

Günter P. Merker | Christian Schwarz  
Rüdiger Teichmann (Hrsg.)

# Grundlagen Verbrennungsmotoren

Funktionsweise, Simulation, Messtechnik

5., vollständig überarbeitete, aktualisierte  
und erweiterte Auflage

Mit 575 Abbildungen und 43 Tabellen

PRAXIS | ATZ/MTZ-Fachbuch



# Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 5. Auflage.....	V
Geleitwort.....	VI
Die Herausgeber.....	VII
Autorenverzeichnis.....	IX
Firmen- und Hochschulverzeichnis.....	XI
Kapitel, Beiträge und Mitarbeiter.....	XIII
Abkürzungs- und Formelverzeichnis.....	XXIII
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Vorbemerkungen.....	1
1.2 Modellbildung und Simulation.....	2
1.3 Verbrennungsdiagnostik.....	5
1.4 Möglichkeiten und Grenzen.....	5
Literatur.....	7
<b>Teil A: Hubkolbenmotor.....</b>	<b>9</b>
<b>2 Motorische Verbrennung.....</b>	<b>11</b>
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.....	132
2.5.1	Allgemeine Grundlagen.....	132
2.5.2	Zwei-Takt Langsamläufer.....	137
2.5.3	Vier-Takt Mittelschnellläufer.....	141
2.5.4	Vier-Takt Schnellläufer.....	146
	Literatur.....	149
<b>3</b>	<b>Thermodynamik des Verbrennungsmotors</b> .....	<b>153</b>
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
<b>4</b>	<b>Aufladung von Verbrennungsmotoren</b> .....	<b>179</b>
4.1	Aufladeverfahren.....	179
4.1.1	Druckwellenaufladung.....	179
4.1.2	Mechanische Aufladung.....	183
4.1.3	Einstufige Abgasturboaufladung.....	188
4.1.4	Ladedruckregelung.....	193
4.1.5	Zweistufige Abgasturboaufladung.....	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	Abgasturbolader.....	228
4.2.5	Ladeluftkühlung.....	231
	Literatur.....	236
<b>Teil B: Verbrennung, Schadstoffbildung, Emissionsmesstechnik</b> .....		<b>237</b>
<b>5</b>	<b>Reaktionskinetik</b> .....	<b>239</b>
<i>I</i> 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
<b>6</b>	<b>Schadstoffbildung.....</b>	<b>259</b>
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 <sub>2</sub> O-Mechanismus erzeugtes NO.....	283
6.5.4	Brennstoff-Stickstoff.....	284
6.5.5	Reaktionen zu NO <sub>2</sub> .....	284
	Literatur.....	284
<b>7</b>	<b>Emissionsmesstechnik.....</b>	<b>287</b>
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
<b>8</b>	<b>Verbrennungsdiagnostik.....</b>	<b>309</b>
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
<b>Teil C: 0D- und ID-Simulation des Gesamtprozesses .....</b>		<b>379</b>
<b>9</b>	<b>Reale Arbeitsprozessrechnung .....</b>	<b>381</b>
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

<b>10</b>	<b>Phänomenologische Verbrennungsmodelle</b>	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
<b>11</b>	<b>Abgasnachbehandlungssysteme</b>	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
<b>12</b>	<b>Gesamtprozessanalyse</b>	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
<b>13</b>	<b>Beherrschung komplexer Entwicklungsprozesse</b>	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	Variantenauslegung 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
<b>TeilD:</b>	<b>3D-Simulation des Arbeitsprozesses.....</b>	<b>551</b>
<b>14</b>	<b>Dreidimensionale Strömungsfelder.....</b>	<b>553</b>
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	Rechnetze.....	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
<b>15</b>	<b>3D-Simulation der Aufladung.....</b>	<b>591</b>
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

<b>16</b>	<b>Simulation von Einspritzprozessen</b>	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
<b>17</b>	<b>Simulation der Verbrennung</b>	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	NO <sub>x</sub> -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
<b>TeilE: Systembetrachtungen und Ausblick.....</b>		<b>695</b>
<b>18</b>	<b>Der Verbrennungsmotor als Teil des gesamten Antriebsstrangs.....</b>	<b>697</b>
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	Antriebsstrangkfigurationen - 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
<b>19</b>	<b>Zukunft des Verbrennungsmotors.....</b>	<b>735</b>
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
<b>Sachwortverzeichnis.....</b>		<b>779</b>