

Merker, Schwarz, Stiesch, Otto

Verbrennungs- motoren

Simulation der Verbrennung
und Schadstoffbildung

3. Auflage



Teubner

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

Verbrennungsmotoren

**Simulation der Verbrennung
und Schadstoffbildung**

**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



Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Merker war bis zu seiner Pensionierung am 30.09.2005 Leiter des Instituts für Technische Verbrennung an der Universität Hannover

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schwarz ist Abteilungsleiter bei der BMW AG München, zuständig für Ladungswechsel und Verbrennung in der Ottomotoren-Serienentwicklung

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Gunnar Stiesch ist Teamleiter in der Entwicklung der MTU Friedrichshafen GmbH

Dr. rer. nat. Frank Otto arbeitet als Teamleiter im Ottomotoren-Versuch der Forschung und Vorentwicklung der DaimlerChrysler AG

1. Auflage 2001

2. Auflage 2004

3., überarbeitete und aktualisierte Auflage November 2006

Alle Rechte vorbehalten

© B. G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2006

Der B. G. Teubner Verlag ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media.
www.teubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, 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 Waren- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, www.CorporateDesignGroup.de

Druck und buchbinderische Verarbeitung: Strauss Offsetdruck, Mörlenbach

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in Germany

ISBN-10 3-8351-0080-7

ISBN-13 978-3-8351-0080-0

Vorwort

Für die zweite Auflage wurde der Inhalt der ersten Auflage vollständig überarbeitet und wesentlich erweitert. Insbesondere wurden neben den Grundlagen der Hubkolbenmaschinen die für das Verständnis und die Simulation der verbrennungstechnischen Abläufe im Motor wichtigen Kapitel Einspritzung, Gemischbildung, Verbrennungsablauf und Schadstoffbildung mit aufgenommen. Die zweite Auflage war damit gewissermaßen eine Symbiose aus den drei Büchern "G. P. Merker/U. Kessen (1999): Verbrennungsmotoren", "G. P. Merker/G. Stiesch (1999): Motorische Verbrennung" und "G. P. Merker/Ch. Schwarz (2001): Simulation verbrennungsmotorischer Prozesse".

Kapitel 2 bringt eine Einführung in die Funktionsweise von Verbrennungsmotoren. Kapitel 3 ist eine Zusammenstellung der wesentlichen reaktionskinetischen Grundlagen, Kapitel 4 beschreibt die im Brennraum ablaufenden physikalischen und chemischen Prozesse. Kapitel 5 ist den phänomenologischen Mehrzonen-Verbrennungsmodellen gewidmet; in Kapitel 6 sind die Grundlagen der Schadstoffbildung beschrieben. Kapitel 7 und 8 sind eine überarbeitete und gestraffte Darstellung der früheren Kapitel "Reale Arbeitsprozessrechnung" und "Gesamtprozessanalyse". Kapitel 9 ist eine vollständige Neufassung der entsprechenden früheren Kapitel "Dreidimensionale, instationäre Strömungsfelder" und "Verbrennungsmodelle" und wurde im Wesentlichen von Frank Otto verfasst. Es erscheint uns jedoch wichtig darauf hinzuweisen, dass sich jeder von uns für alle Kapitel verantwortlich fühlt.

Für die dritte Auflage haben wir Unklarheiten und Druckfehler behoben und den Text an einigen Stellen aktualisiert. Herrn Dr. Christian Krüger und Herrn Andreas Hermann von der Daimler Chrysler AG sowie Herrn Dr. Claus Reulein danken wir für nützliche Hinweise und das neue Bildmaterial. Wir hoffen, dass auch diese Auflage sowohl für Studenten und Doktoranden, aber auch für den in der Forschung und Entwicklung tätigen Ingenieur von Nutzen für die tägliche Arbeit sein wird.

Frau Dr. Britta Settmacher sind wir für die Erstellung des druckreifen Manuskriptes wieder zu großem Dank verpflichtet. Dem B. G. Teubner Verlag danken wir für die stets gute Zusammenarbeit.

