

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 4. Auflage	V
Die Herausgeber	VII
Autorenverzeichnis	IX
Firmen- und Hochschulverzeichnis	XI
Kapitel, Beiträge und Mitarbeiter	XIII
Abkürzungs- und Formelverzeichnis	XXIII
1 Einleitung	3
1.1 Vorbemerkungen	3
1.2 Modellbildung	3
1.3 Simulation	5
<i>Literatur</i>	8
2 Der Hubkolbenmotor	9
2.1 Energiewandlung	9
2.2 Geometrie des Kurbeltriebs	10
2.3 Thermodynamik des Verbrennungsmotors	15
2.3.1 Grundlagen	15
2.3.2 Geschlossene Kreisprozesse	20
2.3.3 Offene Vergleichsprozesse	27
2.4 Kenngrößen und Kennwerte	31
2.5 Motorenkennfelder	34
2.5.1 Ottomotoren	34
2.5.2 Dieselmotoren	36
<i>Literatur</i>	37
3 Verbrennungsdiagnostik	39
3.1 Grundlagen der Druckindizierung	39
3.1.1 Allgemeines	39
3.1.2 Die piezoelektrische Druckmesskette	42
3.1.3 Einbauvarianten	59
3.1.4 Wahl der Messstelle	63
3.1.5 Bestimmung des Druckniveaus	65
3.1.6 Absolutdruckmessende Verfahren	68
3.1.7 Winkel- und Triggermarkierung	70
3.1.8 OT-Zuordnung	73
3.1.9 Druckindizierung im Ein- und Auslasssystem	77
3.1.10 Datenerfassung	79
3.2 Druckverlaufsanalyse	80
3.2.1 Bestimmung des Brennverlaufs	80

3.2.2	Verlustteilung	84
3.2.3	Vergleich unterschiedlicher Brennverfahren	87
3.3	Optische Messverfahren	90
3.3.1	Einleitung	90
3.3.2	Anwendungsgebiete optischer Methoden im tabellarischen Überblick	90
3.3.3	Anwendungsbeispiele optischer Methoden	92
3.3.4	Dieselmotoren	92
3.3.5	Ottomotoren	98
3.3.6	Lasermesstechniken	111
3.3.7	Ausblick Verbrennungsdiagnostik – optische Messverfahren	112
	<i>Literatur</i>	113
4	Motorische Verbrennung	115
4.1	Brennstoffe	115
4.1.1	Benzin und Ottobrennstoffe	120
4.1.2	Dieselbrennstoffe	121
4.1.3	Alternative Brennstoffe	122
4.2	Dieselmotoren	124
4.2.1	Einspritzverfahren und -systeme	125
4.2.2	Gemischbildung	132
4.2.3	Selbstzündung und Verbrennungsablauf	135
4.3	Ottomotoren	140
4.3.1	Unterschiede zwischen der vorgemischten Flamme und der Diffusionsverbrennung	140
4.3.2	Zündung	141
4.3.3	Flammenfrontentwicklung nach der Zündung, Einfluss der Turbulenz	144
4.3.4	Aussagen über die Verbrennungsgeschwindigkeit durch den Brennverlauf	147
4.3.5	Irreguläre Verbrennung	148
4.3.6	Brennverfahren, Gemischbildung, Betriebsarten	152
	<i>Literatur</i>	165
5	Reaktionskinetik	167
5.1	Grundlagen	167
5.1.1	Chemisches Gleichgewicht	167
5.1.2	Reaktionsgeschwindigkeit	170
5.1.3	Partielles Gleichgewicht und Quasi-Stationarität	171
5.2	Reaktionskinetik von Kohlenwasserstoffen	174
5.2.1	Oxidation von Kohlenwasserstoffen	174
5.2.2	Zündvorgänge	176
5.2.3	Reaktionskinetik in der motorischen Simulation	182
	<i>Literatur</i>	188

