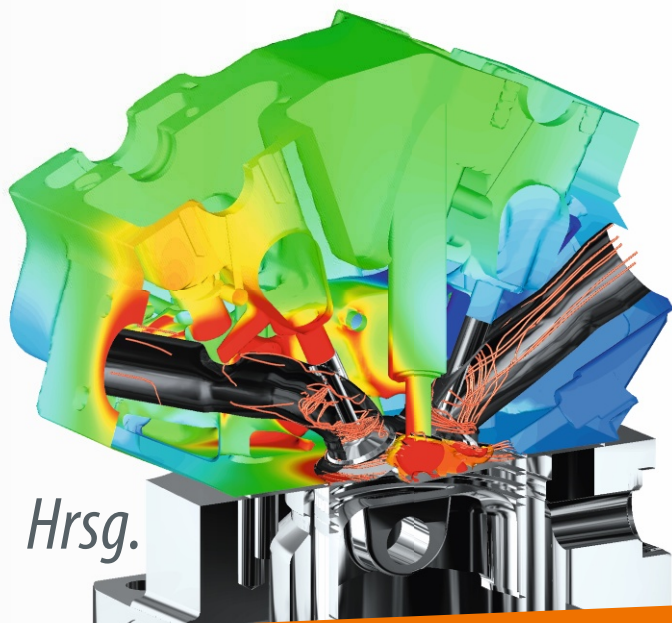


ATZ/MTZ-Fachbuch



Günter P. Merker
Rüdiger Teichmann *Hrsg.*

Grundlagen Verbrennungs- motoren

Funktionsweise · Simulation · Messtechnik

7. Auflage



 Springer Vieweg

ATZ/MTZ-Fachbuch

Die komplexe Technik heutiger Kraftfahrzeuge und Motoren macht einen immer größer werdenden Fundus an Informationen notwendig, um die Funktion und die Arbeitsweise von Komponenten oder Systemen zu verstehen. Den raschen und sicheren Zugriff auf diese Informationen bietet die regelmäßig aktualisierte Reihe ATZ/MTZ-Fachbuch, welche die zum Verständnis erforderlichen Grundlagen, Daten und Erklärungen anschaulich, systematisch und anwendungsorientiert zusammenstellt.

Die Reihe wendet sich an Fahrzeug- und Motoreningenieure sowie Studierende, die Nachschlagebedarf haben und im Zusammenhang Fragestellungen ihres Arbeitsfeldes verstehen müssen und an Professoren und Dozenten an Universitäten und Hochschulen mit Schwerpunkt Kraftfahrzeug- und Motorentechnik. Sie liefert gleichzeitig das theoretische Rüstzeug für das Verständnis wie auch die Anwendungen, wie sie für Gutachter, Forscher und Entwicklungsingenieure in der Automobil- und Zulieferindustrie sowie bei Dienstleistern benötigt werden.

Günter P. Merker · Rüdiger Teichmann
Herausgeber

Grundlagen Verbrennungsmotoren

Funktionsweise, Simulation, Messtechnik

7., vollständig überarbeitete Auflage

 Springer Vieweg

Herausgeber

Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. habil. Günter P. Merker
Tettngang, Deutschland

Dr.-Ing. Rüdiger Teichmann
AVL List GmbH
Graz, Österreich

ISBN 978-3-658-03194-7

ISBN 978-3-658-03195-4 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-658-03195-4

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

Bis zur 3. Auflage erschien dieses Werk unter dem Titel „Verbrennungsmotoren“ von Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Merker, apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schwarz, apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Gunnar Stiesch sowie Dr. rer. nat. Frank Otto.

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2001, 2004, 2006, 2009, 2011, 2012, 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media

www.springer-vieweg.de

Vorwort zur 7. Auflage

Heute werden in der Motoren- und Fahrzeugentwicklung kommerziell zur Verfügung stehende Rechenprogramme als Standard zur Simulation des stationären und transienten Verhaltens von Fahrzeugen, des kompletten Antriebstranges aber auch der hochgradig instationären Prozessabläufe im Brennraum eines Motors eingesetzt. In der Regel steht aber für diese Rechenprogramme der Quellcode nicht zur Verfügung und in der Dokumentation fehlen oft Querverweise zu Grundlagen. Deshalb wünschen sich die Anwender oft Informationen über die physikalischen und chemischen Modelle, die in diesen Programmen verwendet werden. Aus diesem Grund ist es uns ein besonderes Anliegen, unterschiedliche physikalische und chemische Ansätze deutlich zu machen und Möglichkeiten und Grenzen der verwendeten Modelle aufzuzeigen.