Tettang/München/Friedrichshafen/Stuttgart,
im Oktober 2006

Günter P. Merker
Christian Schwarz
Gunnar Stiesch
Frank Otto

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

Abkürzungen

AGR	Abgasrückführung
AÖ	Auslass öffnet
ATL	Abgasturbo-Aufladung
AV	Auslassventil
BB	Brennbeginn Blow-By
BD	Brenndauer
BR	Brennraum
BV	Brennverlauf
CAI	Controlled Auto-Ignition
CFD	Computational Fluid Dynamics
DE, DI	Direkteinspritzung (direct injection)
DK	Drosselklappe
EB	Einspritzbeginn
ED	Einspritzdauer
EP	Einspritzpumpe
ES	Einlass schließt
ESV	Einspritzverlauf
EV	Einlassventil Einspritzverzug
FB	Förderbeginn
FEM	Finite Elemente Methode
FES	frühes Einlass schließt
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition
Kst	Kraftstoff
KW	Kurbelwinkel
LDA	ladedruckabhängiger Vollastanschlag
LES	Large-Eddy-Simulation
LLK	Ladeluftkühler
LWOT	Ladungswechsel-OT
MOT	Motorblock
MSL	Motorschlucklinie
MUP	Massenumsatzpunkt
NFZ	Nutzfahrzeug
N.N.	Neuronales Netz
OHC-GG	Sauerstoff-Wasserstoff-Kohlenstoff-Gleichgewicht
ÖK	Ölkühler
OT	oberer Totpunkt
ÖW	Ölwanne
PAK	Polyzyklische, aromatische Kohlenwasserstoffe
PDF	Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung (probability density function)
RG	Restgas
RK	Rückblaseklappe

SES	spätes Einlass schließt
SP	Schwerpunkt
TL	Turbolader
UT	unterer Totpunkt
VSL	Verdichterschlucklinie
VTG	variable Turbinengeometrie
ZOT	Zünd-OT (oberer Totpunkt)
ZV	Zündverzug
ZZP	Zündzeitpunkt

Formelzeichen

A	Fläche [m ²] Kinematik der Variablen α der Boltzmann-Gleichung Parameter Zacharias Temperaturdifferenz Heider [K]
A^*	Temperaturdifferenz Heider [K]
A_{id}	Zündmodellparameter
A_{prem}	Verbrennungsmodellparameter
AGR	Abgasrückführtrate [%]
a	Konstante Vibe-Brennverlauf Schallgeschwindigkeit [m / s] Temperaturleitfähigkeit [m ² / s] Gradient „schiefe Koordinaten“ Parameter Klopfkriterium Bezogener Öffnungsweg Thermostat
B	Funktion Heider
B_0, B_1	Modellkonstanten des Tropfenzerfallsmodells
BD	Brenndauer [Grad]
b	Lagerbreite [m] Parameter Klopfkriterium
b_e	spezifischer Brennstoffverbrauch [g / kWh]
C	Funktion Lax Wendroff Konstante Konstante Wärmeübergang Woschni
C_1	Konstante Woschni
C_2	Konstante Woschni [m / (s K)]
C_3	Konstante Vogel Konstante Teilchenbahn
C_4	Konstante Teilchenbahn
C_A	Kontraktionsbeiwert
C_{gl}	Konstante Heider
C_v	Geschwindigkeitsbeiwert
C_w	Widerstandsbeiwert

Cou	Courant-Zahl
c	Anteil Kohlenstoff [kg / kg Kst] Federkonstante [N / m] Fortschrittsvariable Geschwindigkeit [m / s] Konstante Länge [m] Parameter Klopfkriterium spezifische Wärme [J / (kg K)]
$c_{(i)}$	Speziesmassenbruch der Spezies Nr. i
c_i	Stoffkonzentration
c_K	Kolbengeschwindigkeit [m / s]
c_l	Konstante Reibungsansatz Lüfter
c_m	mittlere Kolbengeschwindigkeit [m / s]
c_p	spezifische Wärme bei konst. Druck [J / (kg K)]
c_u / c_m	Drallzahl
c_x	Modellkonstanten in Transportgleichung der Mischungsbruchvarianz
$c_{\varepsilon_1}, c_{\varepsilon_2}, c_{\varepsilon_3}$	Modellkonstanten in der ε -Gleichung
c_μ	Konstante des Turbulenzmodells
c_v	spezifische Wärme bei konst. Volumen [J / (kg K)]
D	Diffusionskonstante Durchmesser [m] Parameter Zacharias Zylinderdurchmesser [m]
D_R	inverse Relaxationszeitskala eines Tropfens in turbul. Strömung [s ⁻¹]
$\frac{\partial}{\partial t}$	partiell Differential
d	Wanddicke [m] Durchmesser [m] Dämpfungskonstante [kg / s]
d_l	Lüfterdurchmesser
d_m	mittlerer Turbinendurchmesser [m]
E	Energie [J] Elastizität des Motors [Nm s]
\dot{E}	Energiestrom [J / s]
E_A	Aktivierungsenergie
E_{id}	Zündenergie [K]
E_{kin}	kinetische Strahlenergie [J]
EB	Energiebilanz
ED	Einspritzdauer [Grad]
e	Exzentrizität, Schrängung [m]
F	Kraft [N] Funktion Funktion Lax Wendroff
FA	Parameter Zacharias

