

Günter P. Merker | Christian Schwarz (Hrsg.)

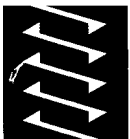
Grundlagen Verbrennungsmotoren

Simulation der Gemischbildung, Verbrennung,
Schadstoffbildung und Aufladung

4., überarbeitete und aktualisierte Auflage

Mit 345 Abbildungen und 31 Tabellen

PRAXIS | ATZ/MTZ-Fachbuch



VIEWEG+
TEUBNER

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	Dieselmotoren	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 ₂ O-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 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
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
<i>d</i> 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	Rechenetze.....	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	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	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