Das Buch beschränkt sich aufgrund der Fülle an Informationen auf die Vorgänge in Verbrennungsmotoren und innerhalb dieses Themenkomplexes eindeutig auf die thermodynamischen, strömungsmechanischen und chemischen Grundlagen der Modellierung motorischer Prozessabläufe.

Für die vorliegende siebente Auflage wurde der Inhalt entsprechend dem Untertitel *Funktionsweise, Simulation, Messtechnik* in seinen fünf Hauptteilen beibehalten, wobei aber alle Kapitel aktualisiert und wenn notwendig erweitert, sowie neue Kapitel aufgenommen wurden.

Teil I beschreibt die thermodynamischen Grundlagen, die Funktionsweise von Verbrennungsmotoren, Einspritz- und Aufladesysteme sowie die Rolle von hybriden Antrieben, dafür wurde ein Abschnitt über zukünftige Brennstoffe (Kap. 2) aufgenommen. Kapitel 3 wurde vollständig überarbeitet und durch die Aufnahme von Kapiteln über Nfz-Motoren, Downsizing sowie Hybridantriebe und Range Extender erheblich erweitert. Völlig neu ist das Kap. 4 über Einspritzsysteme. Neu verfasst wurde auch das 5. Kapitel über Aufladesysteme.

Teil II ist den physikalischen und chemischen Grundlagen sowie der Messung und Analyse der Verbrennung, der Schadstoffbildung und der Verbrennungsdiagnostik gewidmet. Kapitel 7 wurde um das Thema Schadstoffreduktion erweitert.

Teil III beschreibt die 0D- und 1D-Simulation des Gesamtprozesses als auch verschiedener Teilprozesse sowie die effektive Vorgehensweise bei der Durchführung von

Berechnungs- oder Messaufgaben. Dafür wurde das Kap. 10 über Motorprozessrechnung neu geschrieben.

Teil IV behandelt die 3D-Simulation verbrennungsmotorischer Prozesse mit dem neu verfassten Kap. 17 über die Simulation der Aufladung.

Teil V schließt den Bogen mit Systembetrachtungen und Aussagen zur Zukunft des Verbrennungsmotors.

Im *Anhang* befindet sich ein Kapitel über die 3D-Simulation mit dem kommerziell verfügbaren FIRE-Code.

Wir hoffen, dass uns mit diesem Werk eine verständliche und aktuelle Darstellung der Simulation motorischer Prozesse gelungen ist und wir würden uns sehr freuen, wenn dieses Buch für alle Anwender in Wissenschaft und Technik von möglichst großem Nutzen ist.

Wir danken allen Autoren für ihre konstruktive und engagierte Mitarbeit. Alle Autoren und ihre Firmen oder Institutionen sowie ihre Beiträge sind im Vorspann aufgeführt. Unser besonderer Dank gilt der AVL LIST GmbH für die fachliche und materielle Unterstützung bei Erstellung dieses Buches. Aufbau und Inhalt des Buches haben wir mit vielen Kollegen diskutiert, unser besonderer Dank gilt dabei Herrn Dipl.-Ing. Gerhard Haußmann, Herrn Ewald Schmitt und Frau Elisabeth Lange vom Springer Vieweg Verlag danken wir für die konstruktive und angenehme Zusammenarbeit.

Tettwang/Graz, im Mai 2014

Günter P. Merker

Rüdiger Teichmann

Geleitwort

Die Bücher „Verbrennungsmotoren“ – maßgeblich verantwortet von Prof. G. P. Merker – richteten sich in der Vergangenheit hauptsächlich an Mitarbeiter von Berechnungsabteilungen und entwickelten sich dort zu anerkannten Informationsquellen. Die Trennlinie zwischen Simulation und Versuch ist aber heute fließender denn je, ja man kann fast sagen, jeder simuliert ein bisschen oder muss Ergebnisse von Berechnungen einschätzen. Gleichzeitig ist die Wissens- und Erfahrungsbasis bei jedem unterschiedlich. Von diesen unterschiedlichen Standpunkten kommend, Brücken zu schlagen, wurde das Buch kontinuierlich erweitert – es entstand „Grundlagen Verbrennungsmotoren“.

