

Konrad Reif (Hrsg.)

Dieselmotor-Management im Überblick

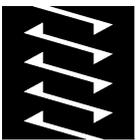
Konrad Reif (Hrsg.)

# Dieselmotor- Management im Überblick

einschließlich Abgastechnik

Mit 172 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.

Der Inhalt dieses Buches erschien bisher unter den Titeln:  
Dieselmotor-Management im Überblick  
Abgastechnik für Dieselmotoren  
herausgegeben von der Robert Bosch GmbH, Plochingen

1. Auflage 2010

Alle Rechte vorbehalten  
© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2010

Lektorat: Christian Kannenberg | Elisabeth Lange

Vieweg+Teubner Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.  
Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.  
[www.viewegteubner.de](http://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: MercedesDruck, Berlin  
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.  
Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-1313-8

# Vorwort

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 tiefe 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 Fachleuten verfasst wurden, die in den Entwicklungsabteilungen von Bosch an genau den dargestellten Themen arbeiten. Die Schriftenreihe ist so gestaltet, dass sich auch ein Leser zurechtfindet, für den das Thema neu ist. Die Kapitel sind in einer Zeit lesbar, die auch ein sehr beschäftigter Arbeitnehmer dafür aufbringen kann.

Die Basis der Reihe sind die fünf bewährten, gebundenen Fachbücher. Sie ermöglichen einen umfassenden Einblick in das jeweilige Themengebiet. Anwendungsbezogene Darstellungen, anschauliche und aufwendig gestaltete Bilder ermöglichen den leichten Einstieg. Für den Bedarf an inhaltlich enger zugeschnittenen Themenbereichen bietet die siebenbändige broschierte Reihe das richtige Angebot. Mit deutlich reduziertem Umfang, aber gleicher detaillierter Darstellung, ist das Hintergrundwissen zu konkreten Aufgabenstellungen professionell erklärt. Die schnelle Bereitstellung zielgerichteter Information zu thematisch abgegrenzten Wissensgebieten sind das Kennzeichen der 92 Einzelkapitel, die als pdf-Download zur sofortigen Nutzung bereitstehen. Eine individuelle Auswahl ermöglicht die Zusammenstellung nach eigenem Bedarf.

Im Laufe der Neukonzeption dieser Schriftenreihe ist es nicht möglich, alle Produkte gleichzeitig inhaltlich neu zu bearbeiten. Dies geschieht demnach Zug um Zug.

Der vorliegende Band „Dieselmotor-Management im Überblick“ behandelt Einsatzgebiete und Grundlagen des Dieselmotors, Kraftstoffe, Füllungssteuerung, Einspritzsysteme einschließlich zugehörige Pumpen und Düsen, Regelung, Starthilfesysteme, innermotorische Emissionsminderung, Abgasnachbehandlung, Abgasgesetzgebung, Abgasmesstechnik und Diagnose. Er setzt sich aus den früheren gelben Heften „Dieselmotor-Management im Überblick“ und „Abgastechnik für Dieselmotoren“ in der bisherigen Form zusammen. Eine inhaltliche Neubearbeitung wird folgen. Neu erstellt wurde das Stichwortverzeichnis, um die Inhalte dieses Buchs rasch zu erschließen.

# Inhaltsverzeichnis

## Einsatzgebiete der Dieselmotoren

Eigenschaftskriterien .....	10
Anwendungen .....	10
Motorkenndaten .....	13

## Grundlagen des Dieselmotors

Arbeitsweise .....	14
Drehmoment und Leistung .....	17
Motorwirkungsgrad .....	18
Betriebszustände .....	21
Betriebsbedingungen .....	25
Einspritzsystem .....	27
Brennräume .....	28

## Kraftstoffe

Dieselmotorkraftstoff .....	32
Alternative Kraftstoffe .....	38

## Systeme zur Füllungssteuerung

Übersicht .....	40
Aufladung .....	41
Drallklappen .....	50
Motoransaugluftfilter .....	51

## Grundlagen der Dieseleinspritzung

Gemischverteilung .....	54
Parameter der Einspritzung .....	56
Düsen- und Düsenhalter-Ausführung .....	65

## Diesel-Einspritzsysteme im Überblick

Bauarten .....	66
----------------	----

## Systemübersicht der Reiheneinspritzpumpen

Anwendungsgebiete .....	72
Ausführungen .....	72
Aufbau .....	73
Regelung .....	73

## Systemübersicht der Verteilereinspritzpumpen

Anwendungsgebiete .....	76
Ausführungen .....	76
Kantengesteuerte Systeme .....	78
Magnetventilgesteuerte Systeme .....	80

