

**Günter Merker, Christian Schwarz,
Gunnar Stiesch, Frank Otto**

Verbrennungsmotoren

Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung

3., überarbeitete und aktualisierte Auflage

Mit 245 Abbildungen und 15 Tabellen



Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen

XII

1 Einleitung	1
1.1 Vorbemerkungen	1
1.2 Modellbildung	1
1.3 Simulation	3
2 Einführung in die Funktionsweise von Verbrennungsmotoren	6
2.1 Energiewandlung	6
2.2 Hubkolbenmotoren	7
2.2.1 Der Kurbeltrieb	8
2.2.2 Gas- und Massenkräfte	10
2.2.3 Arbeitsverfahren	12
2.3 Thermodynamik des Verbrennungsmotors	13
2.3.1 Grundlagen	13
2.3.2 Geschlossene Kreisprozesse	18
2.3.3 Offene Vergleichsprozesse	26
2.4 Kenngrößen und Kennwerte	29
2.5 Motorenkennfelder	32
2.5.1 Ottomotoren	32
2.5.2 Dieselmotoren	34
2.6 Aufladung	36
2.6.1 Aufladeverfahren	36
2.6.2 Mechanische Aufladung	38
2.6.3 Abgasturbo-Stauaufladung	39
2.6.4 Abgasturbo-Stoßaufladung	42
3 Grundlagen der Reaktionskinetik	45
3.1 Chemisches Gleichgewicht	45
3.2 Reaktionsgeschwindigkeit	48
3.3 Partielles Gleichgewicht und Quasi-Stationarität	49
3.4 Brennstoffe	52
3.4.1 Chemischer Aufbau	52
3.4.2 Physikalisch-chemische Eigenschaften	55
3.5 Oxidation von Kohlenwasserstoffen	58

4 Motorische Verbrennung	61
4.1 Ottomotor	61
4.1.1 Gemischbildung	61
4.1.2 Zündung	65
4.1.3 Verbrennungsablauf	66
4.1.4 Abnormale Verbrennung	70
4.1.5 Kontrollierte Selbstzündung	72
4.2 Dieselmotor	74
4.2.1 Einspritzverfahren und -systeme	75
4.2.2 Gemischbildung	82
4.2.3 Selbstzündung	83
4.2.4 Verbrennungsablauf	86
4.2.5 Homogene Verbrennung	88
4.3 Druckverlaufsanalyse	90
4.3.1 Bestimmung des Brennverlaufs	90
4.3.2 Verlustteilung	94
4.3.3 Vergleich unterschiedlicher Brennverfahren	97
5 Phänomenologische Verbrennungsmodelle	100
5.1 Dieselmotorische Verbrennung	101
5.1.1 Nulldimensionale Brennverlaufsfunction	101
5.1.2 Stationärer Gasstrahl	102
5.1.3 Paket-Modelle	106
5.1.4 Zeitskalen-Modelle	113
5.2 Ottomotorische Verbrennung	115
6 Schadstoffbildung	119
6.1 Abgaszusammensetzung	119
6.2 Kohlenmonoxid (CO)	120
6.3 Unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC)	121
6.3.1 Limitierte Schadstoffkomponenten	121
6.3.2 Nicht limitierte Schadstoffkomponenten	125
6.4 Partikelemission beim Dieselmotor	130
6.4.1 Einführung	130
6.4.2 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	131
6.4.3 Entstehung von Ruß	132
6.4.4 Modellierung der Partikelemission	134
6.5 Stickoxide	135
6.5.1 Thermisches NO	136
6.5.2 Prompt-NO	142
6.5.3 Über N ₂ O erzeugtes NO	143
6.5.4 Brennstoff-Stickstoff	143

