

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                  |          |
|------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>1 Grundlagen und Einsatzgebiete des Dieselmotors. . . . .</b> | <b>1</b> |
| Sebastian Fischer                                                |          |
| 1.1 Arbeitsweise. . . . .                                        | 2        |
| 1.1.1 Viertakt-Verfahren . . . . .                               | 2        |
| 1.1.1.1 1. Takt: Ansaugtakt (Abb. 1.2a) . . . . .                | 3        |
| 1.1.1.2 2. Takt: Verdichtungstakt (Abb. 1.2b) . . . . .          | 3        |
| 1.1.1.3 3. Takt: Arbeitstakt (Abb. 1.2c) . . . . .               | 3        |
| 1.1.1.4 4. Takt: Ausstoßtakt (Abb. 1.2d) . . . . .               | 4        |
| 1.1.2 Ventilsteuerzeiten. . . . .                                | 4        |
| 1.1.3 Verdichtung (Kompression) . . . . .                        | 5        |
| 1.2 Drehmoment und Leistung . . . . .                            | 6        |
| 1.2.1 Drehmoment . . . . .                                       | 6        |
| 1.2.2 Leistung . . . . .                                         | 7        |
| 1.3 Motorwirkungsgrad . . . . .                                  | 7        |
| 1.3.1 Thermodynamischer Vergleichsprozess. . . . .               | 7        |
| 1.3.1.1 Isentrope Kompression (1–2). . . . .                     | 8        |
| 1.3.1.2 Isochore Wärmezufuhr (2–3) . . . . .                     | 8        |
| 1.3.1.3 Isobare Wärmezufuhr (3–3') . . . . .                     | 8        |
| 1.3.1.4 Isentrope Expansion (3'–4) . . . . .                     | 8        |
| 1.3.1.5 Isochore Wärmeabfuhr (4–1) . . . . .                     | 9        |
| 1.3.2 Der reale Arbeitsprozess . . . . .                         | 9        |
| 1.3.3 Wirkungsgrad . . . . .                                     | 11       |
| 1.3.3.1 $\eta_{th}$ : Thermischer Wirkungsgrad . . . . .         | 11       |
| 1.3.3.2 $\eta_g$ : Gütegrad . . . . .                            | 11       |
| 1.3.3.3 $\eta_u$ : Brennstoffumsetzungsgrad . . . . .            | 11       |
| 1.3.3.4 $\eta_m$ : Mechanischer Wirkungsgrad . . . . .           | 11       |
| 1.3.3.5 $\eta_i$ : Indizierter Wirkungsgrad . . . . .            | 12       |