6 Schadstoffbildung	189
6.1 Abgaszusammensetzung	189
6.2 Kohlenmonoxid (CO)	191
6.3 Unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC)	192
6.3.1 Quellen von HC-Emissionen	192
6.3.2 Nicht limitierte Schadstoffkomponenten	196
6.4 Partikelemission beim Dieselmotor	201
6.4.1 Einführung	201
6.4.2 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	203
6.4.3 Entstehung von Ruß	205
6.4.4 Modellierung der Partikelemission	207
6.5 Stickoxide	210
6.5.1 Thermisches NO	210
6.5.2 Prompt-NO	214
6.5.3 Über N_2O -Mechanismus erzeugtes NO	216
6.5.4 Brennstoff-Stickstoff	216
6.5.5 Reaktionen zu NO_2	217
<i>Literatur</i>	217
7 Reale Arbeitsprozessrechnung	223
7.1 Ein-Zonen-Zylinder-Modell	224
7.1.1 Grundlagen	224
7.1.2 Mechanische Arbeit	226
7.1.3 Ermittlung des Massenstroms durch die Ventile/Ventilhubkurven	226
7.1.4 Wärmeübergang im Zylinder	229
7.1.5 Wärmeübergang im Auslasskrümmer	238
7.1.6 Wandtemperaturmodelle	239
7.1.7 Brennverlauf	242
7.1.8 Klopfende Verbrennung	256
7.1.9 Innere Energie	260
7.2 Zwei-Zonen-Zylinder-Modell	269
7.2.1 Modellierung des Hochdruckteiles nach Hohlbaum	269
7.2.2 Modellierung des Hochdruckteiles nach Heider	272
7.2.3 Ergebnisse der NO_x -Berechnung mit Zwei-Zonen-Modellen	275
7.2.4 Modellierung des Ladungswechsels beim 2-Takt-Motor	277
7.3 Modellierung des Gaspfades	280
7.3.1 Modellierung peripherer Komponenten	280
7.3.2 Modellbildung	281
7.3.3 Integrationsverfahren	282
7.4 Gasdynamik	284
7.4.1 Grundgleichungen der eindimensionalen Gasdynamik	284
7.4.2 Numerische Lösungsverfahren	288
7.4.3 Randbedingungen	291

7.5	Hydraulische Simulation	298
7.5.1	Modellierung der Grundkomponenten	298
7.5.2	Anwendungsbeispiel	301
	<i>Literatur</i>	303
8	Aufladung von Verbrennungsmotoren	307
8.1	Aufladeverfahren	307
8.1.1	Druckwellenaufladung	307
8.1.2	Mechanische Aufladung	311
8.1.3	Abgasturboaufladung	318
8.2	Simulation der Aufladung	332
8.2.1	Strömungsverdichter	332
8.2.2	Verdrängerlader	341
8.2.3	Strömungsturbine	342
8.2.4	Abgasturbolader	353
8.2.5	Ladeluftkühlung	357
	<i>Literatur</i>	363
9	Abgasnachbehandlungssysteme	365
9.1	Modellbildung und Simulation	365
9.2	Abgaskatalysatoren	365
9.2.1	Grundgleichungen	366
9.2.2	Katalysator Typen	368
9.3	Dieselpartikelfilter	373
9.3.1	Grundgleichungen	373
9.3.2	Beladung und Druckverlust	377
9.3.3	Regeneration und Temperaturverteilung	379
9.4	Dosiereinheiten	380
9.5	Gesamtsystem	381
	<i>Literatur</i>	382
10	Gesamtprozessanalyse	385
10.1	Allgemeines	385
10.2	Thermisches Motorverhalten	385
10.2.1	Grundlagen	385
10.2.2	Kühlkreislauf	386
10.2.3	Ölkreislauf	388
10.3	Motorreibung	389
10.3.1	Reibungsansatz für den betriebswarmen Motor	389
10.3.2	Reibungsansatz für den Warmlauf	390
10.4	Stationäre Simulationsergebnisse (Parametervariationen)	393
10.4.1	Lastvariation beim gedrosselten Ottomotor	393
10.4.2	Einfluss von Zündung und Brenndauer	394
10.4.3	Variation von Verdichtungsverhältnis, Last und Spitzendruck am Großdieselmotor	396

10.4.4	Untersuchungen zu vollvariablen Ventiltrieben	397
10.4.5	Variation der Saugrohrlänge und der Ventilsteuerzeiten (Ottomotor, Volllast)	399
10.4.6	Abgasrückführung bei einem abgasturboaufgeladenen Pkw-Dieselmotor	400
10.5	Transiente Simulationsergebnisse	403
10.5.1	Beschleunigung eines NFZ von 0 auf 80 km/h	403
10.5.2	Eingriffsmöglichkeiten am Abgasturbolader	405
10.5.3	Teillast im ECE-Zyklus	407
10.5.4	Warmlauf im ECE-Zyklus	409
10.5.5	Volllast-Beschleunigung beim turboaufgeladenen Ottomotor	410
	<i>Literatur</i>	414
11	Phänomenologische Verbrennungsmodelle	415
11.1	Dieselmotorische Verbrennung	416
11.1.1	Nulldimensionale Brennverlaufsfunktion	416
11.1.2	Stationärer Gasstrahl	418
11.1.3	Paket-Modelle	423
11.1.4	Zeitskalen Modelle	431
11.2	Ottomotorische Verbrennung	433
11.2.1	Laminare und turbulente Flammengeschwindigkeit	433
11.2.2	Wärmefreisetzung	435
11.2.3	Zündung	438
11.2.4	Klopfen	439
	<i>Literatur</i>	440
12	Dreidimensionale Strömungsfelder	443
12.1	Strömungsmechanische Grundgleichungen	443
12.1.1	Massen- und Impulstransport	443
12.1.2	Transport von innerer Energie und Spezies	446
12.1.3	Passive Skalare und Mischungsbruch	448
12.1.4	Konservative Formulierung der Transportgleichungen	449
12.2	Turbulenz und Turbulenzmodelle	449
12.2.1	Phänomenologie der Turbulenz	449
12.2.2	Modellierung der Turbulenz	451
12.2.3	Turbulentes Wandgesetz	454
12.2.4	Modellierung des turbulenten Mischungszustandes	457
12.2.5	Die Gültigkeit von Turbulenzmodellen; Alternativansätze	460
12.3	Numerik	465
12.3.1	Finites-Volumen-Verfahren	465
12.3.2	Diskretisierung des Diffusionsterms – Zentrale Differenzen	466
12.3.3	Diskretisierung des Konvektionsterms – Aufwindschema	467
12.3.4	Diskretisierung der Zeitableitung – Implizites Schema	469
12.3.5	Diskretisierung des Quellterms	470
12.3.6	Operator-Split-Verfahren	471
12.3.7	Diskretisierung und numerische Lösung der Impuls-Gleichung	471

