
Inhaltsverzeichnis

Kapitel, Beiträge und Mitarbeiter	XXXI
Firmen- und Hochschulverzeichnis	XXXV
Autorenverzeichnis	XXXVII
1 Einleitung	1
Günter P. Merker	
1.1 Vorbemerkungen	1
1.2 Modellbildung und Simulation	3
1.3 Verbrennungsdiagnostik	6
1.4 Möglichkeiten und Grenzen von Simulationsverfahren	6
Literatur	8
Teil I: Der Hubkolbenmotor	
2 Thermodynamische und chemische Grundlagen	11
Günter P. Merker, Gerhard Haußmann, Peter Eckert, Sebastian Rakowski, Helmut Eichlseder und Helmut Tschöke	
2.1 Energiewandlung	11
2.2 Kinematik des Kurbeltriebs	12
2.3 Kreisprozesse	17
2.3.1 Grundlagen	17
2.3.2 Geschlossene Kreisprozesse	22
2.3.3 Offene Vergleichsprozesse	29
2.4 Vom Ideal- zum Realprozess	31
2.4.1 Verlustteilung	31
2.4.2 Kenngrößen und Kennwerte	32
2.4.3 Motorprozesse	35
2.5 Festlegung der Hauptabmessungen	38
2.5.1 Auslegungskriterien	38

XIX

2.5.2	Pkw-Motoren	43
2.5.3	Formel 1-Rennmotoren	46
2.5.4	Nutzfahrzeugmotoren (Nfz-Motoren)	48
2.5.5	Schnelllaufende Hochleistungsdieselmotoren für Schiffsantriebe	51
2.5.6	Zusammenfassung	57
2.6	Konventionelle Brennstoffe	58
2.6.1	Kohlenwasserstoffe	58
2.6.2	Benzin und Ottobrennstoffe	63
2.6.3	Dieselmotoren	64
2.6.4	Brennstoffe für Marineanwendungen	65
2.7	Zukünftige Brennstoffe	66
2.7.1	Ottobrennstoffe	68
2.7.2	Dieselmotoren	76
	Literatur	86
3	Funktionsweise von Verbrennungsmotoren	89
	Günter P. Merker und Rüdiger Teichmann	
3.1	PKW-Ottomotoren	89
3.1.1	Gemischbildung	89
3.1.2	Zündung und Verbrennungsablauf	97
3.1.3	Irreguläre Verbrennungsphänomene	101
3.1.4	Rohemissionen und innermotorische Schadstoffreduktion	107
3.1.5	Potenziale des Ottomotors	119
3.2	Groß-Gasmotoren	122
3.2.1	Einteilung von Gasmotoren	124
3.2.2	Gasförmige Kraftstoffe	125
3.2.3	Brennverfahren und Regelung	130
3.2.4	Emissionen und Abgasgesetzgebung	141
3.2.5	Vergleich Groß-Gasmotor mit Groß-Dieselmotor	146
3.2.6	Anwendungen	148
3.2.7	Entwicklungsmethodik	150
3.3	Grundlagen der dieselmotorischen Verbrennung	151
3.3.1	Gemischbildung	152
3.3.2	Selbstzündung und Verbrennungsablauf	155
3.3.3	Rohemissionen des Dieselmotors	160
3.3.4	Potenzial des Dieselmotors	175
3.4	Pkw-Dieselmotoren	176
3.4.1	Gesetzgebung und technologische Meilensteine	176
3.4.2	Wege zum Erreichen der Emissions-, Verbrauchs- und Leistungsziele	180

