

Klaus Mollenhauer (Hrsg.)



dandelion.com

© 2008 dG Information Management Consultants
May be used for personal purposes only or by
libraries associated to dandelion.com network.

Handbuch Dieselmotoren

Mit 638 Abbildungen und 14 Farbtafeln



Springer

Inhaltsverzeichnis

| | |
|-------------------------------------|-------------|
| Autorenverzeichnis | XXIX |
|-------------------------------------|-------------|

Teil I

Der Arbeitsprozeß des Dieselmotors

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 Geschichte und Grundlagen des Dieselmotors | 3 |
| 1.1 Historie des Dieselmotors | 3 |
| 1.2 Motortechnische Grundlagen | 12 |
| 1.2.1 Einleitung | 12 |
| 1.2.2 Konstruktive Grunddaten | 13 |
| 1.2.3 Die motorische Verbrennung | 15 |
| 1.2.3.1 Grundlagen der Verbrennungsrechnung | 15 |
| 1.2.3.2 Vergleich motorischer Verbrennungsverfahren | 16 |
| 1.2.4 Thermodynamische Grundlagen | 17 |
| 1.2.4.1 Ideale Zustandsänderungen von Gasen | 17 |
| 1.2.4.2 Idealer Kreisprozeß und Vergleichsprozeß | 18 |
| 1.2.5 Der reale Arbeitsprozeß des Dieselmotors | 21 |
| 1.2.5.1 Zweitakt- und Viertakt-Verfahren | 21 |
| 1.2.5.2 Wirkungsgrade des realen Motors | 21 |
| 1.2.5.3 Motorbetrieb und Motorkenngrößen | 22 |
| 1.3 Berechnung des realen Arbeitsprozesses | 29 |
| 1.3.1 Einleitung | 29 |
| 1.3.2 Thermodynamische Grundlagen der Realprozeßrechnung | 30 |
| 1.3.2.1 Unterschiede zwischen idealem und realem Arbeitsprozeß | 30 |
| 1.3.2.2 Thermodynamisches Modell | 30 |
| 1.3.2.3 Indizierte und effektive Arbeit | 39 |
| 1.3.3 Typische Beispiele für die Anwendung - der Realprozeßrechnung | 40 |

| | | |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.3.3.1 | Einleitung | 40 |
| 1.3.3.2 | Ergebnisse der Realprozeßrechnung | 40 |
| 1.3.3.3 | Parameterstudien | 41 |
| 1.3.3.4 | Weitere Anwendungsbeispiele | 46 |
| 1.3.4 | Zukünftige Arbeiten auf dem Gebiet der Realprozeßrechnung | 47 |
| 2 | Ladungswechsel und Aufladung | 49 |
| 2.1 | Ladungswechsel | 49 |
| 2.1.1 | Allgemeines | 49 |
| 2.1.2 | Viertaktverfahren | 50 |
| 2.1.2.1 | Steuerorgane | 50 |
| 2.1.2.2 | Ventilhubkurven und Steuerzeiten | 51 |
| 2.1.2.3 | Ventilquerschnitt und Durchflußbeiwert | 54 |
| 2.1.2.4 | Einlaßdrall | 56 |
| 2.1.2.5 | Einfluß der Einlaßleitung | 57 |
| 2.1.3 | Zweitaktverfahren | 58 |
| 2.1.3.1 | Besonderheiten des Zweitaktladungswechsels gegenüber dem Viertaktladungswechsel | 58 |
| 2.1.3.2 | Spülverfahren | 59 |
| — 2.1.3.3 | Messung des Spülerfolgs, Spülmodelle | 61 |
| 2.2 | Aufladung von Dieselmotoren | 61 |
| 2.2.1 | Allgemeines | 61 |
| 2.2.1.1 | Definition und Ziele der Aufladung | 61 |
| 2.2.1.2 | Vergleich von Abgasturboaufladung und mechanischer Aufladung | 62 |
| 2.2.2 | Zusammenwirken von Motor und Lader | 64 |
| 2.2.2.1 | Laderbauarten und ihre Kennfelder | 64 |
| 2.2.2.2 | Motorschlucklinie | 66 |
| 2.2.2.3 | Motorbetriebslinien | 67 |
| 2.2.3 | Abgasturboaufladung | 69 |
| 2.2.3.1 | Turboladerhauptgleichungen, Turboladerwirkungsgrad | 70 |
| 2.2.3.2 | Stoß- und Stauaufladung | 73 |
| 2.2.3.3 | Ladeluftkühlung | 78 |
| 2.2.3.4 | Stationäres und instationäres Motorbetriebsverhalten bei Abgasturboaufladung | 79 |
| 2.2.4 | Sonderformen der Abgasturboaufladung | 84 |
| 2.2.4.1 | Zweistufige Aufladung | 84 |
| 2.2.4.2 | Turbocompounding | 85 |
| 2.2.5 | Druckwellenaufladung (COMPREX) | 86 |
| 2.2.6 | Mechanische Aufladung | 89 |
| 2.3 | Programmierte Ladungswechselberechnung | 90 |

