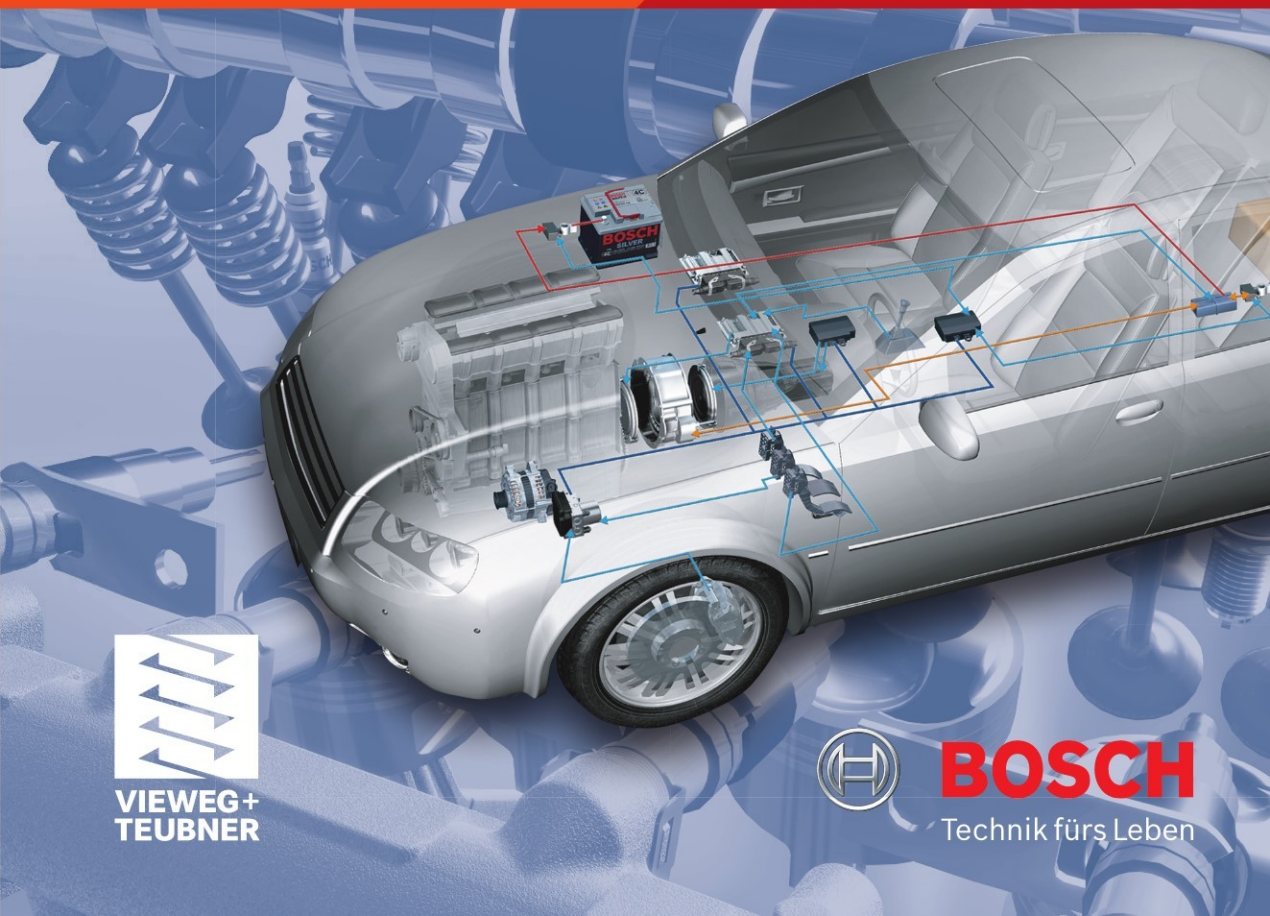


Konrad Reif (Hrsg.)

Bosch Grundlagen Fahrzeug- und Motorentechnik

Konventioneller Antrieb, Hybridantriebe,
Bremsen, Elektronik

Bosch Fachinformation Automobil



**VIEWEG+
TEUBNER**



BOSCH

Technik fürs Leben

Konrad Reif (Hrsg.)

Bosch Grundlagen Fahrzeug- und Motorentechnik

Konrad Reif (Hrsg.)

Bosch Grundlagen Fahrzeug- und Motorentechnik

Konventioneller Antrieb, Hybridantriebe,
Bremsen, Elektronik

Mit 235 Abbildungen

Bosch Fachinformation Automobil



VIEWEG+
TEUBNER

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

1. Auflage 2011

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011

Lektorat: Ewald Schmitt | Elisabeth Lange

Vieweg+Teubner Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.

Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, 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.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Technische Redaktion: Gabriele McLemore

Satz: FROMM MediaDesign, Selters/Ts.

Druck und buchbinderische Verarbeitung: AZ Druck und Datentechnik, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-1598-9



Die Technik im Kraftfahrzeug hat sich in den letzten Jahrzehnten stetig weiterentwickelt. Der Einzelne, der beruflich mit dem Thema beschäftigt ist, muss immer mehr tun, um mit diesen Neuerungen Schritt zu halten. Mittlerweile spielen viele neue Themen der Wissenschaft und Technik in Kraftfahrzeugen eine große Rolle. Dies sind nicht nur neue Themen aus der klassischen Fahrzeug- und Motorentechnik, sondern auch aus der Elektronik und aus der Informationstechnik. Diese Themen sind zwar für sich in unterschiedlichen Publikationen gedruckt oder im Internet dokumentiert, also prinzipiell für jeden verfügbar; jedoch ist für jemanden, der sich neu in ein Thema einarbeiten will, die Fülle der Literatur häufig weder überblickbar noch in der dafür verfügbaren Zeit lesbar. Aufgrund der verschiedenen beruflichen Tätigkeiten in der Automobil- und Zulieferindustrie sind zudem unterschiedlich detaillierte Ausführungen gefragt.

Gerade heute ist es so wichtig wie früher: Wer die Entwicklung mit gestalten will, muss sich mit den grundlegenden wichtigen Themen gut auskennen. Hierbei sind nicht nur die Hochschulen mit den Studienangeboten und die Arbeitgeber mit Weiterbildungsmaßnahmen in der Pflicht. Der rasche Technologiewechsel zwingt zum lebenslangen Lernen, auch in Form des Selbststudiums.

Hier setzt die Schriftenreihe „Bosch Fachinformation Automobil“ an. Sie bietet eine umfassende und einheitliche Darstellung wichtiger Themen aus der Kraftfahrzeugtechnik in kompakter, verständlicher und praxisrelevanter Form. Dies ist dadurch möglich, dass die Inhalte von Ingenieuren der Bosch-Entwicklungsabteilungen sowie von Mitarbeitern aus weiteren Unternehmen verfasst wurden, die genau an den dargestellten Themen arbeiten. „Bosch Grundlagen Fahrzeug und Motorentechnik“ ist als umfassendes Buch so gestaltet, dass sich auch ein Leser zurechtfindet, für den das Thema neu ist.

Das vorliegende Buch „**Bosch Grundlagen Fahrzeug- und Motorentechnik**“ enthält eine Zusammenstellung grundlegender Kapitel der Bücher „Dieselmotor-Management“, „Ottomotor-Management“, „Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe“, „Bremsen und Bremsregelsysteme“ sowie „Bosch Autoelektrik und Autoelektronik“ aus derselben Buchreihe.