3.5	Downsizing bei Pkw-Motoren	196
3.5.1	Downsizing, Downspeeding und Rightsizing	197
3.5.2	Schlüsseltechnologien beim Ottomotor	205
3.5.3	Schlüsseltechnologien beim Dieselmotor	210
3.6	Hybridantriebe und Range Extender	216
3.6.1	Elektrifizierung des Antriebs	216
3.6.2	Hybridantriebe	219
3.6.3	Range Extender	226
3.6.4	Auswirkungen auf den Verbrennungsmotor	235
3.7	Nfz-Dieselmotoren	239
3.7.1	Anforderungen an Nfz-Dieselmotoren und deren Einteilung	239
3.7.2	Entwicklung der Nfz-Dieselmotoren seit 1970	240
3.7.3	Brennverfahren von Nfz-Dieselmotoren	247
3.7.4	Kaltstartfähigkeit und Warmlaufverhalten	256
3.7.5	Besonderheiten der Aufladung	259
3.7.6	Mechanik des Nfz-Dieselmotors	264
3.7.7	Motorbremssysteme	266
3.7.8	Motorregelung	270
3.7.9	Non-Road Mobile Machinery-Motoren	271
3.7.10	Künftige Nfz-Antriebe	273
3.8	Großdieselmotoren	274
3.8.1	Einführung	274
3.8.2	Schnelllaufende Viertakt Dieselmotoren	284
3.8.3	Vier-Takt Mittelschnellläufer	291
3.8.4	Zwei-Takt Langsamläufer	309
	Autoren dieses Kapitels	322
	Literatur	323
4	Einspritzsysteme	331
	Roger Busch, Jürgen Hammer, Ralph-Michael Schmidt, Hartmut Schneider, Peter Eckert und Sebastian Rakowski	
4.1	Benzineinspritzung	331
4.1.1	Saugrohreinspritzung	332
4.1.2	Direkteinspritzung	343
4.2	Dieseinspritzung	354
4.2.1	Grundfunktionen	354
4.2.2	Bauarten	355
4.2.3	Common Rail System	358
4.2.4	Hochdruckpumpen	362
4.2.5	Rail und Anbaukomponenten	366
4.2.6	CR-Injektoren	370
4.2.7	Zumessfunktionen	379

4.3	Einspritzung für Großdieselmotoren	381
4.3.1	Geschichtlicher Rückblick	381
4.3.2	Pumpe-Leitung-Düse-Einspritzsysteme	384
4.3.3	Pumpe-Düse-Einspritzsysteme	387
4.3.4	Speicher-Einspritzsysteme	389
4.3.5	Derivate	396
4.4	Hydraulische Simulation	400
4.4.1	Modellierung der Grundkomponenten	400
4.4.2	Anwendungsbeispiel	404
	Literatur	405
5	Aufladesysteme	407
	Roland Baar	
5.1	Aufladeverfahren	408
5.1.1	Natürliche Aufladung	409
5.1.2	Druckwellenaufladung	410
5.1.3	Kompressoraufladung	410
5.1.4	Abgasturboaufladung	412
5.2	Aufbau und Funktion von Turboladern	413
5.3	Regelung	423
5.3.1	Kompressor	424
5.3.2	Turbolader mit Bypassregelung (Wastegate)	424
5.3.3	Turbolader mit Regelung über einen verstellbaren Düsenring (VTG)	425
5.4	Anpassung von Turboladern an Verbrennungsmotoren	426
5.4.1	Erweiterte Turboladermodellierung	433
5.5	Aufladesysteme	436
5.5.1	Zweistufig geregelte Aufladung aus zwei Abgasturboladern	436
5.5.2	Zweistufig geregelte Aufladung aus Abgasturbolader und Kompressor	437
5.5.3	Registeraufladung	438
5.5.4	Elektrisch unterstützte Aufladung	439
5.6	Sonstiges	439
5.6.1	Ladefluftkühlung	439
5.6.2	Abgasrückführung	439
5.6.3	Stau- und Stoßaufladung	440
5.6.4	Kennfeldstabilisierende Maßnahmen am Verdichter	442
5.6.5	Schubumluft	443
	Literatur	443

Teil II: Verbrennungstechnik, Schadstoffbildung und -reduktion, Emissionsmesstechnik

