

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Vorwort zur 5. Auflage | V |
| Geleitwort | VI |
| Die Herausgeber | VII |
| Autorenverzeichnis | IX |
| Firmen- und Hochschulverzeichnis | XI |
| Kapitel, Beiträge und Mitarbeiter | XIII |
| Abkürzungs- und Formelverzeichnis | XXIII |
| | |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Vorbemerkungen | 1 |
| 1.2 Modellbildung und Simulation | 2 |
| 1.3 Verbrennungsdiagnostik | 5 |
| 1.4 Möglichkeiten und Grenzen | 5 |
| Literatur | 7 |
| | |
| Teil A: Hubkolbenmotor | 9 |
| | |
| 2 Motorische Verbrennung | 11 |
| 2.1 Brennstoffe | 11 |
| 2.1.1 Kohlenwasserstoffe | 11 |
| 2.1.2 Benzin und Ottobrennstoffe | 16 |
| 2.1.3 Dieselmotoren | 17 |
| 2.1.4 Brennstoffe für Marineanwendungen | 18 |
| 2.1.5 Alternative Brennstoffe | 19 |
| 2.1.6 Klassifikation von Verbrennungsmotoren | 21 |
| 2.2 Dieselmotoren | 22 |
| 2.2.1 Einspritzverfahren und -systeme | 22 |
| 2.2.2 Gemischbildung | 29 |
| 2.2.3 Selbstzündung und Verbrennungsablauf | 31 |
| 2.2.4 Rohemissionen des Dieselmotors | 36 |
| 2.2.5 Potenzial des Dieselmotors | 47 |
| 2.3 Ottomotoren | 48 |
| 2.3.1 Vorgemischte Flammen und Diffusionsverbrennung | 48 |
| 2.3.2 Zündung | 49 |
| 2.3.3 Flammenfrontentwicklung, Einfluss der Turbulenz | 52 |
| 2.3.4 Verbrennungsgeschwindigkeit und Brennverlauf | 55 |
| 2.3.5 Irreguläre Verbrennung | 55 |
| 2.3.6 Brennverfahren, Gemischbildung, Betriebsarten | 60 |
| 2.3.7 Rohemissionen und innermotorische Schadstoffreduktion | 72 |
| 2.3.8 Potenziale des Ottomotors | 98 |

| | | |
|---|--|------------|
| 2.4 | Groß-Gasmotoren | 100 |
| 2.4.1 | Allgemeine Grundlagen | 102 |
| 2.4.2 | Großgas-Ottomotoren | 108 |
| 2.5 | Groß-Dieselmotoren | 132 |
| 2.5.1 | Allgemeine Grundlagen | 132 |
| 2.5.2 | Zwei-Takt Langsamläufer | 137 |
| 2.5.3 | Vier-Takt Mittelschnellläufer | 141 |
| 2.5.4 | Vier-Takt Schnellläufer | 146 |
| | Literatur | 149 |
| 3 | Thermodynamik des Verbrennungsmotors | 153 |
| 3.1 | Energiewandlung | 153 |
| 3.2 | Kinematik des Kurbeltriebs | 154 |
| 3.3 | Kreisprozesse | 158 |
| 3.3.1 | Grundlagen | 158 |
| 3.3.2 | Geschlossene Kreisprozesse | 163 |
| 3.3.3 | Offene Vergleichsprozesse | 169 |
| 3.4 | Realer Motorprozess | 171 |
| 3.4.1 | Kenngrößen und Kennwerte | 172 |
| 3.4.2 | Ottomotoren | 175 |
| 3.4.3 | Dieselmotoren | 176 |
| 3.4.4 | Hybridmotoren | 177 |
| | Literatur | 178 |
| 4 | Aufladung von Verbrennungsmotoren | 179 |
| 4.1 | Aufladeverfahren | 179 |
| 4.1.1 | Druckwellenaufladung | 179 |
| 4.1.2 | Mechanische Aufladung | 183 |
| 4.1.3 | Einstufige Abgasturboaufladung | 188 |
| 4.1.4 | Ladedruckregelung | 193 |
| 4.1.5 | Zweistufige Abgasturboaufladung | 197 |
| 4.1.6 | Verbundaufladung (Turbocompound) | 202 |
| 4.2 | Simulation von Komponenten der Aufladung | 203 |
| 4.2.1 | Strömungsverdichter | 204 |
| 4.2.2 | Verdrängerlader | 213 |
| 4.2.3 | Strömungsturbine | 214 |
| 4.2.4 | Abgasturbolader | 228 |
| 4.2.5 | Ladeluftkühlung | 231 |
| | Literatur | 236 |
| Teil B: Verbrennung, Schadstoffbildung, Emissionsmesstechnik | | 237 |