### Systemübersicht der Einzelzylinder-Systeme

Einzeleinspritzpumpen PF .....	84
Unit Injector System UIS und Unit Pump System UPS .....	86
Systembild UIS für Pkw .....	88
Systembild UIS/UPS für Nkw .....	90

### Systemübersicht Common Rail

Anwendungsgebiete .....	92
Aufbau .....	93
Arbeitsweise .....	94
Common Rail System für Pkw .....	98
Common Rail System für Nkw .....	103

### Elektronische Dieselregelung EDC

Systemübersicht .....	106
Datenverarbeitung .....	108
Regelung der Einspritzung .....	110
Regelung und Ansteuerung von Aktoren .....	112
Ersatzfunktionen .....	113

### Starthilfesysteme

Glühsysteme .....	114
-------------------	-----

### Einspritzdüsen

Lochdüsen .....	120
-----------------	-----

### Düsenhalter

Übersicht .....	124
-----------------	-----

### Abgasnachbehandlung

NO <sub>x</sub> -Speicherkatalysator .....	127
Selektive katalytische Reduktion von Stickoxiden .....	129
Partikelfilter DPF .....	132
Diesel-Oxidationskatalysator .....	136

### Innere motorische Emissionsminderung

Brennverfahren .....	139
Weitere Einflüsse auf die Schadstoffemission .....	141
Entwicklung homogener Brennverfahren .....	143
Dieseleinspritzung .....	144
Abgasrückführung .....	156
Kurbelgehäuseentlüftung .....	159

**Abgasemission**

Übersicht .....	160
Hauptbestandteile .....	160
Nebenbestandteile (Schadstoffe) .....	162

**Abgasgesetzgebung**

Übersicht .....	164
CARB-Gesetzgebung (Pkw/LDT) .....	166
EPA-Gesetzgebung (Pkw/LDT) .....	170
EU-Gesetzgebung (Pkw/LDT) .....	172
Japan-Gesetzgebung (Pkw/LDT) .....	174
USA-Gesetzgebung (schwere Nkw) .....	175
EU-Gesetzgebung (schwere Nkw) .....	176
Japan-Gesetzgebung (schwere Nkw) .....	178
USA-Testzyklen für Pkw und LDT .....	179
Europäischer Testzyklus für Pkw und LDT .....	181
Japan-Testzyklus für Pkw und LDT .....	181
Testzyklen für schwere Nkw .....	182

**Abgas-Messtechnik**

Abgasprüfung für die Typzulassung .....	184
Abgas-Messgeräte .....	187
Abgasmessung in der Motoren-Entwicklung .....	189
Abgasuntersuchung (Trübungsmessung) .....	191

**Diagnose**

Überwachung im Fahrbetrieb (On-Board-Diagnose) .....	192
On Board-Diagnostic System für Pkw und leichte Nkw .....	195
On Board Diagnostic System für schwere Nkw .....	202
Abkürzungen .....	204
Sachwortverzeichnis .....	207

# Autorenverzeichnis

## Dieselmotor-Management im Überblick

### Autoren und Mitwirkende

Dr.-Ing. Herbert Schumacher (Einsatzgebiete der Dieselmotoren);  
 Dr.-Ing. Thorsten Raatz (Grundlagen des Dieselmotors);  
 Dipl.-Ing. Hermann Grieshaber (Grundlagen des Dieselmotors, Grundlagen der Dieseleinspritzung);  
 Dr. rer. nat. Jörg Ullmann (Kraftstoffe);  
 Dr.-Ing. Thomas Wintrich (Systeme zur Füllungssteuerung);  
 Dipl.-Betriebsw. Meike Keller (Motoransaugfilter);  
 Dipl.-Ing. Jens Olaf Stein (Grundlagen der Dieseleinspritzung);  
 Henri Bruognolo (Reiheneinspritzpumpen);  
 Dipl.-Ing. (FH) Helmut Simon (Verteilereinspritzpumpen);  
 Dr. tech. Theodor Stipek,  
 Dipl.-Ing. Joachim Lackner (Einzelzylindersysteme für Großmotoren);  
 Dipl.-Ing. (HU) Carlos Alvarez-Avila,  
 Dipl.-Ing. Roger Potschin (UIS/UPS);  
 Dipl.-Ing. Felix Landhäuser (Common Rail, Elektronische Dieselregelung);  
 Dr. rer. nat. Wolfgang Dreßler (Starhilfesysteme);  
 Dipl.-Ing. Thomas Kügler (Einspritzdüsen, Düsenhalter);  
 Dr. rer. nat. Norbert Breuer,  
 Dr. rer. nat. Thomas Hauber,  
 Priv.-Doz. Dr.-Ing. Johannes Schaller,  
 Dr. Ralf Schernewski,  
 Dipl.-Ing. Stefan Stein,  
 Dr.-Ing. Ralf Wirth (Abgasnachbehandlung)