Dabei werden Dieselmotoren, Ottomotoren, Getriebe und Hybridantriebe prinzipiell erklärt. Aber auch die Themen Fahrsicherheit, Bremssysteme, Energiebordnetze und Elektronik werden grundlegend behandelt. Für eine detailliertere Darstellung dieser Themen wird auf die oben genannten Bücher verwiesen.

Das Buch eignet sich besonders gut für Studenten natur- und ingenieurwissenschaftlicher Fachrichtungen, die Fahrzeugtechnik als Nebenfach gewählt haben sowie für Ingenieure, insbesondere auch Wirtschaftsingenieure, die sich in das Gebiet der Fahrzeugtechnik neu einarbeiten.

Friedrichshafen, im Juli 2011

Konrad Reif

Inhaltsverzeichnis

Einsatzgebiete der Dieselmotoren	10
Eigenschaftskriterien	10
Anwendungen	10
Motorkenndaten	13
Grundlagen des Dieselmotors	14
Arbeitsweise	14
Drehmoment und Leistung	17
Motorwirkungsgrad	18
Betriebszustände	21
Betriebsbedingungen	25
Einspritzsystem	27
Brennräume	28
Grundlagen der Dieseleinspritzung	32
Gemischverteilung	32
Parameter der Einspritzung	34
Düsen- und Düsenhalter-Ausführung	43
Grundlagen des Ottomotors	44
Arbeitsweise	44
Zylinderfüllung	48
Drehmoment und Leistung	52
Motorwirkungsgrad	54
Spezifischer Kraftstoffverbrauch	56
Klopfende Verbrennung	58
Induktive Zündanlage	60
Aufbau	60
Aufgabe und Arbeitsweise	61
Zündparameter	63
Spannungsverteilung	67
Zündungsendstufe	68
Verbindungs- und Entstörmittel	69
Getriebe für Kraftfahrzeuge	70
Getriebe im Triebstrang	70
Anforderungen an Getriebe	72
Handschaltgetriebe	73
Automatisierte Schaltgetriebe (AST)	74
Doppelkupplungsgetriebe (DKG)	78
Automatische Getriebe (AT)	80
Stufenlose Getriebe (CVT)	88
Toroidgetriebe	94
Hybridantriebe	96
Prinzip	96
Betriebsmodi	97

Start/Stop-Funktion.....	99
Hybridisierungsgrade.....	100
Antriebskonfiguration	102
Betrieb von Hybridfahrzeugen	109
Hybridsteuerung.....	109
Betriebsstrategien für Hybridfahrzeuge	110
Betriebspunktoptimierung.....	112
Auslegung des Verbrennungsmotors	115
Regeneratives Bremssystem.....	118
Strategien der regenerativen Bremsung.....	118
Fahrsicherheit im Kraftfahrzeug	122
Sicherheitssysteme.....	122
Grundlagen des Fahrens.....	124
Grundlagen der Fahrphysik.....	132
Reifen.....	132
Kräfte und Momente am Fahrzeug	135
Fahrzeuglängsdynamik.....	142
Fahrzeugquerdynamik	144
Definitionen.....	146
Bremssysteme im Personenkraftwagen.....	148
Übersicht.....	148
Geschichte der Bremse.....	150
Einteilung von Pkw-Bremsanlagen.....	156
Bestandteile einer Pkw-Bremsanlage	158
Bremskreisauflteilung.....	159
Energiebordnetze	160
Elektrische Energieversorgung	160
Bordnetzstrukturen.....	168
Elektrisches Energiemanagement (EEM)	171
Übersicht über elektrische und elektronische Systeme im Kfz	176
Entwicklung elektronischer Systeme	176
Wertschöpfungsstruktur der Zukunft	177
Aufgabe eines elektronischen Systems	178
Steuerung und Regelung von Ottomotoren.....	179
Systembeschreibung	179
Luftsystem	181
Kraftstoffsystem	181
Einspritzventil für Saugrohreinspritzung	182
Hochdruck-Einspritzventil für Benzin-Direkteinspritzung	182
Steuerung und Regelung von Dieselmotoren.....	186
Systemübersicht	186
Datenverarbeitung	188

Regelung der Einspritzung	190
Momentengeführte EDC-Systeme	192
Lichttechnik	194
Lichtquellen für Kfz	194
Hauptscheinwerfer (Europa)	198
Hauptscheinwerfer (Nordamerika)	199
Litronic	200
Leuchtweitenregelung	202
Adaptive Beleuchtungssysteme	204
Kurvenlicht (Europa)	205
Elektronisches Stabilitätsprogramm ESP	208
Hierarchische Reglerstruktur des ESP	208
Antiblockiersystem ABS	209
ABS-Regelkreis	210
Antriebsschlupfregelung ASR	212
Insassenschutzsysteme	214
Sicherheitsgurte und Gurtstraffer	214
Frontairbag	215
Seitenairbag	216
Überrollschutzsysteme	217
Kombinierte Steuergeräte für Gurtstraffer, Front- und Seitenairbags sowie Überrollschutzeinrichtungen	217
Beschleunigungssensoren	220
Gasgeneratoren	220
Wechselstromzündung	220
Innenraumsensierung	220
Sachwortverzeichnis	223

Autorenverzeichnis

Dr.-Ing. Herbert Schumacher
(Einsatzgebiete der Dieselmotoren);

Dr.-Ing. Thorsten Raatz
(Grundlagen des Dieselmotors);

Dipl.-Ing. Hermann Grieshaber
(Grundlagen der Dieseleinspritzung);

Dr.- rer. nat. Dirk Hofmann,
Dipl.-Ing. Bernhard Mencher,
Dipl.-Ing. Werner Häming,
Dipl.-Ing. Werner Hess
(Grundlagen des Ottomotors);

Dipl.-Ing. Walter Gollin (Induktive Zündanlage);

Dipl.-Ing. (FH) Thorsten Allgeier,
Dr. rer. nat. Richard Aumayer,
Dr. rer. nat. Frank Baumann,
Dipl.-Ing. Michael Bildstein,
Dr.-Ing. Jochen Faßnacht
(Bordnetze Hybridfahrzeuge);

M. Sc. Ian Faye,
Dr. rer. nat. Ulrich Gottwick,
Dr.-Ing. Hans-Peter Gröter (Elektroantriebe);

Dr. rer. nat. Werner Grünwald,
Dr.-Ing. Karsten Mann,
Dr.-Ing. Boyke Richter (Hybridantriebe);

Dipl.-Ing. Friedrich Kost
(Grundlagen der Fahrphysik);

Dipl.-Ing. Wulf Post
(Komponenten in Personenkraftwagen);

Dipl.-Ing. Clemens Schmucker,
Dipl.-Ing. Reinhard Meyer (Energiebordnetze);

Dipl.-Ing. Clemens Schmucker
(Elektrisches Energiemanagement).