| | | |
|------------|----------------------------------------------------------|------------|
| 3 | Kraftstoff und Verbrennung | 93 |
| 3.1 | Die dieselmotorische Verbrennung | 93 |
| 3.1.1 | Ablauf von Gemischbildung und Verbrennung | 93 |
| 3.1.1.1 | Verfahrensmerkmale | 93 |
| 3.1.1.2 | Gemischbildung | 93 |
| 3.1.1.3 | Zündung und Zündverzug | 95 |
| 3.1.1.4 | Verbrennung und Brennverlauf | 99 |
| 3.1.1.5 | Strömungsvorgänge im Brennraum | 101 |
| 3.1.2 | Konstruktive Merkmale der Verbrennungsverfahren | 104 |
| 3.1.2.1 | Verfahren mit direkter Einspritzung | 104 |
| 3.1.2.2 | Verfahren mit indirekter Einspritzung | 105 |
| 3.1.2.3 | Hybride Verbrennungsverfahren | 109 |
| 3.1.3 | Qualitative Bewertung von Verbrennungsverfahren | 110 |
| 3.1.4 | Verbrennungsforschung | 111 |
| 3.2 | Dieselmotorkraftstoff für Fahrzeugmotoren | 113 |
| 3.2.1 | Einführung | 113 |
| 3.2.2 | Herstellung | 113 |
| 3.2.3 | Qualitätsanforderungen | 114 |
| 3.2.4 | Wesentliche Kennwerte | 115 |
| 3.2.4.1 | Zündwilligkeit, Cetanzahl, Cetanindex | 115 |
| 3.2.4.2 | Siedeverhalten | 116 |
| 3.2.4.3 | Schwefelgehalt | 116 |
| 3.2.4.4 | Tiefemperatur-Fließfähigkeit | 117 |
| 3.2.4.5 | Dichte | 117 |
| 3.2.4.6 | Viskosität | 117 |
| 3.2.4.7 | Flammpunkt | 118 |
| 3.2.4.8 | Aromaten | 118 |
| 3.2.4.9 | Reinheit | 118 |
| 3.2.4.10 | Sonstige Qualitätsmerkmale | 118 |
| 3.2.5 | Einfluß der Kraftstoffqualität auf motorisches Verhalten | 119 |
| 3.2.6 | Prüfverfahren | 120 |
| 3.2.6.1 | Chemisch-physikalische Labormethoden | 120 |
| 3.2.6.2 | Cetanzahlprüfmotoren und motorische Verfahren | 120 |
| 3.2.7 | Kraftstoffnormen | 121 |
| 3.2.7.1 | DIN51601 | 121 |
| 3.2.7.2 | EN590 | 121 |
| 3.2.7.3 | Firmeneigene Kraftstoffnormen | 122 |
| 3.2.7.4 | Referenzkraftstoffe | 122 |
| 3.2.8 | Zukunftsaspekte | 122 |
| 3.3 | Schwerölbetrieb von Schiffs- und Stationärmotoren | 123 |
| 3.3.1 | Was ist Schweröl? | 123 |
| 3.3.2 | Schwerölaufbereitung | 125 |

| | | |
|---------|---------------------------------------------|-----|
| 5.2.4.4 | Elektropneumatische Wandler für ARF und ATL | 241 |
| 5.2.5 | Regelkreise | 241 |
| 5.2.5.1 | Kraftsstoffdosierung | 241 |
| 5.2.5.2 | Drehzahl | 242 |
| 5.2.5.3 | Einspritzbeginn | 243 |
| 5.2.5.4 | Fahrgeschwindigkeit | 243 |
| 5.2.5.5 | Abgasrückführung (ARF) | 243 |
| 5.2.5.6 | Ladedruck | 243 |
| 5.2.6 | Diagnose, Ersatzfunktionen | 244 |
| 5.2.6.1 | Selbstüberwachung | 244 |
| 5.2.6.2 | Diagnose in der Werkstatt "» | 244 |
| 5.2.6.3 | Ersatzfunktionen | 244 |