Das Buch liegt nun in einer deutlich erweiterten Auflage vor und spannt den Bogen von der Funktionsweise von Verbrennungsmotoren über die Simulation von Prozessen in Verbrennungsmotoren bis hin zur Messtechnik. Trotz der Breite der Themen werden einige Fachgebiete in einer solchen Tiefe behandelt, die für das Gesamtverständnis hilfreich sind. Aber dieses Fachbuch enthält noch mehr und das ist mir gerade heute ein persönliches Anliegen:

Neben einer Betrachtung des Gesamtsystems Antrieb, wird versucht, die Diskussion über den optimalen Motor mit technischen Argumenten zu unterlegen, um somit dem Leser entsprechend seiner Randbedingungen zielführende Entscheidungen zu ermöglichen.

Für dieses Werk konnte eine gute Kombination aus wissenschaftlichen und praktisch orientierten Autoren gewonnen werden, so dass es als Lehrbuch für Studenten, als Weiterbildung oder einfach nur zum Nachschlagen bei täglichen Fragen gut geeignet ist. Ich weiß auch, dass für die Erstellung der Beiträge viel Freizeit aufgewendet wurde und möchte mich für den Einsatz bei allen, die zum Gelingen dieses Buches beigetragen haben, bedanken.

Graz, im Juni 2013
Helmut List

Die Herausgeber

Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. habil. Günter P. Merker wurde 1942 in Augsburg geboren. Von 1964 bis 1969 studierte er an der Technischen Hochschule München Maschinenbau. Anschließend war er als wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Thermodynamik tätig, 1974 erfolgte die Promotion, 1978 habilitierte er sich. Von 1978 bis 1980 war er bei der MTU-München GmbH tätig. 1980 nahm er einen Ruf auf die C3-Professur für Kältetechnik an der Universität Karlsruhe an. 1986 trat er in die MTU-Friedrichshafen GmbH ein und leitete dort die Hauptabteilung Analytik/Motorenberechnung. 1994 folgte er dem Ruf auf die C4-Professur für Verbrennungsmotoren an die Universität Hannover und leitete bis zu seiner Emeritierung 2005 das Institut für Technische Verbrennung. In dieser Zeit hat er sich insbesondere mit der experimentellen und theoretischen Untersuchung der Verbrennung in Nutzfahrzeug-Diesel-Motoren beschäftigt. Insgesamt hat er 43 Doktoranden zur Promotion und vier zur Habilitation geführt. Er ist Autor und Mitautor von über 140 technisch-wissenschaftlichen Publikationen und sechs Fachbüchern auf den Gebieten Wärmeübertragung, Strömungsmechanik und Verbrennungsmotoren und Mitglied der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft. Heute ist er als freier Berater für die Motorenindustrie tätig.

Dr.-Ing. Rüdiger Teichmann wurde 1960 in Nordhausen geboren. Er studierte Maschinenbau mit der Spezialisierung „Kraftfahrzeugtechnik“ an der Technischen Universität Dresden von 1982 bis 1987. Danach wurde er an der gleichen Einrichtung Forschungsstudent und wissenschaftlicher Assistent bis 1990. 1991 promovierte er zu einem Thema der Verbrennungsverfahrenentwicklung an LKW-Dieselmotoren. Im gleichen Jahr begann er seine berufliche Laufbahn in der Vorentwicklung für Antriebsentwicklung der BMW AG in München. Im Rahmen seiner Spezialgebiete Thermodynamik, Verbrennungsentwicklung, Ladungswechsel und der Kalibrierung dieser Vorgänge war er in verschiedenen Themen bis zur Serienentwicklung tätig. 1999 wurde er Leiter des Produktmanagement der gesamten Indizertechnik bei der AVL List GmbH in Graz. Nach drei Jahren übernahm er die Verantwortung als Segmentleiter für Indizertechnik, welche ab 2005 die Fachgebiete für optische Messtechnik und Forschungsmotoren als Global Segment Manager Verbrennungsmesstechnik einschließt. Seit 2007 koordiniert er zusätzlich die Fahrzeugmesstechnikaktivitäten der AVL. Dr. Teichmann ist Autor und Koautor zahlreicher Publikationen und Betreuer von Diplomarbeiten.