Dipl.-Ing. Bernhard Mencher;
Dipl.-Ing. (BA) Ferdinand Reiter;
Dipl.-Ing. Andreas Glaser;
Dipl.-Ing. Walter Gollin;
Dipl.-Ing. (FH) Klaus Lerchenmüller;
Dipl.-Ing. Felix Landhäußer;
Dipl.-Ing. Doris Boebel,
Automotive Lighting Reutlingen GmbH;
Dipl.-Ing. Michael Hamm,
Automotive Lighting Reutlingen GmbH;
Dipl.-Ing. Tilman Spingler,
Automotive Lighting Reutlingen GmbH;
Dr.-Ing. Frank Niewels;
Dipl.-Ing. Thomas Ehret;
Dr.-Ing. Gero Nenninger;
Prof. Dr.-Ing. Peter Knoll;
Dr. rer. nat. Alfred Kutenberger
(Elektrische und elektronische Systeme im Kfz)

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

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.

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.

Eigenschaftskriterien

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

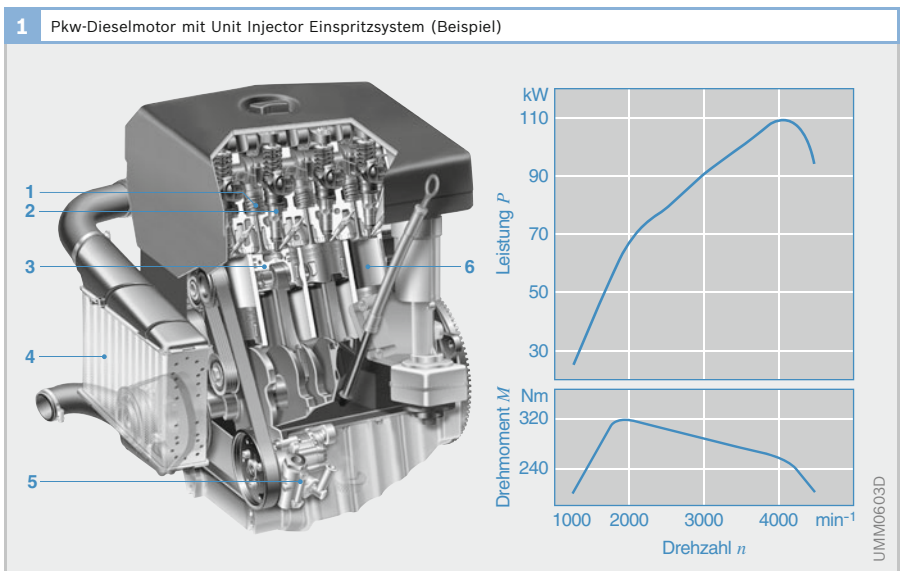
- ▶ Motorleistung,
- ▶ spezifische Leistung,
- ▶ Betriebssicherheit,
- ▶ Herstellungskosten,
- ▶ Wirtschaftlichkeit im Betrieb,
- ▶ Zuverlässigkeit,
- ▶ Umweltverträglichkeit,
- ▶ Komfort und
- ▶ Gefälligkeit (z. B. Motorraumdesign).

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 verändert die Einspritzmenge entsprechend der geforderten Last. Für diese An-



wendungen 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 Abgasturbolader 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.

2 Nkw-Dieselmotor mit Common Rail System (Beispiel)

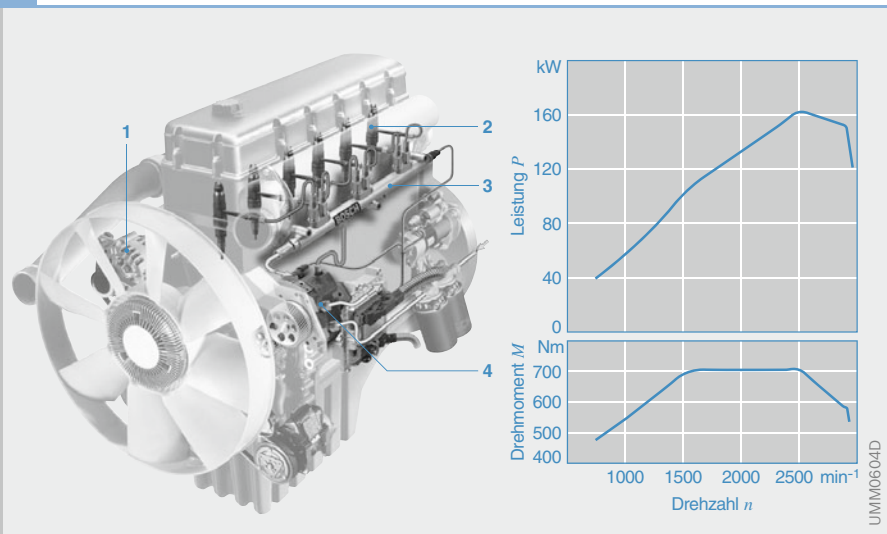


Bild 2

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

Schwere Nkw

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

3 Schiffsdiesel mit Einzelspritzpumpen (Beispiel)

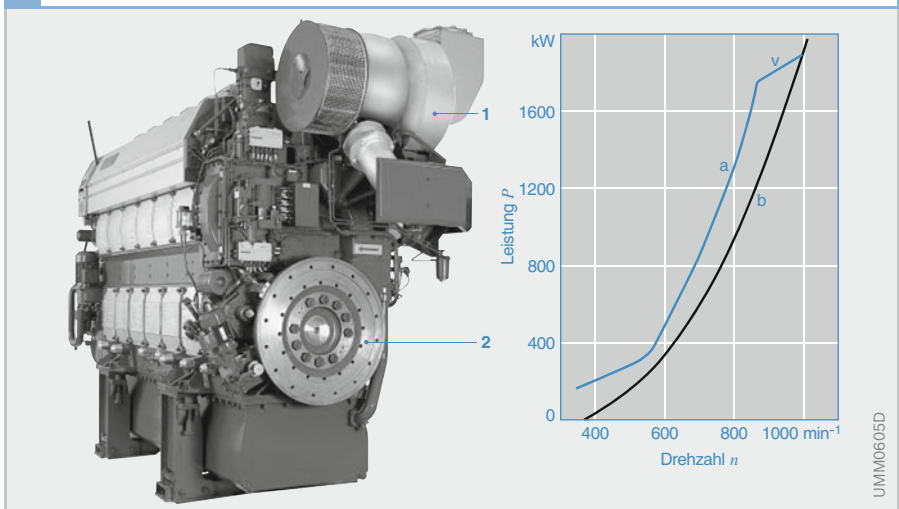


Bild 3

- 1 Lader
- 2 Schwungmasse
- a Motorleistung
- b Fahrwiderstandskurve
- v Bereich der Vollastbegrenzung

Andererseits finden auf äußerste Wirtschaftlichkeit im Dauerbetrieb ausgelegte 2-Takt-Großmotoren Verwendung. Mit diesen Langsamläufern ($n < 300 \text{ min}^{-1}$) werden auch die 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 m_{spez} [kg/kW]	spez. Kraft- stoffverbrauch 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_{spez} [Nm] ermittelt werden:

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

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

Grundlagen des Dieselmotors

Der Dieselmotor ist ein Selbstzündungs-motor mit innerer Gemischbildung. Die für die Verbrennung benötigte Luft wird im Brennraum hoch verdichtet. Dabei entstehen hohe Temperaturen, bei denen sich der eingespritzte Dieselmotorkraftstoff selbst entzündet. Die im Dieselmotorkraftstoff enthaltene chemische Energie wird vom Dieselmotor über Wärme in mechanische Arbeit umgesetzt.