## Abgastechnik für Dieselmotoren

### Autoren

Dr.-Ing. Thorsten Raatz,  
 Dipl.-Ing. (FH) Hermann Grieshaber (Grundlagen Dieselmotor),  
 Dr.-Ing. Thomas Wintrich,  
 Dr.-Ing. Michael Durst, Filterwerk Mann + Hummel, Ludwigsburg,  
 Dipl.-Betriebsw. Meike Keller (Füllungssteuerung),  
 Dipl.-Ing. Jens Olaf Stein (innermotorische Emissionsminderung),  
 Dr. rer. nat. Norbert Breuer,  
 Priv.-Doz. Dr.-Ing. Johannes K. Schaller,  
 Dr. rer. nat. Thomas Hauber,  
 Dr.-Ing. Ralf Wirth,  
 Dipl.-Ing. Stefan Stein (Abgasnachbehandlung),  
 Dr. rer. nat. Jörg Ullmann (Kraftstoffe),  
 Dr.-Ing. Stefan Becher,  
 Dr.-Ing. Torsten Eggert (Abgasgesetzgebung),  
 Dipl.-Ing. Andreas Kreh,  
 Dipl.-Ing. Bernd Hinner,  
 Dipl.-Ing. Rainer Pelka (Abgas-Messtechnik),  
 Dr.-Ing. Günter Driedger,  
 Dr. rer. nat. Walter Lehle,  
 Dipl.-Ing. Wolfgang Schauer (Diagnose)

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

# Einsatzgebiete der Dieselmotoren

**Kein anderer Verbrennungsmotor wird so vielfältig eingesetzt wie der Dieselmotor<sup>1)</sup>. 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.

<sup>1)</sup> 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):

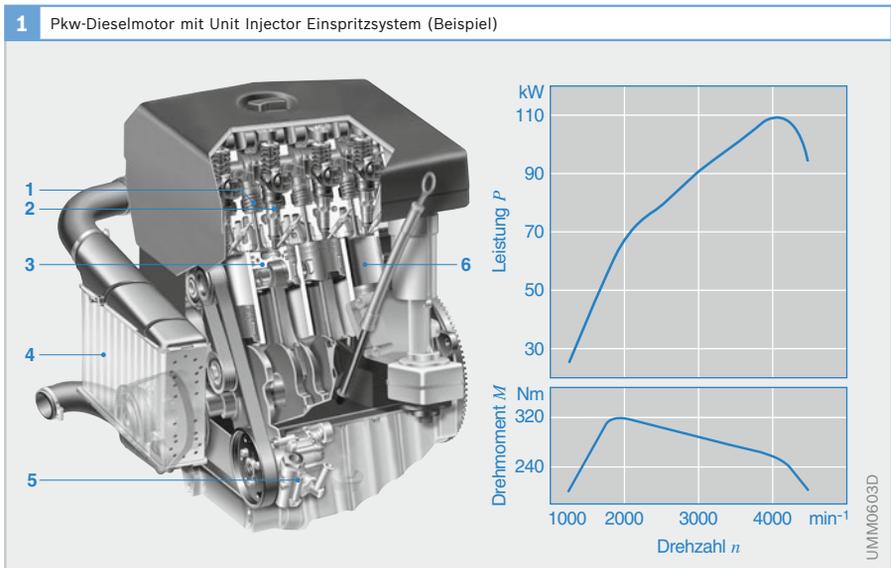
- ▶ Motorleistung,
- ▶ spezifische Leistung,
- ▶ Betriebssicherheit,
- ▶ Herstellungskosten,
- ▶ Wirtschaftlichkeit im Betrieb,
- ▶ Zuverlässigkeit,
- ▶ Umweltverträglichkeit,
- ▶ Komfort und
- ▶ Gefälligkeit (z. B. Motorraumdesign).

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  $5500 \text{ min}^{-1}$  eingesetzt. Das Spektrum reicht vom 10-Zylinder mit  $5000 \text{ cm}^3$  in Limousinen bis zum 3-Zylinder  $800 \text{ cm}^3$ -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)