6	Reaktionskinetik	447
	Gunnar Stiesch und Peter Eckert	
6.1	Grundlagen	447
6.1.1	Chemisches Gleichgewicht	447
6.1.2	Reaktionsgeschwindigkeit	451
6.1.3	Partielles Gleichgewicht und Quasi-Stationarität	452
6.2	Reaktionskinetik von Kohlenwasserstoffen	454
6.2.1	Oxidation von Kohlenwasserstoffen	454
6.2.2	Zündvorgänge	457
6.2.3	Reaktionskinetik in der motorischen Simulation	463
	Literatur	469
7	Schadstoffbildung und -reduktion	471
	Peter Eckert und Sebastian Rakowski	
7.1	Abgaszusammensetzung	471
7.2	Innermotorische Schadstoffbildung und -reduktion	472
7.2.1	Kohlenmonoxid (CO)	477
7.2.2	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC)	478
7.2.3	Partikelemission beim Dieselmotor	486
7.2.4	Stickoxide	495
7.3	Nachmotorische Schadstoffreduktion	501
7.3.1	Oxidationskatalysatoren	502
7.3.2	Dreibegekatalsatoren	503
7.3.3	Selektive katalytische Reduktion (SCR)	506
7.3.4	NO _x -Speicher-Katalysatoren	511
7.3.5	Partikelfilter	512
	Literatur	518
8	Emissionsmesstechnik	525
	Alexander Bergmann, Kurt Engeljehring und Rüdiger Teichmann	
8.1	Einführung	525
8.2	Messgasaufbereitung	526
8.2.1	Messgasaufbereitung für Abgas-Messanlagen (AMA)	526
8.2.2	Messgasaufbereitung durch Verdünnung	530
8.3	Messung gasförmiger Bestandteile	532
8.3.1	NDIR – Nichtdispersiver Infrarot Detektor	533
8.3.2	FID – Flame Ionisation Detektor	534
8.3.3	CLD – Chemolumineszenz Detektor	534
8.3.4	PMD – Paramagnetischer Detektor	536

8.3.5	FTIR – Fourier Transform Infrarot Spektroskopie	536
8.3.6	LDS – Laser Dioden Spektroskopie	538
8.4	Messung fester Bestandteile	538
8.4.1	Messung der Partikel entsprechend gesetzlicher Vorgaben	538
8.4.2	Bestimmung von Partikeleigenschaften im Abgas mit alternativen Verfahren	541
	Literatur	547
9	Verbrennungsdiagnostik	549
	Rüdiger Teichmann, Andreas Wimmer und Ernst Winklhofer	
9.1	Druckindizierung	550
9.1.1	Allgemeines	550
9.1.2	Die Indiziermesskette	553
9.1.3	Einflüsse auf die Messgenauigkeit	571
9.1.4	Kennwerte infolge von äußeren Einflüssen auf den Sensor	580
9.1.5	Varianten für die Sensoradaptierung	585
9.1.6	Elektrische Drift am Ladungsverstärker	591
9.1.7	Druckindizierung im Ein- und Auslasssystem	592
9.2	Druckverlaufsanalyse	595
9.2.1	Bestimmung des Brennverlaufes	595
9.2.2	Verlustteilung	599
9.2.3	Vergleich unterschiedlicher Brennverfahren	602
9.3	Optische Messverfahren	604
9.3.1	Einleitung	604
9.3.2	Anwendungsgebiete optischer Methoden im tabellarischen Überblick	605
9.3.3	Anwendungsbeispiele optischer Methoden	606
9.3.4	Dieselmotoren	607
9.3.5	Ottomotoren	612
9.3.6	Lasermesstechniken	625
9.4	Ausblick Verbrennungsdiagnostik	626
	Literatur	627