Der Dieselmotor ist die Verbrennungskraftmaschine mit dem höchsten effektiven Wirkungsgrad (bei großen langsam laufenden Motoren mehr als 50 %). Der damit verbundene niedrige Kraftstoffverbrauch, die vergleichsweise schadstoffarmen Abgase und das vor allem durch Voreinspritzung verminderte Geräuschverhalten dem Dieselmotor zu großer Verbreitung.

Der Dieselmotor eignet sich besonders für die Aufladung. Sie erhöht nicht nur die Leistungsausbeute und verbessert den Wirkungsgrad, sondern vermindert zudem die Schadstoffe im Abgas und das Verbrennungsgeräusch.

Zur Reduzierung der NO_x -Emission bei Pkw und Nkw wird ein Teil des Abgases

in den Ansaugtrakt des Motors zurückgeleitet (Abgasrückführung). Um noch niedrigere NO_x -Emissionen zu erhalten, kann das zurückgeführte Abgas gekühlt werden.

Dieselmotoren können sowohl nach dem Zweitakt- als auch nach dem Viertakt-Prinzip arbeiten. Im Kraftfahrzeug kommen hauptsächlich Viertakt-Motoren zum Einsatz.

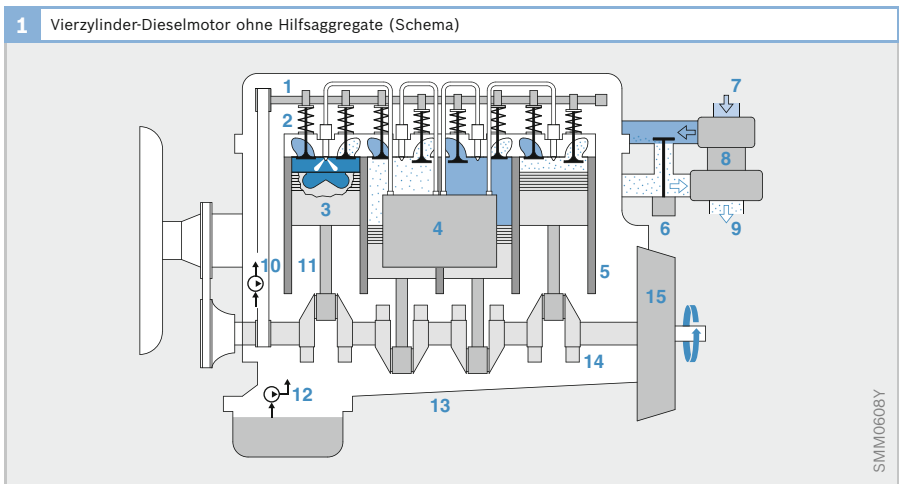
Arbeitsweise

Ein Dieselmotor enthält einen oder mehrere Zylinder. Angetrieben durch die Verbrennung des Luft-Kraftstoff-Gemischs führt ein Kolben (Bild 1, Pos. 3) je Zylinder (5) eine periodische Auf- und Abwärtsbewegung aus. Dieses Funktionsprinzip gab dem Motor den Namen „Hubkolbenmotor“.

Die Pleuelstange (11) setzt diese Hubbewegungen der Kolben in eine Rotationsbewegung der Pleuellager (14) um. Eine Schwungmasse (15) an der Pleuellager hält die Bewegung aufrecht und vermindert die Drehungleichförmigkeit, die durch die Verbrennungen in den einzelnen Kolben entsteht. Die Pleuellagerdrehzahl wird auch Motordrehzahl genannt.

Bild 1

- 1 Nockenwelle
- 2 Ventile
- 3 Kolben
- 4 Einspritzsystem
- 5 Zylinder
- 6 Abgasrückführung
- 7 Ansaugrohr
- 8 Lader (hier Abgasturbolader)
- 9 Abgasrohr
- 10 Kühlsystem
- 11 Pleuelstange
- 12 Schmiersystem
- 13 Motorblock
- 14 Pleuellager
- 15 Schwungmasse



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 um-

fasst beim Viertakt-Verfahren zwei Kurbelwellenumdrehungen. Die Nockenwellendrehzahl ist deshalb nur halb so groß wie die Kurbelwellendrehzahl. Das Untersetzungsverhältnis 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.

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 entflammaren Komponenten im Dieselmotorkraftstoff beträgt etwa 250°C.

Bild 3

- OT oberer Totpunkt des Kolbens
- UT unterer Totpunkt des Kolbens

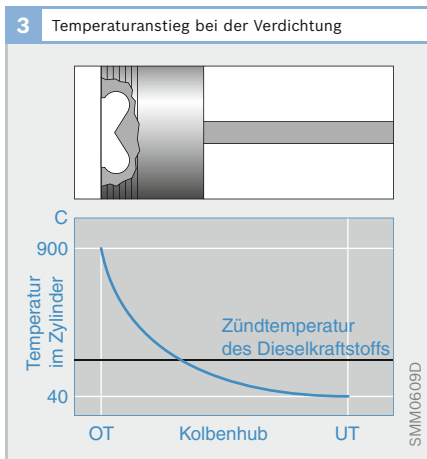
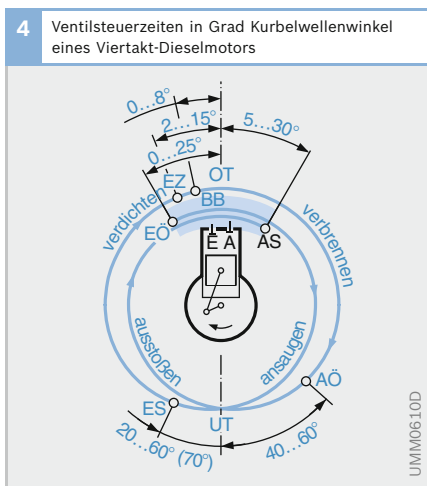


Bild 4

- 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



Drehmoment und Leistung

Drehmoment

Die Pleuelstange setzt die Hubbewegung des Kolbens in eine Rotationsbewegung der Kurbelwelle um. Die Kraft, mit der das expandierende Luft-Kraftstoff-Gemisch den Kolben nach unten treibt, wird so über den Hebelarm der Kurbelwelle in ein Drehmoment umgesetzt.

Das vom Motor abgegebene Drehmoment M hängt vom Mitteldruck p_e (mittlerer Kolben- bzw. Arbeitsdruck) ab. Es gilt:

$$M = p_e \cdot V_H / (4 \cdot \pi)$$

mit

V_H Hubraum des Motors und $\pi \approx 3,14$.

Der Mitteldruck erreicht bei aufgeladenen kleinen Dieselmotoren für Pkw Werte von 8...22 bar. Zum Vergleich: Ottomotoren erreichen Werte von 7...11 bar.

Das maximal erreichbare Drehmoment M_{max} , das der Motor liefern kann, ist durch die Konstruktion des Motors bestimmt (Größe des Hubraums, Aufladung usw.). Die Anpassung des Drehmoments an die Erfordernisse des Fahrbetriebs erfolgt im Wesentlichen durch die Veränderung der Luft- und Kraftstoffmasse sowie durch die Gemischbildung.