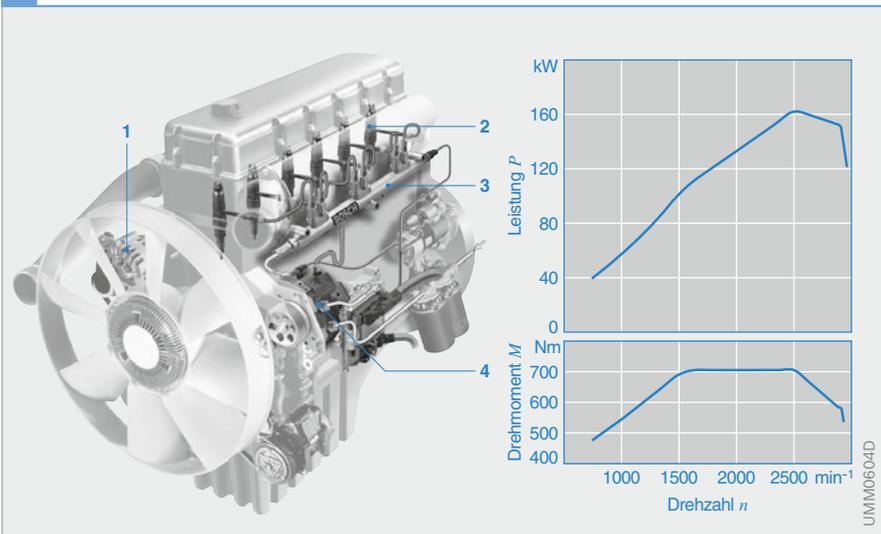


Bild 2

- 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<sup>-1</sup>.

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.

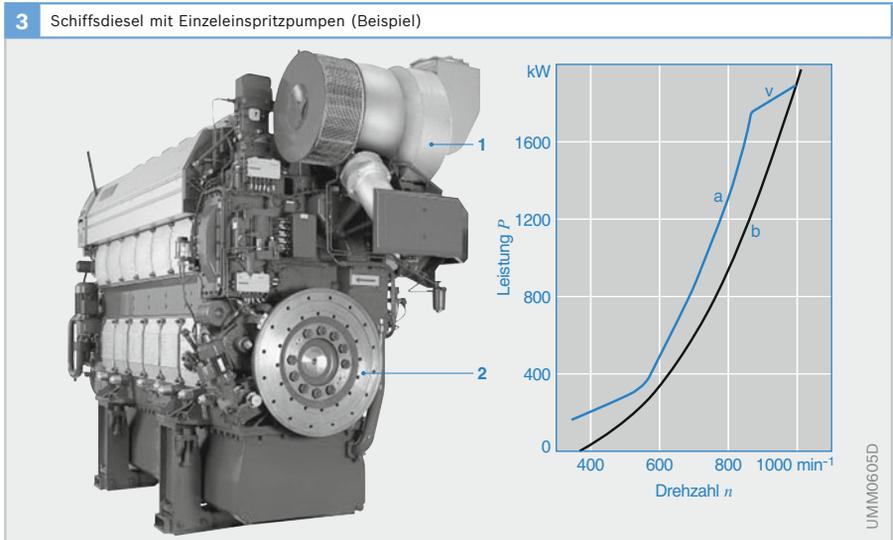
Bei Bau- und Landmaschinen kommen vielfach noch Einspritzsysteme mit mechanischer Regelung zum Einsatz. Im Gegensatz zu allen anderen Einsatzbereichen, in denen vorwiegend wassergekühlte Motoren verwendet werden, hat bei den Bau- und Landmaschinen die robuste und einfach realisierbare Luftkühlung noch 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...1500 min<sup>-1</sup> 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 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  $160^\circ\text{C}$  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 $n_{\text{Nenn}}$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	Verdichtungs- verhältnis $\varepsilon$	Mitteldruck <sup>1)</sup> $p_e$ [bar]	spezifische Leistung $p_{e, \text{spez}}$ [kW/l]	Leistungs- gewicht $m_{\text{spez}}$ [kg/kW]	spez. Kraft- stoffverbrauch <sup>2)</sup> $b_e$ [g/kWh]
<b>Dieselmotoren</b>						
IDI <sup>3)</sup> Pkw Saugmotoren	3500...5000	20...24	7...9	20...35	5...3	320...240
IDI <sup>3)</sup> Pkw mit Aufladung	3500...4500	20...24	9...12	30...45	4...2	290...240
DI <sup>4)</sup> Pkw Saugmotoren	3500...4200	19...21	7...9	20...35	5...3	240...220
DI <sup>4)</sup> Pkw mit Aufladung u. LLK <sup>5)</sup>	3600...4400	16...20	8...22	30...60	4...2	210...195
DI <sup>4)</sup> Nkw Saugmotoren	2000...3500	16...18	7...10	10...18	9...4	260...210
DI <sup>4)</sup> Nkw mit Aufladung	2000...3200	15...18	15...20	15...25	8...3	230...205
DI <sup>4)</sup> Nkw mit Aufladung u. LLK <sup>5)</sup>	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
<b>Ottomotoren</b>						
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**

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

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

- <sup>2)</sup> Bestverbrauch  
<sup>3)</sup> IDI Indirect Injection (Kammernmotoren)  
<sup>4)</sup> DI Direct Injection (Direkteinspritzer)  
<sup>5)</sup> 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 Geräusch verhalten 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  $\text{NO}_x$ -Emission bei Pkw und Nkw wird ein Teil des Abgases

in den Ansaugtrakt des Motors zurückgeleitet (Abgasrückführung). Um noch niedrigere  $\text{NO}_x$ -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.