Teil III: 0D-, 1D- und phänomenologische Modelle

10	Grundlagen der Motorprozessrechnung	633
	Franz Chmela, Gerhard Pirker und Andreas Wimmer	
10.1	Null- und quasidimensionale Modellierung	634
10.1.1	Grundgleichungen	634
10.1.2	Stoffwerte	637
10.1.3	Ein- und Mehrzonenmodelle	639

10.1.4	Chemisches Gleichgewicht	645
10.1.5	Ladungswechsel	648
10.1.6	Wärmeübergang	649
10.1.7	Plausibilisierung von Analyseergebnissen	661
10.1.8	Simulation durch Vorgabe des Brennverlaufs	668
10.1.9	Mittelwertmodelle	673
10.2	Modellierung des Ladungswechsels	675
10.2.1	Füll- und Entleermethode	676
10.2.2	Gasdynamische Betrachtung	677
10.3	Koppelung von Berechnungsmodellen	683
10.3.1	Koppelung eindimensionale Ladungswechselrechnung und Motorprozessrechnung	684
10.3.2	Koppelung eindimensionale Ladungswechselrechnung und 3D-CFD Berechnung	686
10.3.3	Koppelung eindimensionale Ladungswechselrechnung mit DoE-Methode am Beispiel eines Gasmotors	687
10.4	Transiente Simulation	688
10.5	Hydrauliksimulation	690
10.5.1	Aufbau eines Simulationsprogramms für hydraulische Systeme	690
10.5.2	Kavitation	694
10.6	Gesamtfahrzeugsimulation	696
10.6.1	Thermisches Motormodell	698
10.6.2	Wärmeeintragsmodell	699
10.6.3	Reibungsmodell	701
10.6.4	Prognosegenauigkeit	703
	Literatur	704
11	Phänomenologische Verbrennungsmodelle	709
	Gunnar Stiesch, Friedrich Dinkelacker, Peter Eckert, Sebastian Rakowski, Franz Chmela, Gerhard Pirker und Andreas Wimmer	
11.1	Dieselmotorische Verbrennung	711
11.1.1	Nulldimensionale Brennverlaufsfunction	711
11.1.2	Stationärer Gasstrahl	713
11.1.3	Paket-Modelle	717
11.1.4	Zeitskalen Modelle	725
11.2	Ottomotorische Verbrennung	729
11.2.1	Laminare und turbulente Flammengeschwindigkeit	730
11.2.2	Wärmefreisetzung	732
11.2.3	Zündung	735
11.2.4	Klopfen	735

11.3	Groß-Gasmotoren	737
11.3.1	Zündverzug	738
11.3.2	Brennrate beim Otto-Gasmotor mit offenem Brennraum	739
11.3.3	Brennrate beim Otto-Gasmotor mit Vorkammer	740
11.3.4	Klopfen	743
11.3.5	NO _x -Emissionen und Wärmeübergang	745
	Literatur	746
12	Abgasnachbehandlungssysteme	749
	Reinhard Tatschl und Johann Wurzenberger	
12.1	Methoden der Abgasnachbehandlung	749
12.2	Modellbildung und Simulation	751
12.3	Abgaskatalysatoren	752
12.3.1	Grundgleichungen	752
12.3.2	Katalysator Typen	756
12.4	Dieselpartikelfilter	762
12.4.1	Grundgleichungen	762
12.4.2	Beladung und Druckverlust	766
12.4.3	Regeneration und Temperaturverteilung	767
12.5	Dosiereinheiten	769
12.6	Gesamtsystem	770
12.7	Nomenklatur	771
	Literatur	773
13	Beherrschung komplexer Entwicklungsprozesse	775
	Christian Beidl und Hans-Michael Koegeler	
13.1	Notwendigkeit von Optimierungsstrategien	776
13.2	Modellstrukturierung	778
13.3	Modellansätze für die Optimierung	785
13.4	Anwendungsbeispiele für Optimierungsaufgaben	787
13.4.1	Emissionsoptimierung Diesel Pkw	787
13.4.2	Volllastoptimierung Ottomotor	794
13.4.3	Variantenauslegung von Arbeitsmaschinen	798
13.4.4	Optimierung des Energiemanagements von Hybridfahrzeugen in kritischen Zyklusabschnitten	802
13.5	Funktionsbedatung	806
13.6	Kaskadierte modellbasierte Optimierung und Funktionsbedatung	811
13.6.1	Beherrschung mehrschichtiger Optimierungsprobleme in Realfahrzenarien	812
13.6.2	Antriebsstrang Konzept mit MiL	814
13.7	Zusammenfassung	820
	Literatur	821