|         |                                                        |    |
|---------|--------------------------------------------------------|----|
| 1.4     | Betriebszustände .....                                 | 12 |
| 1.4.1   | Start .....                                            | 12 |
| 1.4.1.1 | Kraftstoffaufheizung .....                             | 14 |
| 1.4.1.2 | Starthilfesysteme .....                                | 14 |
| 1.4.1.3 | Einspritzanpassung .....                               | 14 |
| 1.4.2   | Nulllast .....                                         | 14 |
| 1.4.3   | Leerlauf .....                                         | 15 |
| 1.4.4   | Volllast .....                                         | 15 |
| 1.4.5   | Teillast .....                                         | 15 |
| 1.4.5.1 | Unterer Teillastbereich .....                          | 15 |
| 1.4.6   | Schubbetrieb .....                                     | 16 |
| 1.4.7   | Stationärer Betrieb .....                              | 16 |
| 1.4.8   | Instationärer Betrieb .....                            | 16 |
| 1.4.9   | Übergang zwischen den Betriebszuständen .....          | 16 |
| 1.5     | Betriebsbedingungen .....                              | 17 |
| 1.5.1   | Rauchgrenze .....                                      | 18 |
| 1.5.2   | Verbrennungsdruckgrenze .....                          | 18 |
| 1.5.3   | Abgastemperaturgrenze .....                            | 18 |
| 1.5.4   | Drehzahlgrenzen .....                                  | 19 |
| 1.5.5   | Höhen- und Ladedruckgrenzen .....                      | 19 |
| 1.6     | Einspritzsystem .....                                  | 20 |
| 1.7     | Brennräume .....                                       | 21 |
| 1.7.1   | Ungeteilter Brennraum (Direkteinspritzverfahren) ..... | 21 |
| 1.7.2   | Geteilter Brennraum (indirekte Einspritzung) .....     | 22 |
| 1.7.2.1 | Vorkammerv Verfahren .....                             | 23 |
| 1.7.2.2 | Wirbelkammerv Verfahren .....                          | 24 |
| 1.8     | Einsatzgebiete des Dieselmotors .....                  | 25 |
| 1.8.1   | Eigenschaftskriterien .....                            | 25 |
| 1.8.2   | Anwendungen .....                                      | 26 |
| 1.8.2.1 | Stationärmotoren .....                                 | 26 |
| 1.8.2.2 | Pkw und leichte Nfz. ....                              | 26 |
| 1.8.2.3 | Schwere Nfz. ....                                      | 26 |
| 1.8.2.4 | Bau- und Landmaschinen .....                           | 26 |
| 1.8.2.5 | Lokomotiven .....                                      | 27 |
| 1.8.2.6 | Schiffe .....                                          | 27 |
| 1.8.2.7 | Mehr- oder Vielstoffmotoren .....                      | 27 |
| 1.8.3   | Motorkenndaten .....                                   | 27 |

---

|                                                                                                                                  |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>2 Kraftstoffversorgung und Kraftstoffe</b>                                                                                    | <b>29</b> |
| Michael Großmann, Stefan Kieferle, Verena Bellman, Markus Gemmeke,<br>Alexander von Stockhausen, Jörg Ullmann und Ulrich Projahn |           |
| 2.1 Kraftstoffversorgung                                                                                                         | 29        |
| 2.1.1 Niederdrucksystem und Komponenten der Kraftstoffförderung                                                                  | 29        |
| 2.1.2 Vorförderpumpen                                                                                                            | 31        |
| 2.1.2.1 Elektrokraftstoffpumpe                                                                                                   | 31        |
| 2.1.2.2 Zahnradpumpe                                                                                                             | 35        |
| 2.1.3 Kraftstofffilter                                                                                                           | 38        |
| 2.1.3.1 Kraftstoffverunreinigung und<br>Abscheidungsmechanismen                                                                  | 38        |
| 2.1.3.2 Partikelabscheidung                                                                                                      | 38        |
| 2.1.3.3 Wasserabscheidung                                                                                                        | 39        |
| 2.1.3.4 Filter                                                                                                                   | 40        |
| 2.1.4 Weitere Komponenten                                                                                                        | 44        |
| 2.1.4.1 Steuergerätekühler                                                                                                       | 44        |
| 2.1.4.2 Kraftstoffkühler                                                                                                         | 44        |
| 2.1.4.3 Kraftstoffbehälter, Kraftstoffleitungen und<br>Kraftstofffördermodul                                                     | 44        |
| 2.2 Kraftstoffe                                                                                                                  | 46        |
| 2.2.1 Dieselmotorkraftstoffe                                                                                                     | 46        |
| 2.2.1.1 Zusammensetzung                                                                                                          | 46        |
| 2.2.1.2 Herstellung                                                                                                              | 46        |
| 2.2.2 Dieselmotorkraftstoffsorten                                                                                                | 47        |
| 2.2.3 Kraftstoffnormen                                                                                                           | 47        |
| 2.2.4 Kenngrößen                                                                                                                 | 49        |
| 2.2.4.1 Additive                                                                                                                 | 57        |
| 2.2.4.2 Blendkomponenten für fossile Dieselmotorkraftstoffe                                                                      | 58        |
| 2.2.4.3 Pflanzenöl                                                                                                               | 61        |
| 2.2.4.4 Paraffinische Dieselmotorkraftstoffe                                                                                     | 61        |
| 2.2.4.5 Dieselmotorkraftstoffe für Schiffsmotoren                                                                                | 64        |
| 2.2.5 Methan                                                                                                                     | 66        |
| 2.2.5.1 Erdgas                                                                                                                   | 66        |
| 2.2.5.2 Biomethan                                                                                                                | 68        |
| 2.2.5.3 Synthetisches Methan                                                                                                     | 68        |
| 2.2.5.4 Speicherung von Erdgas                                                                                                   | 68        |
| 2.2.5.5 CO <sub>2</sub> -Emissionen                                                                                              | 68        |
| 2.2.5.6 Verwendung von Erdgas                                                                                                    | 69        |
| 2.2.6 E-Fuels                                                                                                                    | 69        |