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Abkürzungen

AG	Arbeitsgas
AGR	Abgasrückführung
AMA	Abgasmessanlage
ATL	Abgasturbolader
AV	Auslassventil
BMEP	break mean effective pressure (effektiver Mitteldruck)
BV	Brennverlauf
CAI	Controlled Auto Ignition
CCR	Combustion Chamber Recirculation
CFD	Computational Fluid Dynamics
CI	Compression Ignition
CLD	Chemolumineszenz Detektor
CNG	Compressed Natural Gas
CPC	Condensation Particle Counting
CR	Common Rail
CVS	Constant Volume Sampler
DI	Direct Injection
DME	Dimethylether
DoE	Design of Experiments
DRV	Druckregelventil
DZ	Dammköhler-Zahl
EGR	Exhaust Gas Recirculation
EPR	Exhaust Port Recirculation
EV	Einspritzverlauf/Einlassventil
EWA	Energiewandlungsanlage
FAME	Fetty Acid Methyl Ester (Fettsäuremethylester)
FID	Flame Ionisation Detektor
FNN	Fast Neural Network
FTIR	Fourier Transform Infrarot Spektroskopie

GDI	Gasoline Direct Injection
Gz	Graetz-Zahl
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition
HD	Hochdruck
HE	Hydro-Erosiv
HFO	Heavy Fuel Oil
IMEP	indizierter Mitteldruck
INN	Intelligent Neural Network
IR	Infrarot
LDA	Laser Doppler Anemometrie
LDS	Laser Dioden Spektroskopie
LET	Low End Torque
LIF	Laser Induced Fluorescence
LLK	Ladeluftkühler
LNG	Liquified Natural Gas
LPG	Liquified Petroleum Gas
LWOT	Ladungswechsel-OT
MDO	Marine Diesel Oil
MFB 50 %	Mass Fraction Burned 50 %
MOZ	Motor-Oktanzahl
MTU	Motoren- und Turbinen-Union
ND	Niederdruck
NDIR	Nichtdispersiver Infrarot Detektor
NN	Neuronales Netz
NT	Nutzturbine
Nu	Nußelt-Zahl
OT	oberer Totpunkt
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	polyzyklische Biphenyle
PCT	polyzyklische Terphenyle
PCV	Pressure Control Valve (Druckregelventil)
PD	Pumpe-Düse
PDA	Phase Doppler Anemometrie
PIV	Particle Image Velocimetry
PLD	Pumpe-Leitung-Düse
PMD	Paramagnetischer Detektor
Pr	Prandtl-Zahl
RDE	Real Driving Emissions
Re	Reynolds-Zahl
RG	Restgas
RHR	Rate of Heat Release
RME	Rapsmethylester

ROZ	Research-Oktan-Zahl
Sc	Schmidt-Zahl
SCR	Selective Catalytic Reduction
SI	Sparc Ignition
SOC	State of Charge
TC	turbocharged
UT	unterer Totpunkt
UV	Ultraviolett
VKM	Verbrennungskraftmaschine
V-Soot	Rußkennzahl
VTG	verstellbare Turbinengeometrie
VVT	Variabler Ventiltierb
ZOT	Zünd-OT
ZV	Zündverzug
ZZP	Zündzeitpunkt

Formelzeichen

a	Schallgeschwindigkeit [m/s]
A	Flammenfrontfläche [m ²]
[A]	Speziolenkonzentration [mol/mol]
b_e	spezifischer Brennstoffverbrauch [g/kWh]
B_m	Modellkonstante
c	Geschwindigkeit [m/s]
C_d	Durchflussbeiwert
c_m	mittlere Kolbengeschwindigkeit [m/s]
C, c	Konstanten
c_v	spezifische Wärme bei konstantem Volumen [J/kg]
c_p	spezifische Wärme bei konstantem Druck [J/kg]
d_{hyd}	hydraulischer Durchmesser [m]
D	Kolbendurchmesser [m]
D	Diffusionskoeffizient
E	Energie [J]
E	Elastizitätsmodul [N/m ²]
E_A	Aktivierungsenergie [J]
e	spezifische Energie [J/kg]
e	Exzentrizität [m]
f	Reibbeiwert
G	freie Enthalpie [J]
g	spezifische freie Enthalpie [J/kg]
\tilde{g}	molare freie Enthalpie [J/mol]