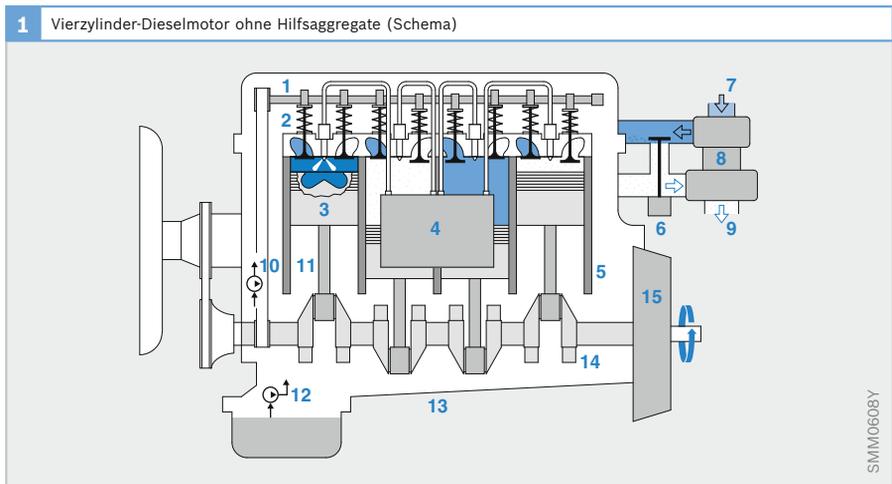
## Arbeitsweise

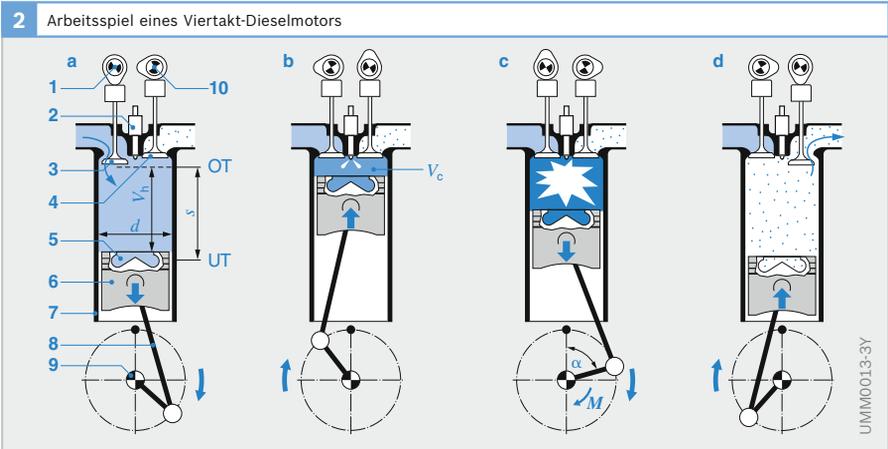
Ein Dieselmotor enthält einen oder mehrere Zylinder. Angetrieben durch die Verbrennung des Luft-Kraftstoff-Gemischs führt ein Kolben (Bild 1, Pos. 3) je Zylinder (5) eine periodische Auf- und Abwärtsbewegung aus. Dieses Funktionsprinzip gab dem Motor den Namen „Hubkolbenmotor“.

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





**Bild 2**

- a Ansaugtakt
  - b Verdichtungstakt
  - c Arbeitstakt
  - d Ausstoßtakt
- 1 Einlassnockenwelle
  - 2 Einspritzdüse
  - 3 Einlassventil
  - 4 Auslassventil
  - 5 Brennraum
  - 6 Pleuellager
  - 7 Pleuellagergehäuse
  - 8 Pleuellagerstange
  - 9 Pleuellagerbolzen
  - 10 Pleuellagergehäuse
- $\alpha$  Pleuellagerwinkel
  - $d$  Pleuellagerbohrung
  - $M$  Pleuellagermoment
  - $s$  Pleuellagerhub
  - $V_c$  Pleuellagerkompressionsvolumen
  - $V_h$  Pleuellagerhubvolumen (Hubraum)
  - OT oberer Pleuellagerpunkt des Pleuellagers
  - UT unterer Pleuellagerpunkt des Pleuellagers

### 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 Pleuellager (6) abwärts und vergrößert das Volumen im Zylinder. Durch das geöffnete Einlassventil (3) strömt Luft ohne vorgeschaltete Drosselklappe in den Zylinder ein. Im unteren Pleuellagerpunkt (UT) hat das Pleuellager die maximale Größe erreicht ( $V_h + V_c$ ).