|          |                                                                              |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2.7    | Ether .....                                                                  | 70        |
| 2.2.7.1  | Dimethylether .....                                                          | 70        |
| 2.2.7.2  | Oxymethylenether .....                                                       | 70        |
|          | Literatur. ....                                                              | 71        |
| <b>3</b> | <b>Verbrennungsluftführung bei Dieselmotoren.</b> .....                      | <b>73</b> |
|          | Martin Freitag und Michael Durst                                             |           |
| 3.1      | Luftfilter und Ansauggeräuschkämpfer .....                                   | 75        |
| 3.1.1    | Motoransaugluftfilter .....                                                  | 75        |
| 3.1.1.1  | Filtermedium und Aufbau. ....                                                | 75        |
| 3.1.1.2  | Schalldämpfer. ....                                                          | 76        |
| 3.1.1.3  | Luftfilter für Pkw .....                                                     | 77        |
| 3.1.1.4  | Luftfilter für Nfz. ....                                                     | 78        |
| 3.2      | Ladeluftkühler .....                                                         | 79        |
| 3.2.1    | Ausführungen. ....                                                           | 80        |
| 3.2.1.1  | Luftgekühlte Ladeluftkühler. ....                                            | 80        |
| 3.2.1.2  | Kühlmittelgekühlte Ladeluftkühler .....                                      | 80        |
| 3.2.1.3  | Austauschgrad Ladeluftkühler .....                                           | 81        |
| 3.3      | Erhöhung des Luftdurchsatzes – Aufladung von Dieselmotoren. ....             | 81        |
| 3.3.1    | Zweck, historische Entwicklung, Vor- und Nachteile, Anwendungsbereiche ..... | 82        |
| 3.3.2    | Prinzipieller Aufbau und Funktion, Varianten .....                           | 84        |
| 3.3.2.1  | Abgasturboaufladung .....                                                    | 85        |
| 3.3.2.2  | Mechanische Aufladung .....                                                  | 94        |
| 3.3.2.3  | Zusammenwirken von Motor und Abgasturboaufladung .....                       | 94        |
| 3.3.3    | Gestaltung der Zylinderinnenströmung .....                                   | 97        |
| 3.4      | Abgasrückführung .....                                                       | 98        |
| 3.4.1    | Prinzip .....                                                                | 98        |
| 3.4.2    | Hochdruck-AGR .....                                                          | 99        |
| 3.4.2.1  | Arbeitsweise .....                                                           | 99        |
| 3.4.2.2  | AGR-Regelung .....                                                           | 100       |
| 3.4.3    | Niederdruck-AGR .....                                                        | 100       |
| 3.4.3.1  | Arbeitsweise .....                                                           | 100       |
| 3.4.4    | Abgaskühlung .....                                                           | 101       |
| 3.4.5    | Ausblick .....                                                               | 102       |
| 3.4.5.1  | AGR über variablen Ventiltrieb .....                                         | 102       |
| 3.4.5.2  | NO <sub>x</sub> -Emissionsminderungskonzepte .....                           | 102       |
|          | Literatur. ....                                                              | 102       |

**4 Gemischbildung, Einspritzung und Einspritzsysteme. . . . . 103**  
Sebastian Fischer, Werner Pape, Christoph Kendlbacher, Matthias Hickl,  
Thomas Becker, Christian Seibel, Martin Bernhaupt und Ulrich Projahn

