

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 4. Auflage .....	V
Die Herausgeber .....	VII
Autorenverzeichnis .....	IX
Firmen- und Hochschulverzeichnis .....	XI
Kapitel, Beiträge und Mitarbeiter .....	XIII
Abkürzungs- und Formelverzeichnis .....	XXIII
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>3</b>
1.1 Vorbemerkungen .....	3
1.2 Modellbildung .....	3
1.3 Simulation .....	5
<i>Literatur</i> .....	8
<b>2 Der Hubkolbenmotor .....</b>	<b>9</b>
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
<b>3 Verbrennungsdiagnostik .....</b>	<b>39</b>
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
<b>4</b>	<b>Motorische Verbrennung</b> .....	115
4.1	Brennstoffe .....	115
4.1.1	Benzin und Ottobrennstoffe .....	120
4.1.2	Dieselsbrennstoffe .....	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
<b>5</b>	<b>Reaktionskinetik</b> .....	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

<b>6</b>	<b>Schadstoffbildung</b>	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 <sub>2</sub> O-Mechanismus erzeugtes NO	216
6.5.4	Brennstoff-Stickstoff	216
6.5.5	Reaktionen zu NO <sub>2</sub>	217
	<i>Literatur</i>	217
<b>7</b>	<b>Reale Arbeitsprozessrechnung</b>	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 <sub>x</sub> -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
<b>8</b>	<b>Aufladung von Verbrennungsmotoren</b> .....	<b>307</b>
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
<b>9</b>	<b>Abgasnachbehandlungssysteme</b> .....	<b>365</b>
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
<b>10</b>	<b>Gesamtprozessanalyse</b> .....	<b>385</b>
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
<b>11</b>	<b>Phänomenologische Verbrennungsmodelle</b> .....	<b>415</b>
11.1	Dieselmotorische Verbrennung .....	416
11.1.1	Nulldimensionale Brennverlaufsfunction .....	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
<b>12</b>	<b>Dreidimensionale Strömungsfelder</b> .....	<b>443</b>
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
<b>13</b>	<b>Simulation von Einspritzprozessen .....</b>	<b>483</b>
13.1	Einzeltröpfchenprozesse .....	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	Anwendungsbeispiel: 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
<b>14</b>	<b>Simulation der Verbrennung .....</b>	<b>535</b>
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 <sub>x</sub> -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
<b>15</b>	<b>3-D-Simulation der Aufladung</b>	<b>581</b>
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
	<b>Sachwortverzeichnis</b>	<b>595</b>