#### 2. Takt: Verdichtungstakt (b)

Die Gaswechselventile sind nun geschlossen. Der aufwärts gehende Pleuellager 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 Verdichtungs Vorgangs spritzt die Einspritzdüse (2) den Kraftstoff unter hohem Druck (derzeit bis zu 2200 bar) in die erhitzte Luft ein. Im oberen Pleuellagerpunkt ist das minimale Volumen erreicht (Kompressionsvolumen  $V_c$ ).

#### 3. Takt: Arbeitstakt (c)

Nach Verstreichen des Zündverzugs (einige Grad Pleuellagerwinkel) 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 Pleuellagerladung weiter und der Pleuellagerdruck steigt nochmals an. Die durch die Verbrennung frei gewordene Energie ist im Wesentlichen durch die eingespritzte Kraftstoffmasse bestimmt (Qualitätsregelung). Der Pleuellagerdruck treibt den Pleuellager nach unten, die chemische Energie wird in Bewegungsenergie umgewandelt. Ein Pleuellagertrieb übersetzt die Bewegungsenergie des Pleuellagers in ein an der Pleuellagerwelle zur Verfügung stehendes Drehmoment.

#### 4. Takt: Ausstoßtakt (d)

Bereits kurz vor dem unteren Pleuellagerpunkt öffnet das Auslassventil (4). Die unter Pleuellagerdruck stehenden heißen Gase strömen aus dem Zylinder. Der aufwärts gehende Pleuellager stößt die restlichen Abgas aus.

Nach jeweils zwei Pleuellagerumdrehungen 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 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  $\epsilon$ :

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

Die Verdichtung des Motors hat entscheidenden Einfluss auf

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

Das Verdichtungsverhältnis  $\epsilon$  beträgt bei Dieselmotoren für Pkw und Nkw je nach Motorbauweise und Einspritzart  $\epsilon = 16:1 \dots 24:1$ . Die Verdichtung liegt also höher als beim Ottomotor ( $\epsilon = 7:1 \dots 13:1$ ). 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

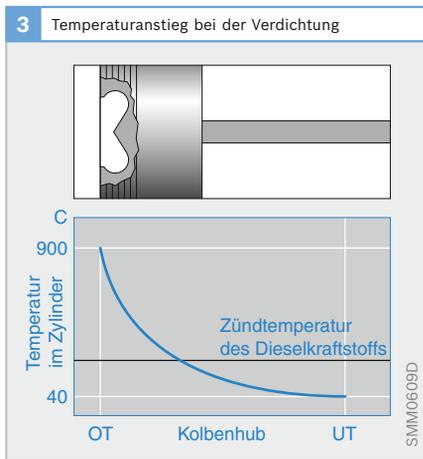
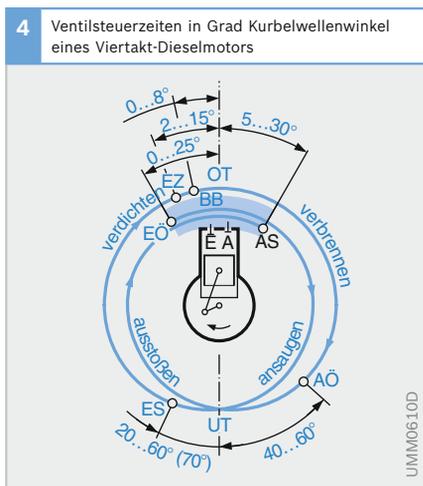


Bild 4

- 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  $\text{min}^{-1}$  bereitzustellen, da in diesem Drehzahlbereich der Kraftstoffverbrauch am günstigsten ist und die Fahrbarkeit als angenehm empfunden wird (gutes Anfahrverhalten).

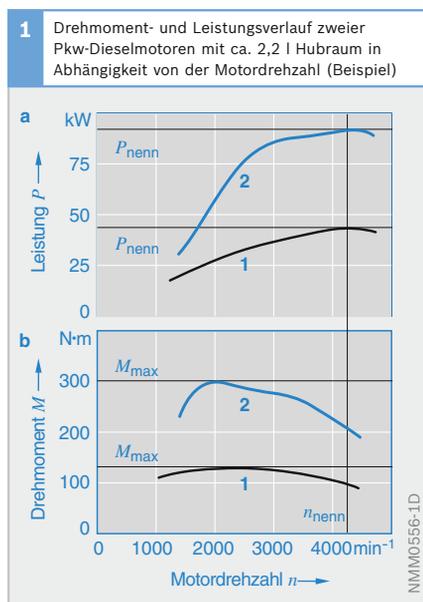
### Leistung

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  $n_{\text{nenn}}$  mit der Nennleistung  $P_{\text{nenn}}$  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  $\text{min}^{-1}$ .