Teil II

Zur Konstruktion von Dieselmotoren

| | | |
|------------|----------------------------------------------------------|------------|
| 6 | Belastung von Motorbauteilen | 247 |
| 6.1 | Mechanische und thermische Bauteilbelastung | 247 |
| 6.1.1 | Mechanische Bauteilbelastung | 247 |
| 6.1.2 | Thermische Bauteilbelastung | 250 |
| 6.1.3 | Bauteilbeanspruchung (Spannungsverteilung) | 251 |
| 6.1.3.1 | Allgemeine Zusammenhänge | 251 |
| 6.1.3.2 | Beanspruchung ausgewählter Motorbauteile | 252 |
| 6.1.4 | Festigkeitsnachweis der Bauteile | 257 |
| 6.1.5 | Typische Bauteilschäden bei Dieselmotoren | 259 |
| 6.2 | Wärmeübergang und Wärmebelastung im Motor | 262 |
| 6.2.1 | Einleitung | 262 |
| 6.2.2 | Wärmeübergang im Verbrennungsmotor | 262 |
| 6.2.3 | Bestimmung der thermischen Belastung der Motorbauteile | 278 |
| 7 | Gestaltung und Beanspruchung des Triebwerkes | 280 |
| 7.1 | Bauformen und triebwerksmechanische Eigenschaften | 280 |
| 7.1.1 | Anforderungen an das Triebwerk | 280 |
| 7.1.2 | Kräfte am Triebwerk | 281 |
| 7.1.3 | Ermittlung der triebwerksmechanischen Eigenschaften | 283 |
| 7.1.4 | Beispiele ausgeführter Triebwerke | 285 |
| 7.1.4.1 | V-Motoren - Einfluß des V-Winkels | 285 |
| 7.1.4.2 | Zusätzliche Ausgleichsmaßnahmen | 288 |

| | | |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.1.5 | Mehrzylindermotoren und Laufruhe | 291 |
| 7.1.6 | Konstruktion und Werkstoffe | 293 |
| 7.2 | Massenausgleich | 296 |
| 7.2.1 | Übersicht über Massenkräfte und -momente und ihre Wirkungen | 296 |
| 7.2.2 | Ersatzsystem und Kinematik des normalen Hubkolbentriebwerkes | 298 |
| 7.2.3 | Massenkräfte und -momente beim Einzylindermotor | 302 |
| 7.2.3.1 | Berechnung für konstante Drehwinkelgeschwindigkeit | 302 |
| 7.2.3.2 | Massenkräfte und -momente bei veränderlicher Drehwinkelgeschwindigkeit | 303 |
| 7.2.4 | Massenausgleich bei Einzylindermotoren mit konstanter Drehwinkelgeschwindigkeit | 303 |
| 7.2.4.1 | Übersicht zum Massenausgleich bei Einzylindermotoren | 303 |
| 7.2.4.2 | Gegenmassen an Kurbelwangen | 305 |
| 7.2.4.3 | Umlaufende Ausgleichsmassen an Ausgleichswellen | 306 |
| 7.2.4.4 | Gestaltung des Pleuels | 307 |
| 7.2.5 | Massenkräfte und -momente bei Reihenmotoren: Massenausgleich | 308 |
| 7.2.6 | Massenkräfte und -momente bei V-Motoren: Massenausgleich | 311 |
| 7.3 | Drehschwingungen | 313 |
| 7.3.1 | Überblick | 313 |
| 7.3.2 | Erregerdrehmomente für das Hubkolbentriebwerk und für den Motor. | 316 |
| 7.3.3 | Ersatzsysteme und Bestimmung der Systemparameter | 317 |
| 7.3.3.1 | Ersatzsystem und Differentialgleichung zur Ermittlung der Eigenschwingungen | 317 |
| 7.3.3.2 | Massenreduktion des Hubkolbentriebwerkes zur Ermittlung der Ersatzdrehmassen. | 319 |
| 7.3.3.3 | Längenreduktion des Hubkolbentriebwerkes zur Ermittlung der Ersatzdrehsteifigkeiten. | 320 |
| 7.3.3.4 | Reduktion von Übersetzungsgetrieben. | 321 |
| 7.3.3.5 | Ermittlung der Dämpfung des Hubkolbentriebwerkes | 322 |
| 7.3.4 | Ermittlung der Eigenschwingungen. | 323 |
| 7.3.4.1 | Determinantenmethode. | 323 |
| 7.3.4.2 | Verfahren von HOLZER-TOLLE. | 324 |
| 7.3.4.3 | Verfahren der Übertragungsmatrizen. | 325 |
| 7.3.5 | Ermittlung von Frequenzgängen. | 326 |
| 7.3.6 | Ermittlung erzwungener Drehschwingungen. | 327 |
| 7.3.7 | Reduzierung von Drehschwingungen. | 328 |
| 7.3.7.1 | Drehschwingungsdämpfer. | 328 |