| 5 | Reaktionskinetik | 239 |
| 5.1 | Grundlagen | 239 |
| 5.1.1 | Chemisches Gleichgewicht | 239 |
| 5.1.2 | Reaktionsgeschwindigkeit | 242 |
| 5.1.3 | Partielles Gleichgewicht und Quasi-Stationarität | 243 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.2 | Reaktionskinetik von Kohlenwasserstoffen | 245 |
| 5.2.1 | Oxidation von Kohlenwasserstoffen | 245 |
| 5.2.2 | Zündvorgänge | 248 |
| 5.2.3 | Reaktionskinetik in der motorischen Simulation | 252 |
| | Literatur | 258 |
| 6 | Schadstoffbildung | 259 |
| 6.1 | Abgaszusammensetzung | 259 |
| 6.2 | Kohlenmonoxid (CO) | 260 |
| 6.3 | Unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) | 261 |
| 6.3.1 | Quellen von HC-Emissionen | 262 |
| 6.3.2 | Nicht limitierte Schadstoffkomponenten | 265 |
| 6.4 | Partikelemission beim Dieselmotor | 269 |
| 6.4.1 | Einführung | 269 |
| 6.4.2 | Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) | 272 |
| 6.4.3 | Entstehung von Ruß | 273 |
| 6.4.4 | Modellierung der Partikelemission | 275 |
| 6.5 | Stickoxide | 278 |
| 6.5.1 | Thermisches NO | 278 |
| 6.5.2 | Prompt-NO | 282 |
| 6.5.3 | Über N ₂ O-Mechanismus erzeugtes NO | 283 |
| 6.5.4 | Brennstoff-Stickstoff | 284 |
| 6.5.5 | Reaktionen zu NO ₂ | 284 |
| | Literatur | 284 |
| 7 | Emissionsmesstechnik | 287 |
| 7.1 | Einführung | 287 |
| 7.2 | Messgasaufbereitung | 287 |
| 7.2.1 | Messgasaufbereitung für Abgas-Messanlagen (AMA) | 288 |
| 7.2.2 | Messgasaufbereitung durch Verdünnung | 291 |
| 7.3 | Messung gasförmiger Bestandteile | 293 |
| 7.3.1 | NDIR – Nichtdispersiver Infrarot Detektor | 293 |
| 7.3.2 | FID – Flame Ionisation Detektor | 295 |
| 7.3.3 | CLD – Chemolumineszenz Detektor | 295 |
| 7.3.4 | PMD – Paramagnetischer Detektor | 296 |
| 7.3.5 | FTIR – Fourier Transform Infrarot Spektroskopie | 297 |
| 7.3.6 | LDS – Laser Dioden Spektroskopie | 298 |
| 7.4 | Messung fester Bestandteile | 299 |
| 7.4.1 | Messung der Partikel entsprechend gesetzlicher Vorgaben | 299 |
| 7.4.2 | Bestimmung von Partikeleigenschaften im Abgas mit alternativen Verfahren | 302 |
| | Literatur | 307 |
| 8 | Verbrennungsdiagnostik | 309 |
| 8.1 | Druckindizierung | 309 |
| 8.1.1 | Allgemeines | 309 |
| 8.1.2 | Die Indiziermesskette | 312 |

| | | |
|--|---|------------|
| 8.1.3 | Einflüsse auf die Messgenauigkeit | 328 |
| 8.1.4 | Kennwerte infolge von äußeren Einflüssen auf den Sensor | 335 |
| 8.1.5 | Varianten für die Sensoradaptierung | 340 |
| 8.1.6 | Elektrische Drift am Ladungsverstärker | 345 |
| 8.1.7 | Druckindizierung im Ein- und Auslasssystem | 346 |
| 8.2 | Druckverlaufsanalyse | 348 |
| 8.2.1 | Bestimmung des Brennverlaufes | 348 |
| 8.2.2 | Verlustteilung | 351 |
| 8.2.3 | Vergleich unterschiedlicher Brennverfahren | 354 |
| 8.3 | Optische Messverfahren | 356 |
| 8.3.1 | Einleitung | 356 |
| 8.3.2 | Anwendungsgebiete optischer Methoden im tabellarischen Überblick | 356 |
| 8.3.3 | Anwendungsbeispiele optischer Methoden | 358 |
| 8.3.4 | Dieselmotoren | 358 |
| 8.3.5 | Ottomotoren | 363 |
| 8.3.6 | Lasermesstechniken | 375 |
| 8.4 | Ausblick Verbrennungsdiagnostik | 376 |