7 Reale Arbeitsprozessrechnung	144
7.1 Ein-Zonen-Zylinder-Modell	145
7.1.1 Grundlagen	145
7.1.2 Mechanische Arbeit	147
7.1.3 Ermittlung des Massenstroms durch die Ventile / Ventilhubkurven	147
7.1.4 Wärmeübergang im Zylinder	150
7.1.5 Wärmeübergang im Auslasskrümmer	159
7.1.6 Wandtemperaturmodelle	160
7.1.7 Brennverlauf	163
7.1.8 Klopfende Verbrennung	176
7.1.9 Innere Energie	180
7.2 Zwei-Zonen-Zylinder-Modell	189
7.2.1 Modellierung des Hochdruckteils nach Hohlbaum	189
7.2.2 Modellierung des Hochdruckteils nach Heider	192
7.2.3 Ergebnisse der NO _x -Berechnung mit Zwei-Zonen-Modellen	195
7.2.4 Modellierung des Ladungswechsels beim 2-Takt-Motor	197
7.3 Modellierung des Gaspfades	199
7.3.1 Modellierung peripherer Komponenten	199
7.3.2 Modellbildung	201
7.3.3 Integrationsverfahren	202
7.4 Gasdynamik	203
7.4.1 Grundgleichungen der eindimensionalen Gasdynamik	203
7.4.2 Numerische Lösungsverfahren	207
7.4.3 Randbedingungen	210
7.5 Aufladung	216
7.5.1 Strömungsverdichter	216
7.5.2 Verdrängerlader	226
7.5.3 Strömungsturbine	227
7.5.4 Abgasturbolader	239
7.5.5 Ladeluftkühlung	242
8 Gesamtprozessanalyse	248
8.1 Allgemeines	248
8.2 Thermisches Motorverhalten	248
8.2.1 Grundlagen	248
8.2.2 Modellierung des Rohrleitungssystems	249
8.2.3 Kühlkreislauf	251
8.2.4 Ölkreislauf	254
8.2.5 Physikalische Eigenschaften von Öl und Kühlwasser	259
8.3 Motorreibung	261
8.3.1 Reibungsansatz für den betriebswarmen Motor	261
8.3.2 Reibungsansatz für den Warmlauf	262

8.4	Motorsteuerung/Regelung	264
8.4.1	PID-Regler	264
8.4.2	Lastregelung	265
8.4.3	Verbrennungsregelung	266
8.4.4	Regelung der Abgasrückführung	266
8.4.5	Regelung am Aufladeaggregat	268
8.4.6	Fahrerregler	270
8.5	Darstellung des Motors als Kennfeld	271
8.5.1	Vorgehensweise und Randbedingungen	271
8.5.2	Rekonstruktion des Drehmomentenverlaufs	273
8.6	Stationäre Simulationsergebnisse (Parametervariationen)	277
8.6.1	Lastvariation beim gedrosselten Ottomotor	277
8.6.2	Einfluss von Zündung und Brenndauer	278
8.6.3	Variation von Verdichtungsverhältnis, Last und Spitzendruck am Großdieselmotor	280
8.6.4	Untersuchungen zu vollvariablen Ventiltrieben	281
8.6.5	Variation der Saugrohrlänge und der Ventilsteuerzeiten (Ottomotor, Volllast)	283
8.6.6	Abgasrückführung bei einem abgasturboaufgeladenen Pkw-Dieselmotor	284
8.6.7	Umblasen beim Großdieselmotor	287
8.7	Transiente Simulationsergebnisse	289
8.7.1	Lastaufschaltung beim Generatormotor	289
8.7.2	Beschleunigung eines NFZ von 0 auf 80 km/h	291
8.7.3	Eingriffsmöglichkeiten am Abgasturbolader	293
8.7.4	Teillast im ECE-Zyklus	294
8.7.5	Warmlauf im ECE-Zyklus	296
8.7.6	Volllast-Beschleunigung bei turboaufgeladenen Ottomotor	297
9	Strömungsmechanische Simulation	301
9.1	Dreidimensionale Strömungsfelder	301
9.1.1	Strömungsmechanische Grundgleichungen	301
9.1.2	Turbulenz und Turbulenzmodelle	307
9.1.3	Numerik	318
9.1.4	Rechenetze	325
9.1.5	Beispiele	326
9.2	Simulation von Einspritzprozessen	331
9.2.1	Einzeltröpfchenprozesse	332
9.2.2	Strahlstatistik	336
9.2.3	Probleme des Standard-Strahlmodells	349
9.2.4	Lösungsansätze	353
9.3	Simulation der Verbrennung	361
9.3.1	Allgemeines Vorgehen	361
9.3.2	Diesel-Verbrennung	364

9.3.3	Homogener Benzin-Motor (Vormischverbrennung)	373
9.3.4	Benzinmotor mit Ladungsschichtung (Teilweise vorgemischte Flammen)	389
Literatur		392
Stichwortverzeichnis		401