Teil IV: 3D-Simulation des Arbeitsprozesses

14	Dreidimensionale Strömungsfelder	825
	Christian Krüger und Frank Otto	
14.1	Strömungsmechanische Grundgleichungen	828
14.1.1	Massen- und Impulstransport	828
14.1.2	Transport von innerer Energie und Spezies	831
14.1.3	Passive Skalare und Mischungsbruch	832
14.1.4	Konservative Formulierung der Transportgleichungen	833
14.2	Turbulenz und Turbulenzmodelle	834
14.2.1	Phänomenologie der Turbulenz	834
14.2.2	Modellierung der Turbulenz	836
14.2.3	Turbulentes Wandgesetz	838
14.2.4	Modellierung des turbulenten Mischungszustandes	841
14.2.5	Die Gültigkeit von Turbulenzmodellen; Alternativansätze	844
14.3	Numerik	849
14.3.1	Finites-Volumen-Verfahren	849
14.3.2	Diskretisierung des Diffusionsterms – Zentrale Differenzen	850
14.3.3	Diskretisierung des Konvektionsterms – Aufwindschema	851
14.3.4	Diskretisierung der Zeitableitung – Implizites Schema	853
14.3.5	Diskretisierung des Quellterms	854
14.3.6	Operator-Split-Verfahren	855
14.3.7	Diskretisierung und numerische Lösung der Impuls-Gleichung	856
14.4	Rechnernetze	856
14.5	Beispiele	858
14.5.1	Simulation von Strömungsstrukturen im Zylinder: Ottomotor	859
14.5.2	Simulation von Strömungsstrukturen im Zylinder: Dieselmotor	860
14.5.3	Düseninnenströmung	862
	Literatur	866
15	Simulation von Einspritzprozessen	867
	Christian Krüger und Frank Otto	
15.1	Einzeltröpfchenprozesse	867
15.1.1	Impulsaustausch	868
15.1.2	Massen- und Wärmeaustausch (Einkomponentenmodell)	869
15.1.3	Massen- und Wärmeaustausch (Mehrkomponentenmodellierung)	872
15.1.4	Flashboiling	876
15.2	Strahlstatistik	877

15.2.1	Boltzmann-Williams-Gleichung	878
15.2.2	Numerische Lösung der Boltzmann-Williams-Gleichung: Das Standardmodell (Lagrange-Formulierung)	880
15.2.3	Exkurs: Numerische Bestimmung von Zufallszahlen	882
15.2.4	Partikel-Startbedingungen am Düsenaustritt	884
15.2.5	Modellierung von Zerfallsprozessen	885
15.2.6	Modellierung von Stoßprozessen	890
15.2.7	Modellierung der turbulenten Dispersion im Standard-Modell	891
15.2.8	Beschreibung der turbulenten Dispersion mittels Fokker-Planck-Gleichung	892
15.2.9	Die Diffusionsdarstellung der Fokker-Planck-Gleichung	898
15.2.10	Probleme des Standard-Strahlmodells	901
15.2.11	Benzindirekteinspritzung für Schichtladung mit nach außen öffnendem Piezo-Injektor	905
15.3	Euler-Strahlmodelle	908
15.3.1	Lokal homogene Strömung	910
15.3.2	Einbettungen von 1D-Euler-Verfahren und anderen Ansätzen	913
15.3.3	D-Euler-Verfahren	916
	Literatur	919
16	Simulation der Verbrennung	921
	Christian Krüger und Frank Otto	
16.1	Verbrennungsregimes	921
16.2	Allgemeines Vorgehen	923
16.3	Diesel-Verbrennung	926
16.3.1	Simulation der Wärmefreisetzung	926
16.3.2	Zündung	933
16.3.3	NO _x -Bildung	934
16.3.4	Rußbildung	935
16.3.5	HC- und CO-Emissionen	937
16.4	Homogener Benzinmotor (Vormischverbrennung)	937
16.4.1	Zweiphasenproblematik	938
16.4.2	Magnussen-Modell	941
16.4.3	Flammenflächenmodelle (auch Coherent Flame Models)	945
16.4.4	G-Gleichung	949
16.4.5	Diffusive G-Gleichung	952
16.4.6	Zündung	953
16.4.7	Klopfen	954
16.4.8	Schadstoffbildung	954