12.4	Rechennetze	472
12.5	Beispiele.....	474
12.5.1	Simulation von Strömungsstrukturen im Zylinder: Ottomotor.....	474
12.5.2	Simulation von Strömungsstrukturen im Zylinder: Dieselmotor ...	476
12.5.3	Düseninnenströmung	478
	<i>Literatur</i>	482
13	Simulation von Einspritzprozessen	483
13.1	Einzeltropfenprozesse	483
13.1.1	Impulsaustausch	483
13.1.2	Massen- und Wärmeaustausch (Einkomponentenmodell)	484
13.1.3	Massen- und Wärmeaustausch in Mehrkomponenten- modellierung	488
13.1.4	Flashboiling	492
13.2	Strahlstatistik	493
13.2.1	Boltzmann-Williams-Gleichung	494
13.2.2	Numerische Lösung der Boltzmann-Williams-Gleichung; das Standardmodell (Lagrange-Formulierung)	496
13.2.3	Exkurs: Numerische Bestimmung von Zufallszahlen	498
13.2.4	Partikel-Startbedingungen am Düsenaustritt	499
13.2.5	Modellierung von Zerfallsprozessen	500
13.2.6	Modellierung von Stoßprozessen	505
13.2.7	Modellierung der turbulenten Dispersion im Standard-Modell	506
13.2.8	Beschreibung der turbulenten Dispersion mittels Fokker-Planck-Gleichung	507
13.2.9	Die Diffusionsdarstellung der Fokker-Planck-Gleichung	513
13.2.10	Probleme des Standard-Strahlmodells	516
13.2.11	Applikationsbeispiel: Benzindirekteinspritzung für Schichtladung mit zentral angeordnetem nach außen öffnendem Piezo-Injektor	520
13.3	Euler-Strahlmodelle bzw. Formulierung der Strahldynamik über Observablen-Mittelwerte	522
13.3.1	Lokal homogene Strömung	524
13.3.2	Einbettungen von 1-D-Euler-Verfahren und anderen Ansätzen	526
13.3.3	3-D-Euler-Verfahren	529
	<i>Literatur</i>	533
14	Simulation der Verbrennung	535
14.1	Exkurs: Verbrennungsregimes	535
14.2	Allgemeines Vorgehen	537
14.3	Diesel-Verbrennung	539
14.3.1	Simulation der Wärmefreisetzung	540
14.3.2	Zündung	547
14.3.3	NO _x -Bildung	548
14.3.4	Rußbildung	549
14.3.5	HC- und CO-Emissionen	550

14.4	Homogener Benzinmotor (Vormischverbrennung)	551
14.4.1	Zweiphasenproblematik	551
14.4.2	Magnussen-Modell	554
14.4.3	Flammenflächenmodelle	559
14.4.4	G-Gleichung	562
14.4.5	Diffusive G-Gleichung	565
14.4.6	Zündung	566
14.4.7	Klopfen	567
14.4.8	Schadstoffbildung	567
14.5	Benzinmotor mit Ladungsschichtung (teilweise vorgemischte Flammen)	567
14.6	Strömungsmechanische Simulation von Ladungswechsel, Gemischbildung und Verbrennung: Ausblick	572
14.6.1	Netzbewegung	574
14.6.2	Numerik	574
14.6.3	Turbulenz	575
14.6.4	Modellierung der Einspritzprozesse	575
14.6.5	Modellierung der Verbrennung	578
	<i>Literatur</i>	579
15	3-D-Simulation der Aufladung	581
15.1	Allgemeines	581
15.2	Grundlagen der 3-D-CFD Simulation von Turbomaschinen	581
15.2.1	Behandlung unterschiedlicher und bewegter Koordinatensysteme	582
15.2.2	Gittergenerierung für Turbomaschinen	585
15.2.3	Aufbau von Berechnungsmodellen und Randbedingungen	587
15.3	Postprocessing: Ergebnisanalyse und -darstellung	589
15.4	Anwendungsbeispiele	592
15.4.1	Analyse des Verdichterverhaltens	592
15.4.2	Untersuchung von Turbinenvarianten	593
	Sachwortverzeichnis	595