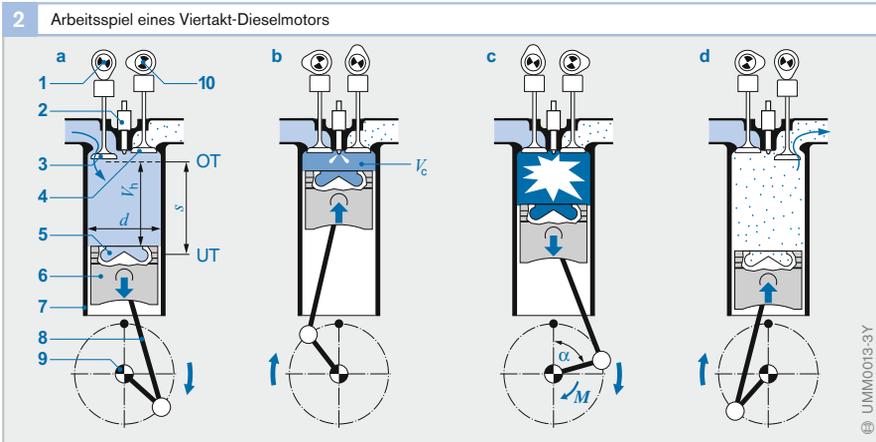


Bild 2

- a Ansaugtakt
 - b Verdichtungstakt
 - c Arbeitstakt
 - d Ausstoßtakt
- 1 Einlassnockenwelle
 - 2 Einspritzdüse
 - 3 Einlassventil
 - 4 Auslassventil
 - 5 Brennraum
 - 6 Kolben
 - 7 Zylinderwand
 - 8 Pleuelstange
 - 9 Kurbelwelle
 - 10 Auslassnockenwelle

- α Kurbelwellenwinkel
- d Bohrung
- M Drehmoment
- s Kolbenhub
- V_c Kompressionsvolumen
- V_h Hubvolumen (Hubraum)
- OT oberer Totpunkt des Kolbens
- UT unterer Totpunkt des Kolbens

Viertakt-Verfahren

Beim Viertakt-Dieselmotor (Bild 2) steuern Gaswechselventile den Gaswechsel von Frischluft und Abgas. Sie öffnen oder schließen die Ein- und Auslasskanäle zu den Zylindern. Je Ein- bzw. Auslasskanal können ein oder zwei Ventile eingebaut sein.

1. Takt: Ansaugtakt (a)

Ausgehend vom oberen Totpunkt (OT) bewegt sich der Kolben (6) abwärts und vergrößert das Volumen im Zylinder. Durch das geöffnete Einlassventil (3) strömt Luft ohne vorgeschaltete Drosselklappe in den Zylinder ein. Im unteren Totpunkt (UT) hat das Zylindervolumen seine maximale Größe erreicht ($V_h + V_c$).

2. Takt: Verdichtungstakt (b)

Die Gaswechselventile sind nun geschlossen. Der aufwärts gehende Kolben verdichtet (komprimiert) die im Zylinder eingeschlossene Luft entsprechend dem ausgeführten Verdichtungsverhältnis (von 6:1 bei Großmotoren bis 24:1 bei Pkw). Sie erwärmt sich dabei auf Temperaturen bis zu 900 °C. Gegen Ende des Verdichtungsvorgangs spritzt die Einspritzdüse (2) den Kraftstoff unter hohem Druck (derzeit bis zu 2200 bar) in die erhitzte Luft ein. Im oberen Totpunkt ist das minimale Volumen erreicht (Kompressionsvolumen V_c).

3. Takt: Arbeitstakt (c)

Nach Verstreichen des Zündverzugs (einige Grad Kurbelwellenwinkel) beginnt der Arbeitstakt. Der fein zerstäubte zündwillige Dieselkraftstoff entzündet sich selbst an der hoch verdichteten heißen Luft im Brennraum (5) und verbrennt. Dadurch erhitzt sich die Zylinderladung weiter und der Druck im Zylinder steigt nochmals an. Die durch die Verbrennung frei gewordene Energie ist im Wesentlichen durch die eingespritzte Kraftstoffmasse bestimmt (Qualitätsregelung). Der Druck treibt den Kolben nach unten, die chemische Energie wird in Bewegungsenergie umgewandelt. Ein Kurbeltrieb übersetzt die Bewegungsenergie des Kolbens in ein an der Kurbelwelle zur Verfügung stehendes Drehmoment.

4. Takt: Ausstoßtakt (d)

Bereits kurz vor dem unteren Totpunkt öffnet das Auslassventil (4). Die unter Druck stehenden heißen Gase strömen aus dem Zylinder. Der aufwärts gehende Kolben stößt die restlichen Abgase aus.