| | | |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.3.7.2 | Drehschwingungstilger | 330 |
| 7.3.7.3 | Zweimassen-Schwungrad | 331 |
| 7.4 | Kurbelwellenbeanspruchung | 333 |
| 7.4.1 | Erfassen der Kurbelwellenbeanspruchung | 333 |
| 7.4.2 | Formzahlen | 335 |
| 7.4.3 | Beanspruchungszustand bei Biegung und Torsion | 338 |
| 7.4.4 | Ist-Spannungskonzept und Bauteildauerfestigkeit | 338 |
| 7.4.5 | Dauerfestigkeitssteigerung durch Randschicht- verfestigung | 342 |
| 7.5 | Lager und Lagerwerkstoffe | 344 |
| 7.5.1 | Lagerstellen im Triebwerk von Dieselmotoren | 344 |
| 7.5.2 | Funktionsweise und Beanspruchungen | 345 |
| 7.5.2.1 | Hydrodynamik der Gleitlager | 345 |
| 7.5.2.2 | Berechnung der Lagerbeanspruchungen | 347 |
| 7.5.2.3 | Betriebskennwerte heutiger Lager | 351 |
| 7.5.3 | Konstruktive Ausführungen / • • • | ^53 |
| 7.5.3.1 | Grundsätzlicher Aufbau / . . . | 353 |
| 7.5.3.2 | Pleuellager und Kurbelwellenhauptlager < | 354 |
| 7.5.3.3 | Axiallager | 356 |
| 7.5.3.4 | Lager von Kolbenbolzen, Kipphebeln und Nockenwellen | 357 |
| 7.5.4 | Lagerwerkstoffe | 358 |
| 7.5.4.1 | Gleitlagerbeanspruchungen und Funktion im Motorbetrieb | 358 |
| 7.5.4.2 | Anforderungen an Gleitlagerwerkstoffe | 359 |
| 7.5.4.3 | Basismaterialien und grundsätzlicher Aufbau von Gleitlagerwerkstoffen | 360 |
| 7.5.4.4 | Einschichtwerkstoffe | 361 |
| 7.5.4.5 | Zweischicht-Verbundwerkstoffe | 361 |
| 7.5.4.6 | Dreischicht-Verbundwerkstoffe | 363 |
| 7.5.5 | Lagerschäden und ihre Ursachen | 365 |
| 7.5.5.1 | Beeinträchtigungen des Betriebs | 365 |
| 7.5.5.2 | Verschleiß | 365 |
| 7.5.5.3 | Ermüdung | 366 |
| 7.6 | Kolben, Kolbenringe und Kolbenbolzen | 367 |
| 7.6.1 | Funktion des Kolbens | 367 |
| 7.6.2 | Temperaturen und Kräfte am Kolben | 368 |
| 7.6.3 | Gestaltung und Beanspruchung des Kolbens | 369 |
| 7.6.3.1 | Hauptabmessungen des Kolbens | 369 |
| 7.6.3.2 | Beanspruchungsverhältnisse am Kolben | 369 |
| 7.6.3.3 | Kolbenbauarten | 376 |
| 7.6.3.4 | Werkstoff-Fragen | 382 |

- 7.6.4 Kolbenringe 389
 - 7.6.4.1 Allgemeine Beschreibung 389
 - 7.6.4.2 Verdichtungsringe 391
 - 7.6.4.3 Ölabstreifringe 391
- 7.6.5 Kolbenbolzen 394
- 7.6.6 Entwicklungstendenzen 396

- 8 Motorkühlung 398**
 - 8.1 Aufgabe der Motorkühlung 398**

 - 8.2 Wasserkühlung 401**
 - 8.2.1 Wärmeübergang bei Wasserkühlung 401
 - 8.2.2 Rechnerische Analyse des Wärmetransports 407
 - 8.2.3 Heißkühlung 408
 - 8.2.4 Verdampfungskühlung 408

 - 8.3 Ölkühlung 411**

 - 8.4 Luftkühlung 413**
 - 8.4.1 Historischer Rückblick 413
 - 8.4.2 Wärmeübertragung vom Bauteil an die Kühlluft 418
 - 8.4.2.1 Wärmeübergang und Kühlflächengestaltung 418
 - 8.4.2.2 Einfluß von Kühlluftführungen auf den Wärmeübergang 421
 - 8.4.3 Konstruktive Merkmale des luftgekühlten Motors 423
 - 8.4.3.1 Gesamtaufbau des Motors 423
 - 8.4.3.2 Kurbelgehäuse 425
 - 8.4.3.3 Zylinderrohr 426
 - 8.4.3.4 Zylinderkopf 426
 - 8.4.4 Das motorintegrierte Kühlsystem 429
 - 8.4.4.1 Grundlegende Unterschiede zum externen Kühlsystem des flüssigkeitsgekühlten Motors 429
 - 8.4.4.2 Bauarten, Auslegungskenngrößen und Leistungsmerkmale des Kühlgebläses 430
 - 8.4.4.3 Beispiele ausgeführter Dieselmotoren 433
 - 8.4.5 Einfluß der Luftkühlung auf Liefergrad und NO_x-Emission 435
 - 8.4.6 Leistungsgrenzen des luftgekühlten Motors 436