Das Drehmoment nimmt mit steigender Drehzahl n bis zum maximalen Drehmoment M_{max} zu (Bild 1). Mit höheren Drehzahlen fällt das Drehmoment wieder ab (maximal zulässige Motorbeanspruchung, gewünschtes Fahrverhalten, Getriebeauslegung).

Die Entwicklung in der Motortechnik zielt darauf ab, das maximale Drehmoment schon bei niedrigen Drehzahlen im Bereich von weniger als 2000 min^{-1} bereitzustellen, da in diesem Drehzahlbereich der Kraftstoffverbrauch am günstigsten ist und die Fahrbarkeit als angenehm empfunden wird (gutes Anfahrverhalten).

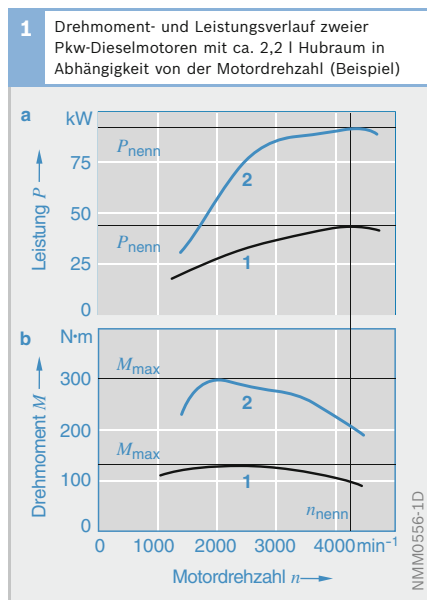
Leistung

Die vom Motor abgegebene Leistung P (erzeugte Arbeit pro Zeit) hängt vom Drehmoment M und der Motordrehzahl n ab. Die Motorleistung steigt mit der Drehzahl, bis sie bei der Nenndrehzahl n_{nenn} mit der Nennleistung P_{nenn} ihren Höchstwert erreicht. Es gilt der Zusammenhang:

$$P = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M$$

Bild 1a zeigt den Vergleich von Dieselmotoren der Baujahre 1968 und 1998 mit ihrem typischen Leistungsverlauf in Abhängigkeit von der Motordrehzahl.

Aufgrund der niedrigeren Maximaldrehzahlen haben Dieselmotoren eine geringere hubraumbezogene Leistung als Ottomotoren. Moderne Dieselmotoren für Pkw erreichen Nenndrehzahlen von 3500...5000 min^{-1} .



Motorwirkungsgrad

Der Verbrennungsmotor verrichtet Arbeit durch Druck-Volumen-Änderungen eines Arbeitsgases (Zylinderfüllung).

Der effektive Wirkungsgrad des Motors ist das Verhältnis aus eingesetzter Energie (Kraftstoff) und nutzbarer Arbeit. Er ergibt sich aus dem thermischen Wirkungsgrad eines idealen Arbeitsprozesses (Seiliger-Prozess) und den Verlustanteilen des realen Prozesses.

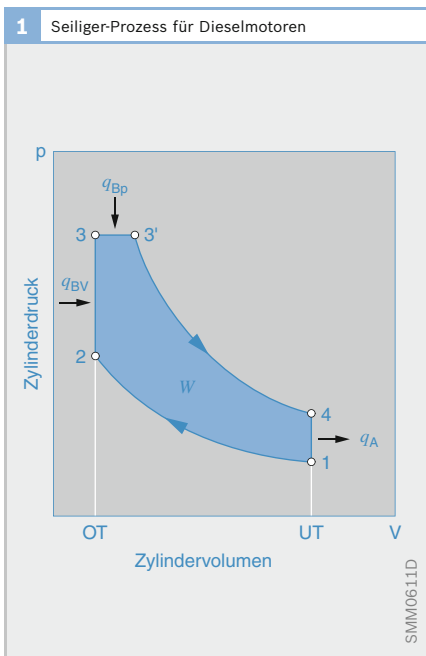
Seiliger-Prozess

Der Seiliger-Prozess kann als thermodynamischer Vergleichsprozess für den Hubkolbenmotor herangezogen werden und beschreibt die unter Idealbedingungen theoretisch nutzbare Arbeit. Für diesen idealen Prozess werden folgende Vereinfachungen angenommen:

- ▶ ideales Gas als Arbeitsmedium
- ▶ Gas mit konstanter spezifischer Wärme,
- ▶ keine Strömungsverluste beim Gaswechsel.

Bild 1

- 1-2 Isentrope Kompression
- 2-3 isochore Wärmezufuhr
- 3-3' isobare Wärmezufuhr
- 3'-4 isentrope Expansion
- 4-1 isochore Wärmeabfuhr
- OT oberer Totpunkt des Kolbens
- UT unterer Totpunkt des Kolbens
- q_A abfließende Wärmemenge beim Gaswechsel
- q_{Bp} Verbrennungswärme bei konstantem Druck
- q_{Bv} Verbrennungswärme bei konstantem Volumen
- W theoretische Arbeit



Der Zustand des Arbeitsgases kann durch die Angabe von Druck (p) und Volumen (V) beschrieben werden. Die Zustandsänderungen werden im p - V -Diagramm (Bild 1) dargestellt, wobei die eingeschlossene Fläche der Arbeit entspricht, die in einem Arbeitsspiel verrichtet wird.

Im Seiliger-Prozess laufen folgende Prozess-Schritte ab:

Isentrope Kompression (1-2)

Bei der isentropen Kompression (Verdichtung bei konstanter Entropie, d. h. ohne Wärmeaustausch) nimmt der Druck im Zylinder zu, während das Volumen abnimmt.

Isochore Wärmezufuhr (2-3)

Das Gemisch beginnt zu verbrennen. Die Wärmezufuhr (q_{Bv}) erfolgt bei konstantem Volumen (isochor). Der Druck nimmt dabei zu.

Isobare Wärmezufuhr (3-3')

Die weitere Wärmezufuhr (q_{Bp}) erfolgt bei konstantem Druck (isobar), während sich der Kolben abwärts bewegt und das Volumen zunimmt.

Isentrope Expansion (3'-4)

Der Kolben geht weiter zum unteren Totpunkt. Es findet kein Wärmeaustausch mehr statt. Der Druck nimmt ab, während das Volumen zunimmt.

Isochore Wärmeabfuhr (4-1)

Beim Gaswechsel wird die Restwärme ausgestoßen (q_A). Dies geschieht bei konstantem Volumen (unendlich schnell und vollständig). Damit ist der Ausgangszustand wieder erreicht und ein neuer Arbeitszyklus beginnt.

p - V -Diagramm des realen Prozesses

Um die beim realen Prozess geleistete Arbeit zu ermitteln, wird der Zylinderdruckverlauf gemessen und im p - V -Diagramm dargestellt (Bild 2). Die Fläche der oberen