H	Enthalpie [J]
H_u	unterer Heizwert [J/kg]
h	spezifische Enthalpie [J/kg]
\tilde{h}	molare Enthalpie [J/kg]
\tilde{h}°	Standard-Bildungsenthalpie [J/mol]
h	Höhe [m]
I	Impuls [kg m/s]
J	Jakobimatrix
K	Gleichgewichtskonstante
K	Kavitationszahl
k	Geschwindigkeitskonstante
k	turbulente kinetische Energie [m^2/s^2]
l_L	integrales Längenmaß [m]
l_T	Taylor-Längenmaß [m]
l_K	Kolmogorovlänge [m]
l	Pleuellänge [m]
M	Moment [Nm]
m	Masse [kg]
m	Vibe-Parameter
N	Partikelanzahl
n_i	Stoffmenge [mol]
p	Druck [bar]
p_m	Mitteldruck [bar]
\dot{P}	Leistung [W]
Q	Wärmemenge [J]
\dot{Q}	Wärmestrom [W]
q	spezifische Wärmemenge [J/kg]
\dot{q}	Wärmestromdichte [W/m^2]
q^*	Parameter
R	Gaskonstante
r	Luftgehalt
r	Radius [m]
r	Reaktionsrate
s	spezifische Entropie [J/kg K]
s	Flammgeschwindigkeit [m/s]
s	Kolbenweg [m]
s	Länge [m]
T	Temperatur [K]
t	Zeit [s]
U	innere Energie [J]
u	spezifische innere Energie [J/kg]
u, v, w	Geschwindigkeitskomponenten [m/s]

V	Volumen [m^3]
v	spezifisches Volumen [m^3/kg]
W	Leistung [W]
x'	Verhältnis
x, y, z	Längenkoordination [m]
z	Zylinderzahl

Indizes

0	Ruhe- oder Referenzzustand
1	Austritt
1	ein
2	aus
a	Austritt
ab	abgeführt
ad	adiabat
AG	Arbeitsgas
Arr	Arrhenius
B	Brennstoff
b	Brennstoff
BB	Blow By
Beh	Behälter
bez	bezogene Größe
c	Carnotprozess
c	Compression
ch	chemisch
D	Drossel
dampf	Dampfdruck
diff	diffusiv
e	effektiv
e	Eintritt
g	Gasphase
geo	geometrisch
ges	gesamt
i	Spezies i
i	innere
irr	irreversible
is	isentrop
j	Spezies j
K	Kraftstoff
k, l, m, n	Summationsindex

komp	Kompression
krit	kritisch
l	laminar
l	rückwärts (links)
LL	Ladeluft
max	maximal
min	minimal
n. V.	nach Verdichter
n. T.	nach Turbine
p	isobar
R	Reaktion
r	Reibung
r	vorwärts (rechts)
s	isentrop
Sys	System
t	technisch
t	total
t	turbulent
tats	tatsächlich
th	thermisch
theo	theoretisch
T	Turbine
TL	Turbolader
uv	unverbrannt
v	verbrannt
V	Verdichter
Verbr	Verbrennung, verbrannt
vp	Seiligerprozess
v. T.	vor Turbine
v. V.	vor Verdichter
w	Wand
w^l	turbulente Schwankungsgröße
\bar{w}	molare Größe
\bar{w}	Mittelwert
zu	zugeführt
Zyl	Zylinder

Griechische Symbole

α	Wärmeübergangskoeffizient [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$]
β	Stoffübergangskoeffizient [m^3/s]