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 12.2 Innere Zünd- und Starthilfen | 535 |
| 12.3 Äußere Zünd- und Starthilfen | 540 |
| 12.3.1 Elektrische Heizkerzen und Heizflansche | 540 |
| 12.3.2 Flammstartanlagen | 541 |
| | |
| 13 Ansaug- und Abgasanlagen. | 544 |
| 13.1 Luftfilter. | 544 |
| 13.1.1 Anforderungen | 544 |
| 13.1.2 Filtermaterialien und Leistungsdaten | 547 |
| 13.1.3 Bauformen | 550 |
| 13.1.4 Ansaugeräuschkämpfung | 552 |
| | |
| 13.2 Abgasanlagen | 556 |
| 13.2.1 Aufgabe und Aufbau | 556 |
| 13.2.1.1 Abgasanlagen für Pkw. | 557 |
| 13.2.1.2 Abgasanlagen für Nutzfahrzeuge. | 558 |
| 13.2.1.3 Abgasanlagen für Stationär- und Schiffsmotoren. | 559 |
| 13.2.2 Abgasgeräuschkämpfung durch Schalldämpfer. | 559 |
| 13.2.2.1 Allgemeine Zusammenhänge. | 559 |
| 13.2.2.2 Vorschalldämpfer, Katalysator und Partikelfilter als Schalldämpfungselemente. | 560 |
| 13.2.2.3 Mittelschalldämpfer und Nachschalldämpfer. | 561 |
| 13.2.2.4 Dämpferbauarten. | 561 |
| 13.2.3 Abgasnachbehandlung | 564 |
| 13.2.3.1 Probleme der Diesel-Abgasemission. | 564 |
| 13.2.3.2 Oxidationskatalysator. | 565 |
| 13.2.3.3 Denox-Katalysatpr. | 566 |
| 13.2.3.4 Partikelfiltersysteme. | 568 |
| | |
| 14 Abwärmeverwertung. | 579 |
| 14.1 Grundlagen der Abwärmenutzung | 579 |
| 14.1.1 Gebot der Primärenergieeinsparung | 579 |
| 14.1.2 Bestimmung der Abwärme von Dieselmotoren. | 581 |
| 14.1.3 Kennwerte der Abwärmeverwertung | 584 |
| | |
| 14.2 Möglichkeiten der Abwärmenutzung | 586 |
| 14.2.1 Abwärmenutzung als mechanische Energie. | 586 |
| 14.2.1.1 Turbo-Compound-Betrieb. | 586 |

| | | |
|-------------|-----------------------------------------------------------------|------------|
| 14.2.1.2 | Dampfkraftanlage (Bottoming Cycle) | 586 |
| 14.2.2 | Abwärmenutzung als thermische Energie | 588 |
| 14.2.2.1 | Vorbemerkung | 588 |
| 14.2.2.2 | Kraft-Wärme-Kopplung | 589 |
| 14.2.2.3 | Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung | 594 |
| 14.2.3 | Wirtschaftliche und energiepolitische Aspekte | 596 |
| 14.3 | Wärmeübertrager | 597 |
| 14.3.1 | Wärmetechnische Auslegung | 597 |
| 14.3.2 | Kühlmittelkühler | 603 |
| 14.3.3 | Ölkühler | 607 |
| 14.3.4 | Ladeluftkühler | 610 |
| 14.3.5 | Abgaswärmeübertrager | 616 |
| 14.3.5.1 | Bauarten, Ausführungsformen | 616 |
| 14.3.5.2 | Probleme der Heizflächenverschmutzung | 618 |
| 14.3.5.3 | Lösungsvorschläge | 620 |
| 15 | Überwachung, Wartung und Diagnose | 625 |
| 15.1 | Motorwartung und Motordiagnose | 625 |
| 15.1.1 | Einführung | 625 |
| 15.1.2 | Wartungsarbeiten | 627 |
| 15.1.2.1 | Ölstandskontrolle und Ölwechsel | 627 |
| 15.1.2.2 | Luft- und Kraftstofffilter | 628 |
| 15.1.2.3 | Kühlmittelkreislauf | 629 |
| 15.1.2.4 | Sonstige Wartungsarbeiten | 630 |
| 15.1.3 | Wartungssysteme | 631 |
| 15.1.3.1 | Konventionelles Wartungssystem | 631 |
| 15.1.3.2 | Wartungssteuerung durch eine Betriebs-EDV | 633 |
| 15.1.3.3 | Flexibles Service-System | 635 |
| 15.1.4 | Diagnose und Diagnoseverfahren | 637 |
| 15.1.4.1 | Diagnosemethoden | 637 |
| 15.1.4.2 | Elektronische Fahrzeug-Diagnosesysteme | 637 |
| 15.1.4.3 | Diagnosesysteme für Großdieselmotoren | 638 |
| 15.1.4.4 | Dynamisches Motormanagement | 640 |
| 15.2 | Meßtechnik für Entwicklung und Betrieb von Dieselmotoren | 641 |
| 15.2.1 | Aufgabengebiete | 641 |
| 15.2.2 | Meßtechnische Grundlagen | 643 |
| 15.2.3 | Allgemeine Meß- und Prüfstandstechnik | 650 |
| 15.2.3.1 | Traditionelle Prüfstandstechnik | 650 |
| 15.2.3.2 | Rechnergestützte Prüfstandstechnik | 658 |
| 15.2.4 | Meß- und Prüfstandstechnik für ausgewählte Meßaufgaben | 667 |

| | | |
|----------|------------------------------------------|------|
| 15.2.4.1 | Zylinderdruck | .667 |
| 15.2.4.2 | Gemischbildung und Verbrennung | .670 |
| 15.2.4.3 | Strömungsgeschwindigkeit | .674 |