Nach jeweils zwei Kurbelwellenumdrehungen beginnt ein neues Arbeitsspiel mit dem Ansaugtakt.

Ventilsteuerzeiten

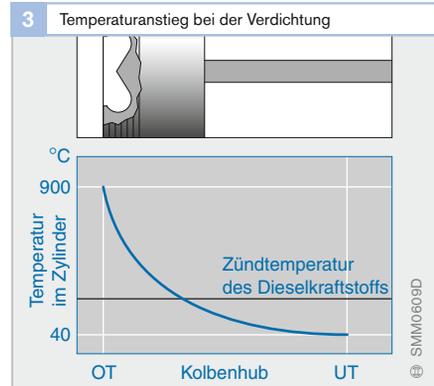
Die Nocken auf der Einlass- und Auslassnockenwelle öffnen und schließen die Gaswechselventile. Bei Motoren mit nur einer Nockenwelle überträgt ein Hebelmechanismus die Hubbewegung der Nocken auf die Gaswechselventile. Die Steuerzeiten geben die Schließ- und Öffnungszeiten der Ventile bezogen auf die Kurbelwellenstellung an (Bild 4). Sie werden deshalb in „Grad Kurbelwellenwinkel“ angegeben.

Die Kurbelwelle treibt die Nockenwelle über einen Zahnriemen (bzw. eine Kette oder Zahnräder) an. Ein Arbeitsspiel umfasst beim Viertakt-Verfahren zwei Kurbelwellenumdrehungen. Die Nockenwellendrehzahl ist deshalb nur halb so groß wie die Kurbelwellendrehzahl. Das Übersetzungsverhältnis zwischen Kurbel- und Nockenwelle beträgt somit 2:1.

Beim Übergang zwischen Ausstoß- und Ansaugtakt sind über einen bestimmten Bereich Auslass- und Einlassventil gleichzeitig geöffnet. Durch diese Ventilüberschneidung wird das restliche Abgas ausgespült und gleichzeitig der Zylinder gekühlt.

Bild 3

OT oberer Totpunkt des Kolbens
UT unterer Totpunkt des Kolbens



Verdichtung (Kompression)

Aus dem Hubraum V_h und dem Kompressionsvolumen V_c eines Kolbens ergibt sich das Verdichtungsverhältnis ε :

$$\varepsilon = \frac{V_h + V_c}{V_c}$$

Die Verdichtung des Motors hat entscheidenden Einfluss auf

- das Kaltstartverhalten,
- das erzeugte Drehmoment,
- den Kraftstoffverbrauch,
- die Geräuschemissionen und
- die Schadstoffemissionen.

Das Verdichtungsverhältnis ε beträgt bei Dieselmotoren für Pkw und Nkw je nach Motorbauweise und Einspritzart $\varepsilon = 16:1 \dots 24:1$. Die Verdichtung liegt also höher als beim Ottomotor ($\varepsilon = 7:1 \dots 13:1$). Aufgrund der begrenzten Klopfestigkeit des Benzins würde sich bei diesem das Luft-Kraftstoff-Gemisch bei hohem Kompressionsdruck und der sich daraus ergebenden hohen Brennraumtemperatur selbstständig und unkontrolliert entzünden.

Die Luft wird im Dieselmotor auf 30...50 bar (Saugmotor) bzw. 70...150 bar (aufgeladener Motor) verdichtet. Dabei entstehen Temperaturen im Bereich von 700...900°C (Bild 3). Die Zündtemperatur für die am leichtesten entflammbarsten Komponenten im Dieselkraftstoff beträgt etwa 250°C.

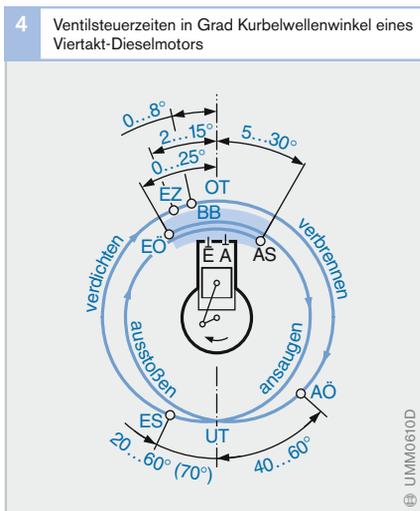


Bild 4

AÖ Auslass öffnet
AS Auslass schließt
BB Brennbeginn
EÖ Einlass öffnet
ES Einlass schließt
EZ Einspritzzeitpunkt
OT oberer Totpunkt des Kolbens
UT unterer Totpunkt des Kolbens

■ Ventilüberschneidung