| | Literatur | 377 |
| Teil C: 0D- und 1D-Simulation des Gesamtprozesses | | 379 |
| 9 | Reale Arbeitsprozessrechnung | 381 |
| 9.1 | Ein-Zonen-Zylinder-Modell | 382 |
| 9.1.1 | Grundlagen | 382 |
| 9.1.2 | Ermittlung des Massenstroms durch die Ventile/Ventilhubkurven | 384 |
| 9.1.3 | Wärmeübergang | 386 |
| 9.1.4 | Brennverlauf | 398 |
| 9.1.5 | Klopfende Verbrennung | 410 |
| 9.1.6 | Innere Energie | 413 |
| 9.2 | Zwei-Zonen-Zylinder-Modell | 421 |
| 9.2.1 | Modellierung des Hochdruckteiles nach Hohlbaum | 421 |
| 9.2.2 | Modellierung des Hochdruckteiles nach Heider | 424 |
| 9.2.3 | Modellierung des Ladungswechsels beim 2-Takt-Motor | 428 |
| 9.3 | Modellierung des Gaspfades | 430 |
| 9.3.1 | Modellierung peripherer Komponenten | 430 |
| 9.3.2 | Modellbildung | 432 |
| 9.3.3 | Integrationsverfahren | 433 |
| 9.4 | Gasdynamik | 434 |
| 9.4.1 | Grundgleichungen der eindimensionalen Gasdynamik | 434 |
| 9.4.2 | Numerische Lösungsverfahren | 438 |
| 9.4.3 | Randbedingungen | 440 |
| 9.5 | Hydraulische Simulation | 445 |
| 9.5.1 | Modellierung der Grundkomponenten | 446 |
| 9.5.2 | Anwendungsbeispiel | 449 |
| | Literatur | 450 |

| | |
|---|-----|
| 10 Phänomenologische Verbrennungsmodelle | 453 |
| 10.1 Dieselmotorische Verbrennung | 454 |
| 10.1.1 Nulldimensionale Brennverlaufsfunction | 454 |
| 10.1.2 Stationärer Gasstrahl | 456 |
| 10.1.3 Paket-Modelle | 460 |
| 10.1.4 Zeitskalen Modelle | 467 |
| 10.2 Ottomotorische Verbrennung | 471 |
| 10.2.1 Laminare und turbulente Flammengeschwindigkeit | 471 |
| 10.2.2 Wärmefreisetzung | 473 |
| 10.2.3 Zündung | 475 |
| 10.2.4 Klopfen | 476 |
| Literatur | 477 |
| 11 Abgasnachbehandlungssysteme | 479 |
| 11.1 Methoden der Abgasnachbehandlung | 479 |
| 11.2 Modellbildung und Simulation | 481 |
| 11.3 Abgaskatalysatoren | 481 |
| 11.3.1 Grundgleichungen | 482 |
| 11.3.2 Katalysator-Typen | 485 |
| 11.4 Dieselpartikelfilter | 490 |
| 11.4.1 Grundgleichungen | 490 |
| 11.4.2 Beladung und Druckverlust | 494 |
| 11.4.3 Regeneration und Temperaturverteilung | 495 |
| 11.5 Dosiereinheiten | 496 |
| 11.6 Gesamtsystem | 497 |
| Literatur | 498 |
| 12 Gesamtprozessanalyse | 499 |
| 12.1 Allgemeines | 499 |
| 12.2 Thermisches Motorverhalten | 499 |
| 12.2.1 Grundlagen | 499 |
| 12.2.2 Kühlkreislauf | 500 |
| 12.2.3 Ölkreislauf | 501 |
| 12.3 Motorreibung | 502 |
| 12.3.1 Reibungsansatz für den betriebswarmen Motor | 502 |
| 12.3.2 Reibungsansatz für den Warmlauf | 503 |
| 12.4 Stationäre Simulationsergebnisse | 505 |
| 12.5 Transiente Simulationsergebnisse | 511 |
| Literatur | 515 |
| 13 Beherrschung komplexer Entwicklungsprozesse | 517 |
| 13.1 Notwendigkeit von Optimierungsstrategien | 518 |
| 13.2 Modellstrukturierung | 519 |
| 13.3 Modellansätze für die Optimierung | 525 |
| 13.4 Anwendungsbeispiele für Optimierungsaufgaben | 527 |
| 13.4.1 Emissionsoptimierung Diesel PKW | 527 |
| 13.4.2 Volllastoptimierung Ottomotor | 533 |

| | | |
|---|--|------------|
| 13.4.3 | Variantenauslegung von Arbeitsmaschinen | 536 |