16.5	Benzinmotor mit Ladungsschichtung (teilweise vorgemischte Flammen)	955
16.6	Strömungsmechanische Simulation von Ladungswechsel, Gemischbildung und Verbrennung: Ausblick	960
16.6.1	Netzbewegung	961
16.6.2	Numerik	962
16.6.3	Turbulenz	962
16.6.4	Modellierung der Einspritzprozesse	963
16.6.5	Modellierung der Verbrennung	966
	Literatur	967
17	Simulation der Aufladung	969
	Roland Baar	
17.1	Allgemeines	969
17.2	Interaktion von Laufrad und Gehäuse	971
17.3	Grundlagen der Gittergenerierung für Turbomaschinen	973
17.4	Netzaufbau, Netzqualität und Randbedingungen	975
17.5	Auswertung	978
17.6	Anwendungsbeispiel	981
	Literatur	983

Teil V: Systembetrachtungen und Ausblick

18	Der Verbrennungsmotor als Teil des gesamten Antriebstrangs	987
	Günter Fraidl, Paul Kapus, Reinhard Tatschl und Johann Wurzenberger	
18.1	Zukünftige Entwicklungsziele der Verbrennungsmotoren	987
18.1.1	Einführung	987
18.1.2	Konfiguration des optimalen Antriebssystems	990
18.1.3	Technologieelemente künftiger Antriebsstrang-Konfigurationen	991
18.1.4	Vorauslegung	994
18.1.5	Entwicklungsphase	1000
18.1.6	Antriebsstrangkonfigurationen – Beispiele	1003
18.2	Ansätze zur simulationsgestützten Motorauslegung	1009
18.2.1	Simulation im Motorentwicklungsprozess	1010
18.2.2	Skalierbare Motor- und Gesamtsystemmodellierung	1013
18.2.3	Ausgewählte Anwendungen	1020
18.2.4	Ausblick	1026
	Literatur	1027

19	Zukunft des Verbrennungsmotors	1031
	Ulrich Spicher und Helmut Eichlseder	
19.1	Einleitung	1031
19.2	Die Rolle der Verbrennungsmotoren für die Mobilität der Zukunft .	1032
19.2.1	Gesetzgebung und Emissionsvorschriften	1034
19.2.2	Objektive Beurteilung von Antriebskonzepten	1035
19.2.3	CO ₂ -Effizienz bei Lebenszyklusbetrachtungen	1042
19.3	Verbrennungsmotoren – Gestern, Heute, Morgen	1044
19.3.1	Alternative Konzepte	1044
19.3.2	Entwicklungspotenzial des Verbrennungsmotors	1054
19.4	Zusammenfassung/Ausblick	1077
	Literatur	1079
A1	3D-CFD Simulation mit dem kommerziellen Code AVL FIRE*	1085
	Reinhard Tatschl	
	Sachverzeichnis	1119