

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 6. 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	131
2.5.1	Allgemeine Grundlagen	131
2.5.2	Zwei-Takt Langsamläufer	135
2.5.3	Vier-Takt Mittelschnellläufer	140
2.5.4	Vier-Takt Schnellläufer	144
	Literatur	147
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 Abgasurboaufladung	188
4.1.4	Ladedruckregelung	193
4.1.5	Zweistufige Abgasurboaufladung	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	Abgasurbolader	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	Variantauslegung von Arbeitsmaschinen	536
13.4.4	Optimierung des Energiemanagements von Hybridfahrzeugen in kritischen Zyklusabschnitten	541
13.5	Funktionsbedatung	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	Einzeltröpfchenprozesse	603
16.1.1	Impulsaustausch	603
16.1.2	Massen- und Wärmeaustausch (Einkomponentenmodell)	604
16.1.3	Massen- und Wärmeaustausch (Mehrkomponentenmodellierung)	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	NOx-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