| 13.4.4 | Optimierung des Energiemanagements von Hybridfahrzeugen in kritischen Zyklusabschnitten | 541 |
| 13.5 | Funktionsbedeutung | 544 |
| 13.6 | Zusammenfassung | 548 |
| | Literatur | 549 |
| Teil D: 3D-Simulation des Arbeitsprozesses | | 551 |
| 14 | Dreidimensionale Strömungsfelder | 553 |
| 14.1 | Strömungsmechanische Grundgleichungen | 555 |
| 14.1.1 | Massen- und Impulstransport | 555 |
| 14.1.2 | Transport von innerer Energie und Spezies | 558 |
| 14.1.3 | Passive Skalare und Mischungsbruch | 559 |
| 14.1.4 | Konservative Formulierung der Transportgleichungen | 560 |
| 14.2 | Turbulenz und Turbulenzmodelle | 560 |
| 14.2.1 | Phänomenologie der Turbulenz | 560 |
| 14.2.2 | Modellierung der Turbulenz | 562 |
| 14.2.3 | Turbulentes Wandgesetz | 565 |
| 14.2.4 | Modellierung des turbulenten Mischungszustandes | 567 |
| 14.2.5 | Die Gültigkeit von Turbulenzmodellen; Alternativansätze | 570 |
| 14.3 | Numerik | 574 |
| 14.3.1 | Finites-Volumen-Verfahren | 574 |
| 14.3.2 | Diskretisierung des Diffusionsterms – Zentrale Differenzen | 575 |
| 14.3.3 | Diskretisierung des Konvektionsterms – Aufwindschema | 576 |
| 14.3.4 | Diskretisierung der Zeitableitung – Implizites Schema | 578 |
| 14.3.5 | Diskretisierung des Quellterms | 579 |
| 14.3.6 | Operator-Split-Verfahren | 580 |
| 14.3.7 | Diskretisierung und numerische Lösung der Impuls-Gleichung ... | 580 |
| 14.4 | Rechnernetze | 581 |
| 14.5 | Beispiele | 583 |
| 14.5.1 | Simulation von Strömungsstrukturen im Zylinder: Ottomotor | 583 |
| 14.5.2 | Simulation von Strömungsstrukturen im Zylinder: Dieselmotor ... | 584 |
| 14.5.3 | Düseninnenströmung | 586 |
| | Literatur | 590 |
| 15 | 3D-Simulation der Aufladung | 591 |
| 15.1 | Allgemeines | 591 |
| 15.2 | Grundlagen der 3D-CFD-Simulation von Turbomaschinen | 592 |
| 15.2.1 | Behandlung unterschiedlicher und bewegter Koordinatensysteme | 592 |
| 15.2.2 | Gittergenerierung für Turbomaschinen | 594 |
| 15.2.3 | Aufbau von Berechnungsmodellen und Randbedingungen | 596 |
| 15.3 | Postprocessing: Ergebnisanalyse und -darstellung | 598 |
| 15.4 | Anwendungsbeispiele | 600 |
| 15.4.1 | Analyse des Verdichterverhaltens | 600 |
| 15.4.2 | Untersuchung von Turbinenvarianten | 602 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 16 | Simulation von Einspritzprozessen | 603 |
| 16.1 | Einzeltropfenprozesse | 603 |
| 16.1.1 | Impulsaustausch | 603 |
| 16.1.2 | Massen- und Wärmeaustausch (Einkomponentenmodell) | 604 |
| 16.1.3 | Massen- und Wärmeaustausch (Mehrkomponenten- modellierung) | 607 |
| 16.1.4 | Flashboiling | 611 |
| 16.2 | Strahlstatistik | 612 |
| 16.2.1 | Boltzmann-Williams-Gleichung | 613 |
| 16.2.2 | Numerische Lösung der Boltzmann-Williams-Gleichung: Das Standardmodell (Lagrange-Formulierung) | 614 |
| 16.2.3 | Exkurs: Numerische Bestimmung von Zufallszahlen | 616 |
| 16.2.4 | Partikel-Startbedingungen am Düsenaustritt | 618 |
| 16.2.5 | Modellierung von Zerfallsprozessen | 619 |
| 16.2.6 | Modellierung von Stoßprozessen | 623 |
| 16.2.7 | Modellierung der turbulenten Dispersion im Standard-Modell ... | 624 |