**Bild 1**

a Leistungsverlauf

b Drehmomentverlauf

1 Baujahr 1968

2 Baujahr 1998

$M_{\max}$  maximales Drehmoment

$P_{\text{nenn}}$  Nennleistung

$n_{\text{nenn}}$  Nenndrehzahl

## 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.

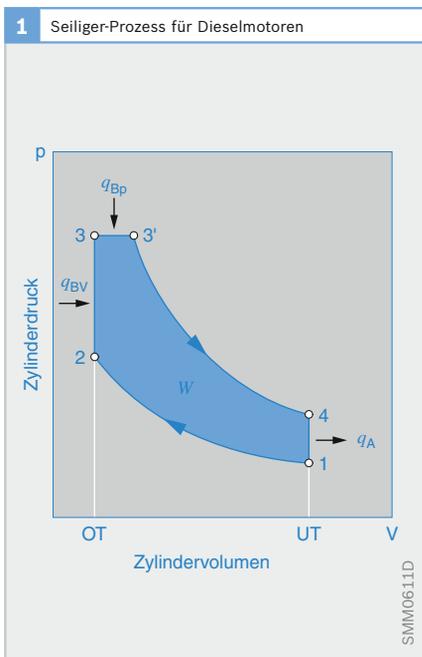
### Seiliger-Prozess

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.

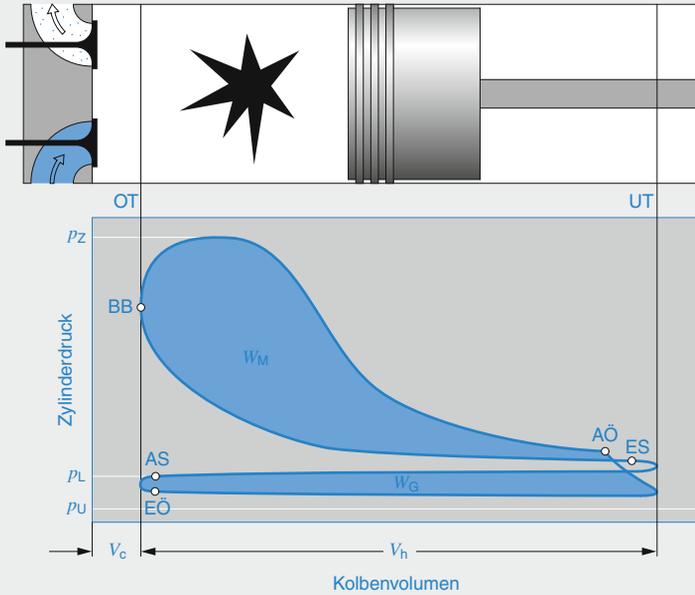
#### Isochore Wärmeabfuhr (4-1)

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)



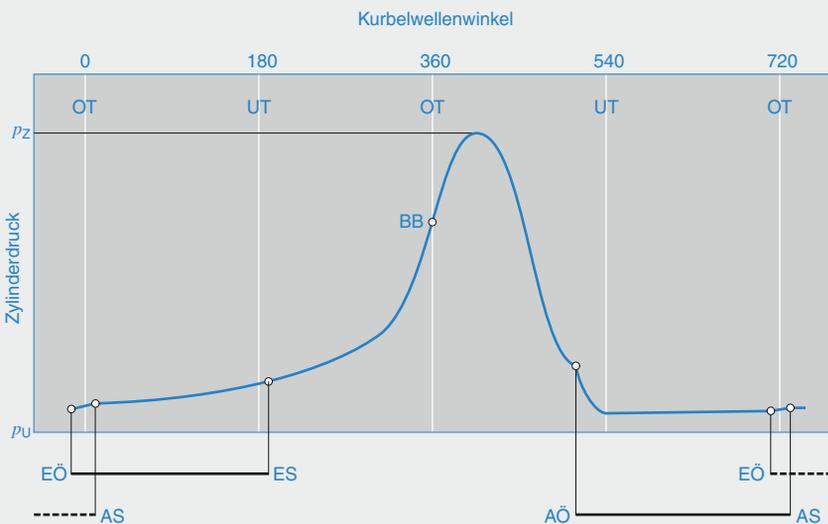
**Bild 2**

- 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 ( $p$ - $\alpha$ -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  $\eta_e$  lässt sich darstellen als Produkt aus dem thermischen Wirkungsgrad des Idealprozesses und weiteren Wirkungsgraden, die den Einflüssen des realen Prozesses Rechnung tragen:

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

#### $\eta_{th}$ : Thermischer Wirkungsgrad

$\eta_{th}$  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.