4.1 Gemischbildung und Dieseleinspritzung . . . . . 103

4.1.1 Gemischbildung . . . . . 103

4.1.2 Zerstäubung und Verbrennung . . . . . 105

4.1.3 Gemischverteilung . . . . . 106

4.1.4  $\lambda$ -Werte beim Dieselmotor . . . . . 106

4.1.4.1 Dieseleinspritzung und Einflussgrößen . . . . . 108

4.1.5 Einspritzdruck . . . . . 108

4.1.6 Spritzbeginn . . . . . 109

4.1.6.1 Früher Einspritzbeginn . . . . . 110

4.1.6.2 Später Einspritzbeginn . . . . . 110

4.1.7 Förderbeginn . . . . . 111

4.1.8 Einspritzmenge . . . . . 112

4.1.9 Einspritzdauer . . . . . 113

4.1.10 Einspritzverlauf . . . . . 115

4.1.10.1 Einspritzverlauf bei nocken­ge­steuerten  
Einspritzsystemen. . . . . 115

4.1.10.2 Einspritzverlauf bei speicherzeit­ge­steuerten  
Einspritzsystemen. . . . . 116

4.1.11 Einspritzfunktionen . . . . . 117

4.1.11.1 Voreinspritzung. . . . . 118

4.1.11.2 Angelagerte Nacheinspritzung . . . . . 118

4.1.11.3 Späte Nacheinspritzung . . . . . 119

4.1.11.4 Digital Rate Shaping (DRS). . . . . 119

4.1.11.5 Zumessgenauigkeit. . . . . 120

4.2 Diesel-Einspritzsysteme im Überblick . . . . . 121

4.2.1 Bauarten . . . . . 121

4.2.1.1 Reiheneinspritzpumpen . . . . . 122

4.2.1.2 Verteilereinspritzpumpen . . . . . 122

4.2.1.3 Einzelzylinder-Systeme . . . . . 125

4.2.1.4 Speichereinspritzsysteme . . . . . 126

4.3 Common-Rail-Systeme . . . . . 128

4.3.1 Aufbau . . . . . 130

4.3.1.1 Niederdrucksystem. . . . . 132

4.3.1.2 Hochdrucksystem . . . . . 134

4.3.2 Druckregelung . . . . . 138

4.3.2.1 Hochdruckseitige Regelung . . . . . 139

4.3.2.2 Saugseitige Regelung . . . . . 139

4.3.2.3 Saug- und hochdruckseitige Regelung . . . . . 139

---

|          |                                                                               |            |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.3.3    | Steuerung und Regelung .....                                                  | 140        |
| 4.3.4    | Common-Rail-System für Schwerölbetrieb. ....                                  | 140        |
|          | Literatur. ....                                                               | 145        |
| <b>5</b> | <b>Starthilfesysteme</b> .....                                                | <b>147</b> |
|          | Simon Schmittinger, Rainer Moritz und Ulrich Projahn                          |            |
| 5.1      | Systeme für Pkw und leichte Nfz. ....                                         | 148        |
| 5.1.1    | Bordnetzspannungs-Glühsysteme .....                                           | 149        |
| 5.1.2    | Niederspannungs-Glühsysteme .....                                             | 149        |
| 5.1.3    | Geregelte Glühsysteme .....                                                   | 150        |
| 5.1.3.1  | Metall-Glühstiftkerzen (Duraterm, Duraterm<br>High Speed von Bosch) .....     | 150        |
| 5.1.3.2  | Keramik-Glühstiftkerzen (Duraspeed von Bosch) .....                           | 152        |
| 5.1.3.3  | Glühzeitsteuergeräte .....                                                    | 153        |
| 5.2      | Start- und Zündhilfesysteme für Nfz .....                                     | 155        |
| 5.2.1    | Kaltstart-, Kaltlaufverhalten und Kaltlaufemissionen<br>bei Pkw-Motoren ..... | 155        |
|          | Verbrennungsluftführung bei Dieselmotoren .....                               | 157        |