| 16.2.8 | Beschreibung der turbulenten Dispersion mittels Fokker-Planck-Gleichung | 625 |
| 16.2.9 | Die Diffusionsdarstellung der Fokker-Planck-Gleichung | 630 |
| 16.2.10 | Probleme des Standard-Strahlmodells | 633 |
| 16.2.11 | Benzindirekteinspritzung für Schichtladung mit nach außen öffnendem Piezo-Injektor | 636 |
| 16.3 | Euler-Strahlmodelle | 639 |
| 16.3.1 | Lokal homogene Strömung | 641 |
| 16.3.2 | Einbettungen von 1-D-Euler-Verfahren und anderen Ansätzen .. | 643 |
| 16.3.3 | 3D-Euler-Verfahren | 646 |
| | Literatur | 649 |
| 17 | Simulation der Verbrennung | 651 |
| 17.1 | Verbrennungsregimes | 651 |
| 17.2 | Allgemeines Vorgehen | 653 |
| 17.3 | Diesel-Verbrennung | 655 |
| 17.3.1 | Simulation der Wärmefreisetzung | 655 |
| 17.3.2 | Zündung | 662 |
| 17.3.3 | NO _x -Bildung | 662 |
| 17.3.4 | Rußbildung | 664 |
| 17.3.5 | HC- und CO-Emissionen | 665 |
| 17.4 | Homogener Benzinmotor (Vormischverbrennung) | 665 |
| 17.4.1 | Zweiphasenproblematik | 666 |
| 17.4.2 | Magnussen-Modell | 669 |
| 17.4.3 | Flammenflächenmodelle (auch Coherent Flame Models) | 673 |
| 17.4.4 | G-Gleichung | 676 |
| 17.4.5 | Diffusive G-Gleichung | 679 |
| 17.4.6 | Zündung | 680 |
| 17.4.7 | Klopfen | 681 |
| 17.4.8 | Schadstoffbildung | 681 |

| | | |
|---|---|------------|
| 17.5 | Benzinmotor mit Ladungsschichtung (teilweise vorgemischte Flammen) .. | 681 |
| 17.6 | Strömungsmechanische Simulation von Ladungswechsel, Gemischbildung und Verbrennung: Ausblick | 686 |
| 17.6.1 | Netzbewegung | 687 |
| 17.6.2 | Numerik | 687 |
| 17.6.3 | Turbulenz | 688 |
| 17.6.4 | Modellierung der Einspritzprozesse | 688 |
| 17.6.5 | Modellierung der Verbrennung | 691 |
| | Literatur | 692 |
| Teil E: Systembetrachtungen und Ausblick | | 695 |
| 18 | Der Verbrennungsmotor als Teil des gesamten Antriebsstrangs | 697 |
| 18.1 | Zukünftige Entwicklungsziele der Verbrennungsmotoren | 697 |
| 18.1.1 | Einführung | 697 |
| 18.1.2 | Konfiguration des optimalen Antriebssystems | 699 |
| 18.1.3 | Technologieelemente künftiger Antriebsstrang-Konfigurationen .. | 700 |
| 18.1.4 | Vorauslegung | 702 |
| 18.1.5 | Entwicklungsphase | 708 |
| 18.1.6 | Antriebsstrangkonfigurationen – Beispiele | 710 |
| 18.2 | Ansätze zur simulationsgestützten Motorauslegung | 715 |
| 18.2.1 | Simulation im Motorentwicklungsprozess | 716 |
| 18.2.2 | Skalierbare Motor- und Gesamtsystemmodellierung | 719 |
| 18.2.3 | Ausgewählte Anwendungen | 725 |
| 18.2.4 | Ausblick | 731 |
| | Literatur | 732 |
| 19 | Zukunft des Verbrennungsmotors | 735 |
| 19.1 | Einleitung | 735 |
| 19.2 | Die Rolle der Verbrennungsmotoren für die Mobilität der Zukunft | 736 |
| 19.3 | Verbrennungsmotoren – Gestern, Heute, Morgen | 743 |
| 19.3.1 | Alternative Konzepte | 743 |
| 19.3.2 | Entwicklungspotenzial des Verbrennungsmotors | 751 |
| 19.4 | Zukünftige Kraftstoffe | 766 |
| 19.4.1 | Anforderungen | 766 |
| 19.4.2 | Bio-Kraftstoffe | 770 |
| 19.4.3 | Synthetische Kraftstoffe (<i>SynFuel</i>) | 772 |
| 19.4.4 | Wasserstoff | 772 |
| 19.5 | Zusammenfassung/Ausblick | 774 |
| | Literatur | 776 |
| Sachwortverzeichnis | | 779 |