F_G	Gaskraft [N]
f	allgemeine Funktion Kraftdichte [N/m ³] Verteilungsfunktion
f_R	Restgasanteil
G	formale Feldvariable, deren Nullstelle die Pos. der Flammfront bestimmt freie Enthalpie [J] Funktion Lax Wendroff Gibbs-Funktion [J]
g	spezifische freie Enthalpie [J / kg]
H	Enthalpie [J] Heizwert [J / kg]
H_u	unterer Heizwert [J / kg]
h	Anteil Wasserstoff [kg / kg Kst] spezifische Enthalpie [J / kg] Hub [m]
h_1	Parameter Polygon-Hyperbel-Brennverlauf
h_2	Parameter Polygon-Hyperbel-Brennverlauf
h_3	Parameter Polygon-Hyperbel-Brennverlauf
I	Impuls [(kg m) / s] Strom [A]
I_K	Klopfäuslösender, kritischer Vorreaktionszustand
ila	Übersetzungsverhältnis Lüfter
iz	Anzahl Leitungsabschnitte
L	Drehimpuls [N m s] Längenskala [m]
K	Brennraumabhängige Konstante (Franzke)
K_d	Differentialbeiwert
K_i	Integralbeiwert
K_p	Proportionalbeiwert Gleichgewichtskonstante
K_L	Konstante Lagerreibung
KW	Klopfwahrscheinlichkeit
K_η	Konstante [m ³]
K_ρ	Faktor Spaltdicke
k	Konstante turbulente kinetische Energie [m ² / s ²] Wärmedurchgangszahl [W / (m ² K)] Zählindex
k_c	Behältersteifigkeit [N / m ⁵]
k_f	Geschwindigkeitskoeffizient für Vorwärtsreaktion
k_R	Rohrreibungskoeffizient [m / s ²]
k_r	Geschwindigkeitskoeffizient für Rückwärtsreaktion
L	Wirbellänge [m]
L_{\min}	stöchiometrisches Luft-Brennstoff-Verhältnis

l	Pleuellänge [m] Länge [m]
l_F	Dicke der turbulenten Flammenfront [m]
l_I	integrale Längenskala
l_t	turbulente Längenskala [m]
M	Masse [kg] Molmasse [kg / kmol] Moment [Nm]
Ma	Machzahl
m	Masse [kg] Vibe-Parameter
\dot{m}	Massenstrom
N	Normierungskonstante
Nu	Nußelt-Zahl
n	Anzahl Mole Drehzahl [U / min] Polytrophenexponent
n_A	Arbeitsspiele pro Umdrehung
n_i	Stoffmenge von i [mol]
Oh	Ohnesorge-Zahl
P	Leistung [W] Produktionsterm in k-Gleichung [W]
Pe	Peclet-Zahl
Pr	Prandtl-Zahl
Pr_k	turbulente Prandtl-Zahl für k -Transport
Pr_ε	turbulente Prandtl-Zahl für ε -Transport
p	Druck [N / m ²] Partialdruck [N / m ²] Wahrscheinlichkeitsdichte, Verteilungsfunktion
p_0	Schleppdruck [N / m ²]
p_{Gauss}	Verteilungsfunktion mit Form einer Gaussverteilung
p_{inj}	Einspritzdruck [N / m ²]
$p_{m,e}$	effektiver Mitteldruck [N / m ²]
p_{mr}	Reibmitteldruck [bar]
p_β	Verteilungsfunktion, die die Form einer β -Funktion hat
Q	Quellterm einer Skalartransportgleichung Wärmemenge [J]
\dot{Q}	Wärmestrom [W]
Q_B, Q_{chem}	Wärmefreisetzung [kJ / KW]
q	spezifische Wärmeenergie [J / m ³] Wärmequelle [W]
R	elektrischer Widerstand [Ohm; Ω] Gaskonstante [J / (kg K)] Tropfenradius [m]
\tilde{R}	universelle Gaskonstante