

Günter P. Merker, Christian Schwarz

Technische Verbrennung

Simulation verbrennungsmotorischer Prozesse

Günter P. Merker, Christian Schwarz

Technische Verbrennung Simulation verbrennungs- motorischer Prozesse

Von Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Günter P. Merker und
Priv.-Doz. Dr.-Ing. Christian Schwarz

Mit 122 Abbildungen



B. G. Teubner Stuttgart · Leipzig · Wiesbaden

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme
Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist bei
Der Deutschen Bibliothek erhältlich.

Prof. Dr.-Ing. habil. Günter P. Merker ist Leiter des Instituts für Technische Verbrennung an der Universität Hannover.

Priv. Doz. Dr.-Ing. Christian Schwarz ist Teamleiter in der Vorentwicklung bei der BMW AG, München.

1. Auflage April 2001

Alle Rechte vorbehalten
© B. G. Teubner GmbH, Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden, 2001

Der Verlag B. G. Teubner ist ein Unternehmen der Fachverlagsgruppe BertelsmannSpringer.

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 Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, www.CorporateDesignGroup.de

ISBN 978-3-519-06382-7 ISBN 978-3-322-99823-1 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-322-99823-1

Vorwort

Dieses Buch basiert auf der Vorlesung "Simulation motorischer Prozesse", die der erste Autor seit dem SS 1995 an der Universität Hannover hält, und auf der Dissertation und Habilitationsschrift des zweiten Autors. Der Inhalt entspricht dem Umfang einer Vorlesung mit zwei Semesterwochenstunden, geht aber in einigen Abschnitten deutlich darüber hinaus. Das zweite und dritte Kapitel hat im wesentlichen der zweite Autor, das erste, vierte und fünfte Kapitel dagegen der erste Autor verfaßt. Es erscheint uns wichtig darauf hinzuweisen, daß jeder von uns die Verantwortung für das Ganze übernimmt.

Das Buch ist neben dem Gebrauch zu einer entsprechenden Vorlesung auch als Einführung in dieses Thema für den in der Praxis tätigen Ingenieur gedacht. Die Simulation des Motorprozesses hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Die auf der "Füll- und Entleermethode" basierende Gesamtprozeßanalyse ist heute ein Standardtool in Entwicklungsabteilungen von Motoren- und Fahrzeugherstellern. Aus diesem Grund sind die Kapitel 2 und 3 bewußt relativ ausführlich gehalten und der entsprechende Stoff ist deshalb auch zum Selbststudium geeignet. Die dreidimensionale Simulation von Strömungsfeldern ohne und mit chemischen Reaktionen ist dagegen deutlich komplexer; sie wird aber zunehmend für die Berechnung der Wärmefreisetzung und der Schadstoffbildung bei der motorischen Verbrennung eingesetzt. Die Kapitel 4 und 5 sind lediglich als Einführung in diese Problematik gedacht. Der an dieser Thematik interessierte Leser wird für weiterführende Details auf die angegebene Literatur verwiesen.

Frau Brauer sind wir für die Erstellung eines Großteils der Abbildungen und Frau Settmacher für das Schreiben und die endgültige Formatierung des Textes zu großem Dank verpflichtet. Bei der Daimler Chrysler AG bedanken wir uns für die Freigabe der zur Verfügung gestellten Abbildungen. Dem Teubner-Verlag danken wir für die stets gute Zusammenarbeit.