Teil IV

Umweltbelastung durch Dieselmotoren

| | | |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 16 | Abgasemission von Dieselmotoren. | .679 |
| 16.1 | Allgemeine Zusammenhänge | .679 |
| 16.1.1 | Emission und Immission | .679 |
| 16.1.2 | Emissionsbilanzen und Emissionsquellen | .681 |
| 16.1.2.1 | Stickoxide (NO _x) | .681 |
| 16.1.2.2 | Kohlendioxid (CO ₂), Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC), Schwebstaub, Schwefeldioxid (SO ₂) .. | .681 |
| 16.1.2.3 | Emissionen des Verkehrs | .684 |
| 16.1.3 | Wirkung von Abgasschadstoffen | .685 |
| 16.2 | Abgasgesetzgebung | .687 |
| -16.2.1 | Abgasgesetzgebung für Pkw-Motoren | .687 |
| 16.2.2 | Abgasgesetzgebung für Nutzfahrzeugmotoren | .687 |
| 16.2.2.1 | Prüfmodus und Abgasgrenzwerte | .687 |
| 16.2.2.2 | US-Transienttest | .692 |
| 16.2.2.3 | Europäischer Prüfzyklus | .693 |
| 16.2.2.4 | Japanetest | .697 |
| 16.2.3 | Abgasgesetzgebung für stationäre Motorenanlagen | .697 |
| 16.2.3.1 | Technische Anleitung Luft | .697 |
| 16.2.3.2 | Indusriemotoren, ISO 8178. | .699 |
| 16.2.3.3 | Schiffsmotoren, EN 8178 | .699 |
| 16.3 | Abgasschadstoffe und ihre Entstehung | .700 |
| 16.3.1 | Vollständige und unvollständige Verbrennung | .700 |
| 16.3.2 | Entstehung von Stickoxiden | .701 |
| 16.3.3 | Rußbildung und Partikelemission | .702 |
| 16.3.4 | Nicht limitierte Emissionen | .703 |
| 16.4 | Innere motorische Maßnahmen zur Emissionsminderung | .705 |
| 16.4.1 | Abgasemission und Verbrauch | .705 |
| 16.4.2 | Einfluß des Verbrennungsverfahrens | .706 |
| 16.4.3 | Einfluß von Kalt- und Warmlauf | .708 |
| 16.4.4 | Einfluß des Kraftstoffes | .711 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------|------------|
| 16.5 Maßnahmen zur Abgasnachbehandlung | 712 |
| 16.5.1 Oxidationskatalysator | 712 |
| 16.5.2 Nachmotorische Entstickung | 713 |
| 16.5.2.1 Verfahrensvergleich | 713 |
| 16.5.2.2 SCR-Katalysator | 714 |
| 16.5.2.3 NSCR-Katalysator | 715 |
| 16.5.3 Partikelfiltersysteme | 716 |
| 16.6 Meßverfahren zur Bestimmung der Abgasemission | 717 |
| 16.6.1 Messung der gasförmigen Emission | 717 |
| 16.6.1.1 Infrarot-Absorptionsanalysator". | 717 |
| 16.6.1.2 Flammenionisationsdetektor | 719 |
| 16.6.1.3 Chemilumineszenz-Detektor | 719 |
| 16.6.1.4 Gaschromatograph | 720 |
| 16.6.2 Messung der Partikel- und Staubemission | 720 |
| 16.6.2.1 Partikelemission | 720 |
| 16.6.2.2 Staubemission | 722 |
| 16.6.2.3 Alternative Meßverfahren | 722 |
| 17 Geräuschemission von Dieselmotoren | 726 |
| 17.1 Grundlagen der Akustik | 726 |
| 17.2 Gesetzliche Grenzwerte und Meßverfahren | 727 |
| 17.3 Geräuscentstehung | 729 |
| 17.3.1 Geräuschquellen von Verbrennungsmotoren | 729 |
| 17.3.2 Einfluß ausgewählter Motorparameter | 729 |
| 17.3.3 Entwicklung der Motorgeräuschemission | 730 |
| 17.4 Reduktion des Motoroberflächengeräusches | 731 |
| 17.4.1 Körperschallanregung | 731 |
| 17.4.1.1 Anregungsmechanismen | 731 |
| 17.4.1.2 Direktes Verbrennungsgeräusch | 734 |
| 17.4.1.3 Indirektes Verbrennungsgeräusch | 737 |
| 17.4.1.4 Mechanisches Geräusch | 738 |
| 17.4.1.5 Steuertriebsgeräusch | 739 |
| 17.4.2 Körperschallübertragung im Motor | 741 |
| 17.4.2.1 Körperschallübertragung über den Motorblock | 741 |
| 17.4.2.2 Körperschallübertragung über Anbauteile | 743 |
| 17.4.2.3 Körperschallübertragung über die Motorlagerung | 746 |
| 17.4.3 Reduktion der Geräuschabstrahlung | 747 |