2 Realer Prozess eines aufgeladenen Dieselmotors im p - V -Indikator-Diagramm (aufgenommen mit Drucksensor)

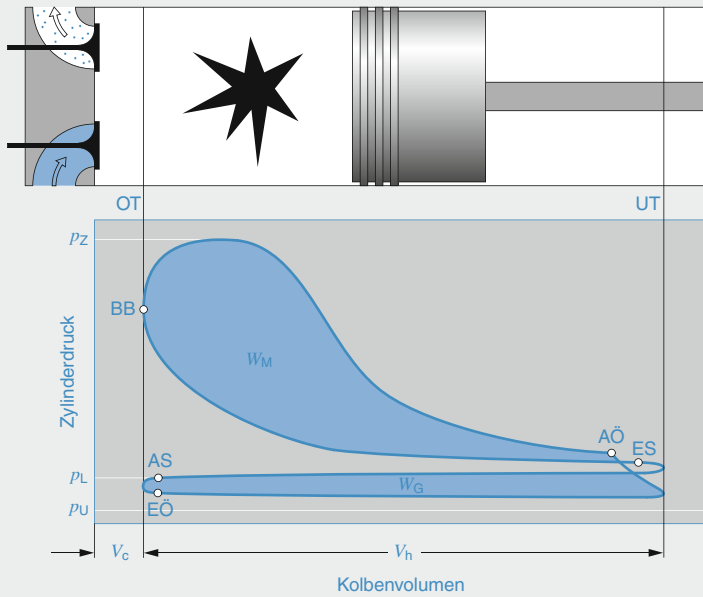


Bild 2

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

- p_U Umgebungsdruck
- p_L Ladedruck
- p_z maximaler Zylinderdruck
- V_c Kompressionsvolumen
- V_h Hubvolumen
- W_M indizierte Arbeit
- W_G Arbeit beim Gaswechsel (Lader)

SMM0612D

3 Druckverlauf eines aufgeladenen Dieselmotors im Druck-Kurbelwellen-Diagramm (p - α -Diagramm)

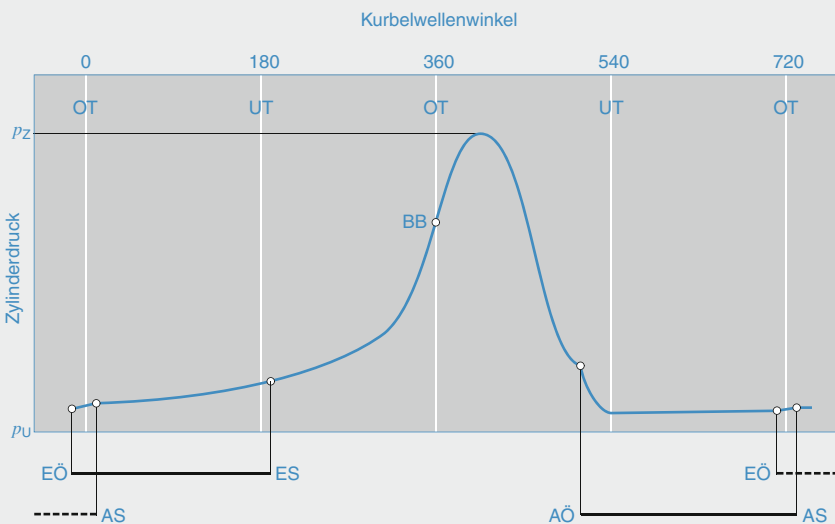


Bild 3

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

- p_U Umgebungsdruck
- p_L Ladedruck
- p_z maximaler Zylinderdruck

SMM0613D

Kurve entspricht der am Zylinderkolben anstehenden Arbeit.

Hierzu muss bei Ladermotoren die Fläche des Gaswechsels (W_G) addiert werden, da die durch den Lader komprimierte Luft den Kolben in Richtung unteren Totpunkt drückt.

Die durch den Gaswechsel verursachten Verluste werden in vielen Betriebspunkten durch den Lader überkompensiert, sodass sich ein positiver Beitrag zur geleisteten Arbeit ergibt.

Die Darstellung des Drucks über dem Kurbelwellenwinkel (Bild 3, vorherige Seite) findet z. B. bei der thermodynamischen Druckverlaufsanalyse Verwendung.

Wirkungsgrad

Der effektive Wirkungsgrad des Dieselmotors ist definiert als:

$$\eta_e = \frac{W_e}{W_B}$$

W_e ist die an der Kurbelwelle effektiv verfügbare Arbeit.

W_B ist der Heizwert des zugeführten Brennstoffs.

Der effektive Wirkungsgrad η_e lässt sich darstellen als Produkt aus dem thermischen Wirkungsgrad des Idealprozesses und weiteren Wirkungsgraden, die den Einflüssen des realen Prozesses Rechnung tragen:

$$\eta_e = \eta_{th} \cdot \eta_g \cdot \eta_b \cdot \eta_m = \eta_i \cdot \eta_m$$

η_{th} : Thermischer Wirkungsgrad

η_{th} ist der thermische Wirkungsgrad des Seiliger-Prozesses. Er berücksichtigt die im Idealprozess auftretenden Wärmeverluste und hängt im Wesentlichen vom Verdichtungsverhältnis und von der Luftzahl ab.

Da der Dieselmotor gegenüber dem Ottomotor mit höherem Verdichtungsverhältnis und mit hohem Luftüberschuss be-

trieben wird, erreicht er einen höheren Wirkungsgrad.

η_g : Gütegrad

η_g gibt die im realen Hochdruck-Arbeitsprozess erzeugte Arbeit im Verhältnis zur theoretischen Arbeit des Seiliger-Prozesses an.

Die Abweichungen des realen vom idealen Prozess ergeben sich im Wesentlichen durch Verwenden eines realen Arbeitsgases, endliche Geschwindigkeit der Wärmezufuhr, Lage der Wärmezufuhr, Wandwärmeverluste und Strömungsverluste beim Ladungswechsel.

η_b : Brennstoffumsetzungsgrad

η_b berücksichtigt die Verluste, die aufgrund der unvollständigen Verbrennung des Kraftstoffs im Zylinder auftreten.

η_m : Mechanischer Wirkungsgrad

η_m erfasst Reibungsverluste und Verluste durch den Antrieb der Nebenaggregate. Die Reib- und Antriebsverluste steigen mit der Motordrehzahl an. Die Reibungsverluste setzen sich bei Nenndrehzahl wie folgt zusammen:

- ▶ Kolben und Kolbenringe (ca. 50%),
- ▶ Lager (ca. 20%),
- ▶ Ölpumpe (ca. 10%),
- ▶ Kühlmittelpumpe (ca. 5%),
- ▶ Ventiltrieb (ca. 10%),
- ▶ Einspritzpumpe (ca. 5%).

Ein mechanischer Lader muss ebenfalls hinzugezählt werden.

η_i : Indizierter Wirkungsgrad

Der indizierte Wirkungsgrad gibt das Verhältnis der am Zylinderkolben anstehenden, „indizierten“ Arbeit W_i zum Heizwert des eingesetzten Kraftstoffs an.

Die effektiv an der Kurbelwelle zur Verfügung stehende Arbeit W_e ergibt sich aus der indizierten Arbeit durch Berücksichtigung der mechanischen Verluste:

$$W_e = W_i \cdot \eta_m.$$

Betriebszustände

Start

Das Starten eines Motors umfasst die Vorgänge: Anlassen, Zünden und Hochlaufen bis zum Selbstlauf.

Die im Verdichtungsstakt erhitzte Luft muss den eingespritzten Kraftstoff zünden (Brennbeginn). Die erforderliche Mindestzündtemperatur für Dieseldieselkraftstoff beträgt ca. 250 °C.