#### $\eta_g$ : Gütegrad

$\eta_g$  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.

#### $\eta_b$ : Brennstoffumsetzungsgrad

$\eta_b$  berücksichtigt die Verluste, die aufgrund der unvollständigen Verbrennung des Kraftstoffs im Zylinder auftreten.

#### $\eta_m$ : Mechanischer Wirkungsgrad

$\eta_m$  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.

#### $\eta_i$ : 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 Verdichtungshub erhitzte Luft muss den eingespritzten Kraftstoff zünden (Brennbeginn). Die erforderliche Mindestzündtemperatur für Dieseldieselkraftstoff beträgt ca. 250 °C.

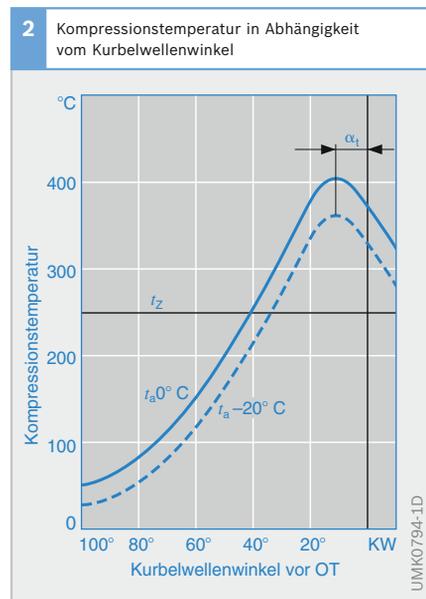
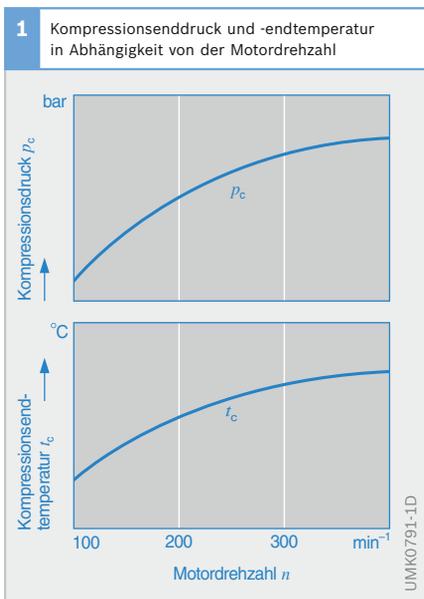
Diese Temperatur muss auch unter ungünstigen Bedingungen erreicht werden. Niedrige Drehzahl, tiefe Außentemperaturen und ein kalter Motor führen zu verhältnismäßig niedriger Kompressionsendtemperatur, denn:

- ▶ 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 Verdichtungstakts 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:



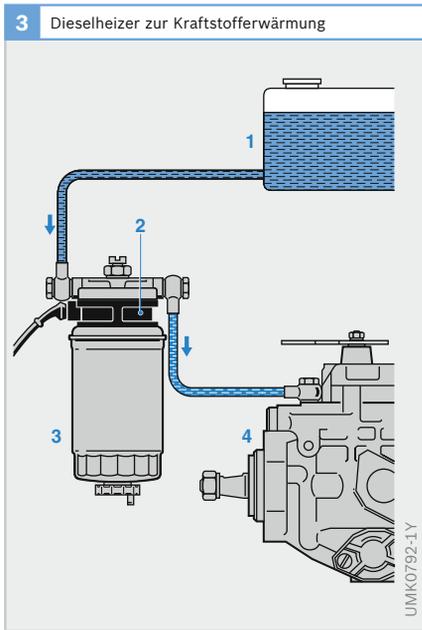
**Bild 2**

$t_a$  Außentemperatur  
 $t_z$  Zündtemperatur des Dieseldieselkraftstoffs  
 $\alpha_t$  thermodynamischer Verlustwinkel

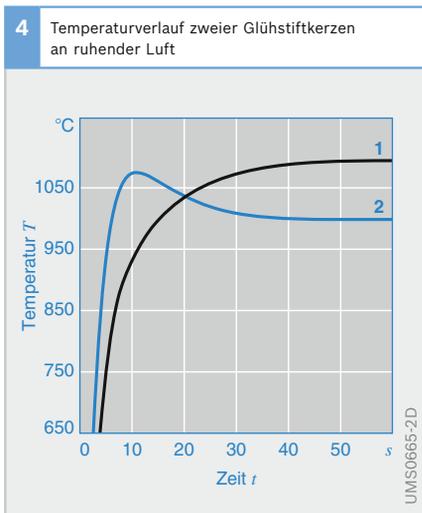
$n = 200 \text{ min}^{-1}$

### 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 (Kompressionsdruck) 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.