| | | |
|----------------------------------------------------------|-----------|-----|
| 17.5 Reduktion der aerodynamischen Motorgeräusche | | 747 |
| 17.5.1 Ansaug- und Abgassystem | | 747 |
| 17.5.2 Kühlsystem | | 748 |
| 17.6 Geräuschreduktion durch Kapselung | | 749 |
| 17.6.1 Einsatz von Kapseln und Kapselmotoren | | 749 |
| 17.6.2 Teilschallquellen der Vollkapsel | | 750 |
| 17.6.3 Oberflächengeräusch | | 751 |
| 17.6.4 Mündungsgeräusche | | 752 |
| 17.6.5 Kühlung und Kühlungsgeräusche | | 753 |
| 17.6.6 Einbau von Kapselmotoren- | | 755 |
| 17.6.6.1 Motorlagerung und Geräteantrieb | | 755 |
| 17.6.6.2 Wartung des Kapselmotors | | 755 |
| 17.6.7 Teilkapselung | | 756 |
| 17.7 Geräteseitige Motorgeräuschdämmung | | 756 |

Teil V

Ausgeführte Motoren

| | | |
|-------------------------------------------------------------|------------------|------------|
| 18 Fahrzeugdieselmotoren | | 761 |
| 18.1 Pkw-Dieselmotoren | | 761 |
| 18.1.1 Verlauf der technischen Entwicklung | . . . *. | 761 |
| 18.1.2 Fahrzeugspezifische Anforderungen | | 762 |
| 18.1.2.1 Eigenschaftskriterien | | 762 |
| 18.1.2.2 Aspekte der Antriebsauslegung | | 764 |
| 18.1.3 Konzeptionelle Merkmale | | 764 |
| 18.1.3.1 Motorgröße und Schnellläufigkeit | | 764 |
| 18.1.3.2 Gemischbildungs- und Verbrennungsverfahren | | 766 |
| 18.1.3.3 Motorkonstruktion | | 771 |
| 18.1.4 Betriebsverhalten | | 782 |
| 18.1.4.1 Kraftstoffverbrauch und CO ₂ -Emission | | 782 |
| 18.1.4.2 Abgasemission | | 784 |
| 18.1.4.3 Leistungsverhalten | | 785 |
| 18.1.4.4 Komfort | | 787 |
| 18.1.5 Entwicklungspotential | | 789 |
| 18.1.5.1 Verbesserungspotential durch andere Ausgangsstoffe | | 790 |
| 18.1.5.2 Entwicklungspotential im Arbeitsprozeß | | 790 |
| 18.1.5.3 Energieverwertung und Nachbehandlung der Abgase | | 791 |
| 18.2 Dieselmotoren für leichte Nutzfahrzeuge | | 792 |
| 18.2.1 Definition „leichte Nutzfahrzeuge“ | | 792 |
| 18.2.2 Anforderungen an Motoren für leichte Nutzfahrzeuge | | 795 |

| | | |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| 18.2.3 | Ausgeführte Motorisierungen leichter Nutzfahrzeuge . . . | 796 |
| 18.2.3.1 | Gesamtbetrachtung | 796 |
| 18.2.3.2 | Ausgewählte Beispiele. | 800 |
| 18.2.4 | Ausblick | 806 |
| 18.3 | Dieselmotoren für schwere Nutzfahrzeuge | 807 |
| 18.3.1 | Definition „schwere Nutzfahrzeuge“. | 807 |
| 18.3.1.1 | Klassifizierung | 807 |
| 18.3.1.2 | Einsatzgebiete | 807 |
| 18.3.2 | Anforderungen an die Motoren. | 809 |
| 18.3.2.1 | Anforderungen durch den Betreiber. | 809 |
| 18.3.2.2 | Gesetzgebung | 821 |
| 18.3.3 | Ausgeführte Motorisierungen schwerer Nutzfahrzeuge . . . | 822 |
| 18.3.3.1 | Gesamtbetrachtung. | 822 |
| 18.3.3.2 | Ausgewählte Ausführungen | 825 |
| 18.3.4 | Ausblick | 833 |
| 18.4 | Schnellaufende Hochleistungsdieselmotoren | 834 |
| 18.4.1 | Einordnung der schnellaufenden Hochleistungs- dieselmotoren. | 834 |
| 18.4.2 | Darstellung hoher Leistungen beim Dieselmotor. | 837 |
| 18.4.3 | Konstruktion von Hochleistungsdieselmotoren. | 843 |
| 18.4.3.1 | Vorbemerkungen | 843 |
| 18.4.3.2 | Grundmotor. | 844 |
| 18.4.3.3 | Aufladeverfahren. | 850 |
| 18.4.3.4 | Ausgeführte Konstruktionen. | 855 |
| 18.4.4 | Ausblick. | 856 |
| 19 | Stationär-und Schiffsmotoren. | 859 |
| 19.1 | Einzylinder-Kleindieselmotoren | 859 |
| 19.1.1 | Einleitung | 859 |
| 19.1.2 | Abstimmung des Pflichtenheftes. | 859 |
| 19.1.3 | Wahl der Grunddaten von Einzylinder-Dieselmotoren . . . | 860 |
| 19.1.3.1 | Leistungsbereich | 860 |
| 19.1.3.2 | Verbrennungsverfahren. | 861 |
| 19.1.3.3 | Hub/Bohrungsverhältnis. | 861 |
| 19.1.3.4 | Kühlverfahren. | 861 |
| 19.1.4 | Aufbau des luftgekühlten Einzylinder-Dieselmotors . . . | 863 |
| 19.1.4.1 | Äußere Kriterien | 863 |
| 19.1.4.2 | Innerer Motoraufbau | 867 |
| 19.2 | Einbau-und Industriebmotoren | 875 |
| 19.2.1 | Definition und Einteilung | 875 |