Diese Temperatur muss auch unter ungünstigen Bedingungen erreicht werden. Niedrige Drehzahl, tiefe Außentemperaturen und ein kalter Motor führen zu verhältnismäßig niedriger Kompressionsendtemperatur, denn:

- ▶ Je niedriger die Motordrehzahl, umso geringer ist der Enddruck der Kompression und dementsprechend auch die Endtemperatur (Bild 1). Die Ursache dafür sind Leckageverluste, die an den Kolbenringspalten zwischen Kolben und Zylinderwand auftreten, wegen anfänglich noch fehlender Wärmedehnung sowie des noch nicht ausgebildeten Ölfilms.

Das Maximum der Kompressionstemperatur liegt wegen der Wärmeverluste während der Verdichtung um einige Grad vor OT (thermodynamischer Verlustwinkel, Bild 2).

- ▶ Bei kaltem Motor ergeben sich während des Verdichtungsakts größere Wärmeverluste über die Brennraumoberfläche. Bei Kammermotoren (IDI) sind diese Verluste wegen der größeren Oberfläche besonders hoch.
- ▶ Die Triebwerkreibung ist bei niedrigeren Temperaturen aufgrund der höheren Motorölviskosität höher als bei Betriebstemperatur. Dadurch und auch wegen niedriger Batteriespannung werden nur relativ kleine Starterdrehzahlen erreicht.
- ▶ Bei Kälte ist die Starterdrehzahl wegen der absinkenden Batteriespannung besonders niedrig.

Um während der Startphase die Temperatur im Zylinder zu erhöhen, werden folgende Maßnahmen ergriffen:

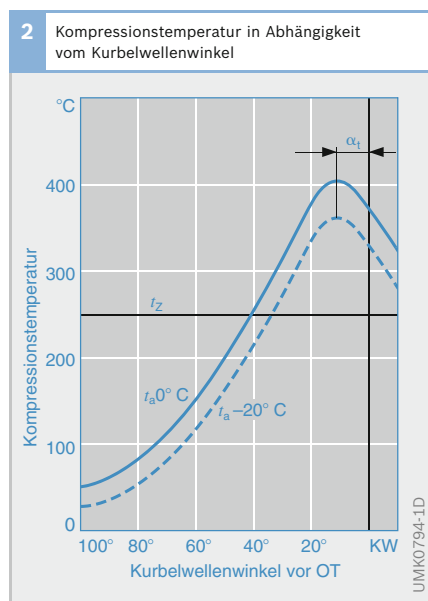
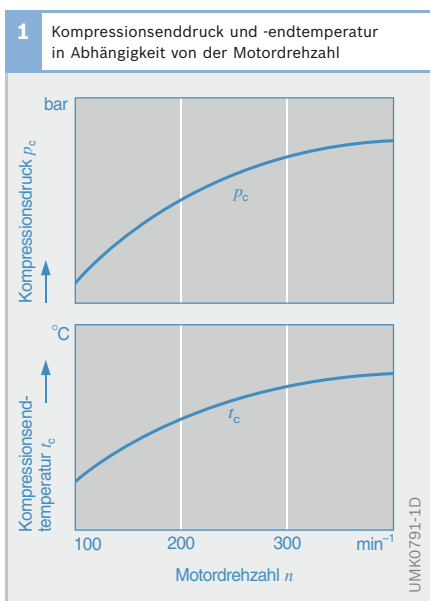


Bild 2

t_a Außentemperatur
 t_z Zündtemperatur des Dieseldieselkraftstoffs
 α_t thermodynamischer Verlustwinkel

$n = 200 \text{ min}^{-1}$

Kraftstoffaufheizung

Mit einer Filter- oder direkten Kraftstoffaufheizung (Bild 3) kann das Ausscheiden von Paraffin-Kristallen bei niedrigen Temperaturen (in der Startphase und bei niedrigen Außentemperaturen) vermieden werden.

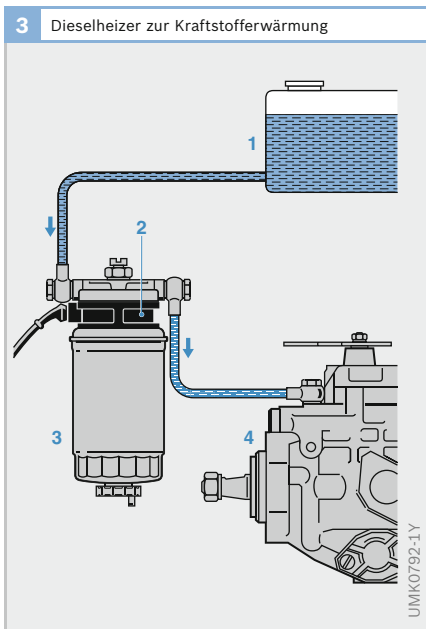


Bild 3
 1 Kraftstoffbehälter
 2 Dieselheizer
 3 Kraftstofffilter
 4 Einspritzpumpe

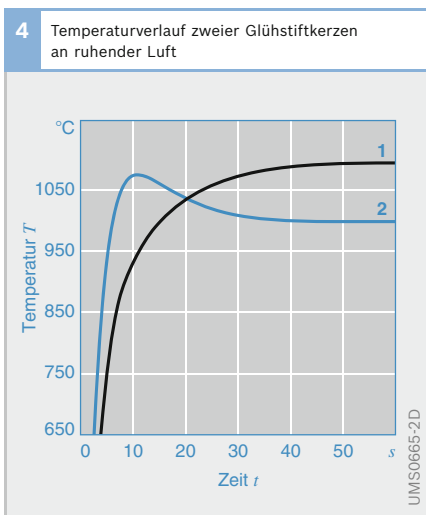


Bild 4
 Regelwendelmaterial:
 1 Nickel (herkömmliche Glühstiftkerze S-RSK)
 2 CoFe-Legierung (Glühkerze der Generation GLP2)

Starthilfesysteme

Bei Direkteinspritzmotoren (DI) für Pkw und bei Kammermotoren (IDI) generell wird in der Startphase das Luft-Kraftstoff-Gemisch im Brennraum (bzw. in der Vor- oder Wirbelkammer) durch Glühstiftkerzen erwärmt. Bei Direkteinspritzmotoren für Nkw wird die Ansaugluft vorgewärmt. Beide Starthilfesysteme dienen der Verbesserung der Kraftstoffverdampfung und Gemischaufbereitung und somit dem sicheren Entflammen des Luft-Kraftstoff-Gemischs.

Glühkerzen neuerer Generation benötigen nur eine Vorglühdauer von wenigen Sekunden (Bild 4) und ermöglichen so einen schnellen Start. Die niedrigere Nachglühtemperatur erlaubt zudem längere Nachglühzeiten. Dies reduziert sowohl die Schadstoff- als auch die Geräuschemissionen in der Warmlaufphase des Motors.

Einspritzanpassung

Eine Maßnahme zur Startunterstützung ist die Zugabe einer Kraftstoff-Startmenge zur Kompensation von Kondensations- und Leckverlusten des kalten Motors und zur Erhöhung des Motordrehmoments in der Hochlaufphase.

Die Frühverstellung des Einspritzbeginns während der Warmlaufphase dient zum Ausgleich des längeren Zündverzugs bei niedrigen Temperaturen und zur Sicherstellung der Zündung im Bereich des oberen Totpunkts, d. h. bei höchster Verdichtungs- und Zündtemperatur.