Γ	freie Oberfläche [m^2]
Δ	Differenz
δ	Differenz
Δh	Reaktionsenthalpie [J/kg]
Δp	Druckverlust [bar]
ε	Verdichtungsverhältnis
ε	Kühlziffer
ε	Fehler
Θ	Trägheitsmoment [Nm]
ζ	Reibbeiwert
ζ	Kontraktionszahl
η	dynamische Viskosität [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]
η_v	Umsetzungsgrad
κ	Isentropenkoeffizient
λ	Luftverhältnis
λ	Reibungszahl
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/mk]
λ_s	Schubstangenverhältnis
μ	chemisches Potenzial [J/mol]
ν	kinematische Viskosität [m^2/s]
ν_i	stöchiometrischer Koeffizient
ξ	Atomzahlverhältnis
ξ	Verhältnis
δ	chemisches Potenzial [J/kg]
π	Druckverhältnis
ρ	Dichte [kg/m^3]
τ	charakteristische Zeit [s]
φ	Kurbelwinkel [$^\circ\text{KW}$]
ψ	Ausflussfunktion
ω	Winkelgeschwindigkeit [rad/s]

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 Eichseder 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

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	Ladeluftkühlung	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	Dreibegekatalysatoren	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 Realfahrscenarien	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	Rechennetze	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	Einzeltröpfenprozesse	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

Kapitel, Beiträge und Mitarbeiter

- **1 Einleitung**

Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. habil. Günter P. Merker

Teil I: Der Hubkolbenmotor

- **2 Thermodynamische und chemische Grundlagen**

Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. habil. Günter P. Merker

- 2.5 Festlegung der Hauptabmessungen

Dipl.-Ing. Gerhard Haußmann

- 2.6 Konventionelle Brennstoffe

Dr.-Ing. Peter Eckert

Dr.-Ing. Sebastian Rakowski

- 2.7 Zukünftige Brennstoffe

- 2.7.1 Ottobrennstoffe

Univ.-Prof. Dr.-techn. Helmut Eichlseder

- 2.7.2 Dieselmotoren

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Helmut Tschöke

- **3 Funktionsweise des Verbrennungsmotors**

- 3.1 PKW-Ottomotoren

Dr.-Ing. habil. Wolfram Gottschalk

- 3.2 Groß-Gasmotoren

Dr.-Ing. habil. Rainer Golloch

Ao. Univ.-Prof. Dr.-techn. Andreas Wimmer

- 3.3 Grundlagen der dieselmotorischen Verbrennung

Dr.-Ing. Peter Eckert

Dr.-Ing. Sebastian Rakowski

- 3.4 PKW- Dieselmotoren

Dr.-Ing. Maximilian Brauer

Dr.-Ing. Peter Eckert

- 3.5 Downsizing von PKW-Motoren
Dr.-Ing. Christian Eiglmeier
- 3.6 Hybridantriebe und Range Extender
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Helmut Tschöke
- 3.7 Nfz- Dieselmotoren
Dr.-Ing. Heiko Lettmann
Dr.-techn. Karl Maderthaler
- 3.8 Groß-Dieselmotoren
 - 3.8.1 Einführung
Dr.-Ing. Hinrich Mohr
 - 3.8.2 Vier-Takt-Schnellläufer
Dr.-Ing. Christoph Teetz
 - 3.8.3 Viertakt-Mittelschnellläufer
apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Gunnar Stiesch
 - 3.8.4 Zwei-Takt Langsamläufer
Dr.-Ing. Stefan Mayer
 - 3.8.5 Applikationen
Dr.-Ing. Hinrich Mohr
- **4 Einspritzsysteme**
 - 4.1 Benzineinspritzung
Dr.-Ing. Roger Busch
 - 4.2 Dieseleinspritzung
Hon.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Hammer
 - 4.3 Großdieselmotoren
Dr.-Ing. Ralph-Michael Schmidt
Dipl.-Ing. Hartmut Schneider
 - 4.4 Hydraulische Einspritzmodelle
Dr.-Ing. Peter Eckert
Dr.-Ing. Sebastian Rakowski
- **5 Aufladesysteme**
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Roland Baar

Teil II: Verbrennung, Schadstoffe, Emissionsmesstechnik

- **6 Reaktionskinetik**
 - 6.1 Grundlagen
apl.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gunnar Stiesch
 - 6.2 Reaktionskinetik von Kohlenwasserstoffen
Dr.-Ing. Peter Eckert
- **7 Schadstoffbildung und -reduktion**
Dr.-Ing. Peter Eckert
Dr.-Ing. Sebastian Rakowski