| | | |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 19.2.2 | Angebot und Auswahl | 876 |
| 19.2.2.1 | Angebotspalette | 876 |
| 19.2.2.2 | Auswahlkriterien | 878 |
| 19.2.3 | Modifizierte Fahrzeugmotoren | 878 |
| 19.2.3.1 | Hinweise zur Auswahl | 878 |
| 19.2.3.2 | Anforderungen an die Modifikation | 879 |
| 19.2.3.3 | Ausführungsbeispiele | 881 |
| 19.2.4 | Indusriemotoren | 885 |
| 19.2.4.1 | Produktkonzept | 885 |
| 19.2.4.2 | Ausgeführte Motoren | 886 |
| 19.2.5 | Ausblick | 888 |
| 19.3 | Mittelschnellaufende Viertakt-Dieselmotoren | 890 |
| 19.3.1 | Definition und Beschreibung | 890 |
| 19.3.1.1 | Einordnung der mittelschnellaufenden Viertakt-Dieselmotoren | 890 |
| 19.3.1.2 | Einsatz mittelschnellaufender Dieselmotoren | 890 |
| 19.3.1.3 | Kraftstoffe | 893 |
| 19.3.1.4 | Vorteile der Mittelschnellläufer | 895 |
| 19.3.2 | Auslegungskriterien | 896 |
| 19.3.2.1 | Spezifische Leistung | 896 |
| 19.3.2.2 | Maximaler Zylinderdruck | 896 |
| 19.3.2.3 | Hub/Bohrungsverhältnis | 897 |
| "~ " | 19.3.2.4 Drehzahl | 898 |
| 19.3.2.5 | Weitere Kriterien | 898 |
| 19.3.3 | Konstruktive Lösungen | 899 |
| 19.3.3.1 | Motorgrundaufbau | 899 |
| 19.3.3.2 | Triebwerk | 900 |
| 19.3.3.3 | Brennraumbauteile | 902 |
| 19.3.3.4 | Einspritzsystem | 906 |
| 19.3.3.5 | Aufladesystem | 907 |
| 19.3.4 | Betriebsüberwachung und Wartung | 909 |
| 19.3.5 | Ausgeführte Motoren | 911 |
| 19.3.6 | Ausblick | 913 |
| 19.4 | Langsamlaufende Zweitakt-Dieselmotoren | 914 |
| 19.4.1 | Entwicklung und Merkmale langsamlaufender Zweitakt-Dieselmotoren | 914 |
| 19.4.1.1 | Entwicklung des Zweitakt-Langsamläufers | 914 |
| 19.4.1.2 | Übergang zur Gleichstromspülung | 916 |
| 19.4.1.3 | Merkmale moderner Zweitakt-Langsamläufer | 917 |
| 19.4.2 | Konstruktion des modernen Zweitakt-Langsamläufers | 920 |
| 19.4.2.1 | Motorfamilien, Leistungskennfeld | 920 |
| 19.4.2.2 | Konstruktive Gestaltung | 921 |
| 19.4.3 | Betriebsverhalten des Zweitakt-Langsamläufers | 925 |

| | | |
|----------|--------------------------------------------------------------------|-----|
| 19.4.4 | Zweitakt-Langsamläufer als Schiffsantrieb | 928 |
| 19.4.4.1 | Abstimmen der Propulsionsanlage | 928 |
| 19.4.4.2 | Dämpfen von Schwingungen im Antriebsstrang | 930 |
| 19.4.5 | Ausblick | 931 |
| 19.4.5.1 | Trendabschätzung der künftigen Entwicklung | 931 |
| 19.4.5.2 | Experimentelle Untersuchung zum Entwicklungspotential | 935 |
| 19.4.5.3 | Abgasemissionen | 940 |

Exkurs:**Die Gemischbildung und Verbrennung im Dieselmotor und ihr Einfluß**

| | |
|--------------------------------------------------------------|-----|
| auf die Schadstoffemission -Rückblick und Ausblick | 942 |
|--------------------------------------------------------------|-----|

Anhang

| | |
|---------------------------------------------------------|------|
| Farbtafeln. | 957 |
| Literaturverzeichnis. | 969 |
| Normen und Richtlinien für Verbrennungsmotoren. | 1003 |
| Sachverzeichnis. | 1025 |