Der optimale Spritzbeginn muss mit enger Toleranz erreicht werden. Zu früh eingespritzter Kraftstoff hat aufgrund des noch zu geringen Zylinderinnendrucks (Kompressionsdrucks) eine größere Eindringtiefe und schlägt sich an den kalten Zylinderwänden nieder. Dort verdampft er nur zum geringen Teil, da zu diesem Zeitpunkt die Ladungstemperatur noch niedrig ist.

Bei zu spät eingespritztem Kraftstoff erfolgt die Zündung erst im Expansionshub, und der Kolben wird nur noch wenig beschleunigt oder es kommt zu Verbrennungsaussetzern.

Nulllast

Nulllast bezeichnet alle Betriebszustände des Motors, bei denen der Motor nur seine innere Reibung überwindet. Er gibt kein Drehmoment ab. Die Fahrpedalstellung kann beliebig sein. Alle Drehzahlbereiche bis hin zur Abregeldrehzahl sind möglich.

Leerlauf

Leerlauf bezeichnet die unterste Nulllastdrehzahl. Das Fahrpedal ist dabei nicht betätigt. Der Motor gibt kein Drehmoment ab, er überwindet nur die innere Reibung. In einigen Quellen wird der gesamte Nulllastbereich als Leerlauf bezeichnet. Die obere Nulllastdrehzahl (Abregeldrehzahl) wird dann obere Leerlaufdrehzahl genannt.

Volllast

Bei Volllast ist das Fahrpedal ganz durchgetreten oder die Volllastmengenbegrenzung wird betriebspunktabhängig von der Motorsteuerung geregelt. Die maximal mögliche Kraftstoffmenge wird eingespritzt und der Motor gibt stationär sein maximales Drehmoment ab. Instationär (ladedruckbegrenzt) gibt der Motor das mit der zur Verfügung stehenden Luft maximal mögliche (niedrigere) Volllast-Drehmoment ab. Alle Drehzahlbereiche von der Leerlaufdrehzahl bis zur Nenndrehzahl sind möglich.

Teillast

Teillast umfasst alle Bereiche zwischen Nulllast und Volllast. Der Motor gibt ein Drehmoment zwischen Null und dem maximal möglichen Drehmoment ab.

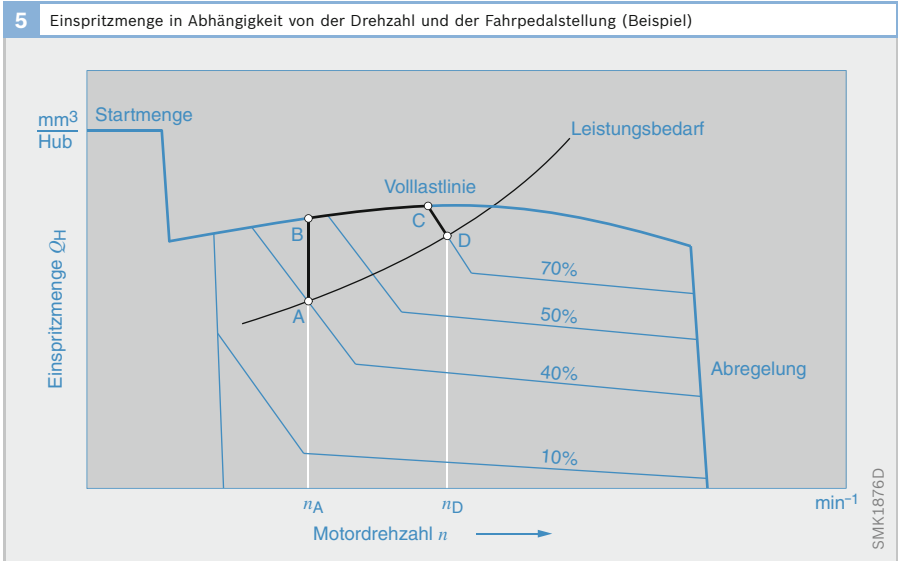
Unterer Teillastbereich

In diesem Betriebsbereich sind die Verbrauchswerte im Vergleich zum Ottomotor besonders günstig. Das früher beanstandete „nageln“ – besonders bei kaltem Motor – tritt bei Dieselmotoren mit Voreinspritzung praktisch nicht mehr auf.

Die Kompressions-Endtemperatur wird bei niedriger Drehzahl – wie im Abschnitt „Start“ beschrieben – und kleiner Last geringer. Im Vergleich zur Volllast ist der Brennraum relativ kalt (auch bei betriebswarmem Motor), da die Energiezufuhr und damit die Temperaturen gering sind. Nach einem Kaltstart erfolgt die Aufheizung des Brennraums bei unterer Teillast nur langsam. Dies trifft insbesondere für Vor- und Wirbelkammermotoren zu, weil bei diesen die Wärmeverluste aufgrund der großen Oberfläche besonders hoch sind.

Bei kleiner Last und bei der Voreinspritzung werden nur wenige mm^3 Kraftstoff pro Einspritzung zugemessen. In diesem Fall werden besonders hohe Anforderungen an die Genauigkeit von Einspritzbeginn und Einspritzmenge gestellt. Ähnlich wie beim Start entsteht die benötigte Verbrennungstemperatur auch bei Leerlaufdrehzahl nur in einem kleinen Kolbenhubbereich bei OT. Der Spritzbeginn ist hierauf sehr genau abgestimmt.

Während der Zündverzugsphase darf nur wenig Kraftstoff eingespritzt werden, da zum Zündzeitpunkt die im Brennraum vorhandene Kraftstoffmenge über den plötzlichen Druckanstieg im Zylinder entscheidet. Je höher dieser ist, umso lauter wird das Verbrennungsgeräusch. Eine Voreinspritzung von ca. 1 mm^3 (für Pkw) macht den Zündverzug der Haupteinspritz-



zung fast zu Null und verringert damit wesentlich das Verbrennungsgeräusch.

Schubbetrieb

Im Schubbetrieb wird der Motor von außen über den Triebstrang angetrieben (z. B. bei Bergabfahrt). Es wird kein Kraftstoff eingespritzt (Schubabschaltung).

Stationärer Betrieb

Das vom Motor abgegebene Drehmoment entspricht dem über die Fahrpedalstellung angeforderten Drehmoment. Die Drehzahl bleibt konstant.

Instationärer Betrieb

Das vom Motor abgegebene Drehmoment entspricht nicht dem geforderten Drehmoment. Die Drehzahl verändert sich.

Übergang zwischen den Betriebszuständen

Ändert sich die Last, die Motordrehzahl oder die Fahrpedalstellung, verändert der Motor seinen Betriebszustand (z. B. Motordrehzahl, Drehmoment).

Das Verhalten eines Motors kann mit Kennfeldern beschrieben werden. Das Kennfeld in Bild 5 zeigt an einem Beispiel, wie sich die Motordrehzahl ändert, wenn die Fahrpedalstellung von 40 % auf 70 % verändert wird. Ausgehend vom Betriebspunkt A wird über die Vollast (B-C) der neue Teillast-Betriebspunkt D erreicht. Dort sind der Leistungsbedarf und die vom Motor abgegebene Leistung gleich. Die Drehzahl erhöht sich dabei von n_A auf n_D .