Hannover/ München
im Dezember 2000

Günter P. Merker
Christian Schwarz

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	XI
1 Einleitung	1
1.1 Vorbemerkungen	1
1.2 Modellbildung	1
1.3 Simulation	3
2 Reale Arbeitsprozeßrechnung	5
2.1 Füll- und Entleermethode	5
2.1.1 Grundlagen	6
2.1.2 Ein-Zonen-Zylinder-Modell	8
2.1.2.1 Grundlagen	8
2.1.2.2 Mechanische Arbeit	11
2.1.2.3 Durchflußgleichung/Ausflußfunktion/Ventilhubkurven	13
2.1.2.4 Wärmeübergang im Zylinder	19
2.1.2.5 Wärmeübergang im Auslaßkrümmer	30
2.1.2.6 Wandtemperaturmodelle	31
2.1.2.7 Brennverlauf	35
2.1.2.8 Innere Energie	54
2.1.3 Zwei-Zonen-Zylinder-Modell	65
2.1.3.1 Modellierung des Hochdruckteiles nach Hohlbaum	65
2.1.3.2 Modellierung des Hochdruckteiles nach Heider	69
2.1.3.3 NO _x -Bildung	73
2.1.3.4 Modellierung des Ladungswechsels beim Zweitaktmotor	79
2.1.4 Weitere Komponenten des Gaspfades im Verbrennungsmotor	82
2.2 Gasdynamik	84
2.2.1 Grundgleichungen der eindimensionalen Gasdynamik	84
2.2.1.1 Massenbilanz	85
2.2.1.2 Impulserhaltungssatz	86
2.2.1.3 Energieerhaltungssatz	86
2.2.2 Numerische Lösungsverfahren	87
2.2.2.1 Einstufiges Lax-Wendroff-Verfahren	88
2.2.2.2 Zweistufiges Lax-Wendroff-Verfahren	89
2.2.3 Randbedingungen	91
2.3 Aufladung	95
2.3.1 Aufladeverfahren	95
2.3.2 Grundlagen	96
2.3.2.1 Verdichter	96
2.3.2.2 Turbinen	97
2.3.2.3 Abgasturbolader	100

2.3.3	Strömungsverdichter	102
2.3.3.1	Bezogene Größen	103
2.3.3.2	Kennfelddarstellung	104
2.3.3.3	Extrapolation	106
2.3.3.4	Verhalten an der Pumpgrenze	112
2.3.4	Verdrängerlader	113
2.3.5	Strömungsturbine	114
2.3.5.1	Bezogene Größen	115
2.3.5.2	Extrapolation	115
2.3.5.3	Kennfelddarstellung	118
2.3.5.4	Variable Turbinengeometrie	119
2.3.6	Ladeluftkühlung	120
2.3.6.1	Grundlagen	120
2.3.6.2	Numerische Behandlung	123
2.3.6.3	Vor- und Nachteile der Ladeluftkühlung	124
3	Gesamtprozeßanalyse	126
3.1	Allgemeines	126
3.2	Thermisches Motorverhalten	127
3.2.1	Grundlagen	127
3.2.2	Modellierung des Rohrsystems	128
3.2.3	Kühlkreislauf	130
3.2.4	Ölkreislauf	133
3.2.5	Physikalische Eigenschaften von Öl und Kühlwasser	139
3.2.5.1	Kühlmittel	139
3.2.5.2	Motoröl	140
3.1	Motorreibung	141
3.3.1	Reibungsansatz für den betriebswarmen Motor	141
3.3.2	Reibungsansatz für Warmlauf	142
3.3.2.1	Reibungsansatz für niedrige Temperaturen	143
3.3.2.2	Bestimmung des reibrelevanten Ölwärmestroms	144
3.4	Motorsteuerung/Regelung	145
3.4.1	PID-Regler	146
3.4.2	Lastregelung	146
3.4.3	Verbrennungsregelung	147
3.4.4	Regelung der Abgasrückführung	148
3.4.4.1	Interne Abgasrückführung	148
3.4.4.2	Externe Abgasrückführung	149
3.4.5	Regelung am Aufladeaggregat	150
3.4.5.1	Ladedruckregelung	150
3.4.5.2	Rückblaseregelung (Pumpschutz)	151

3.4.5.3 Abgastemperaturregelung	152
3.4.6 Fahrerregler	152
3.5 Darstellung des Motors als Kennfeld	153
3.5.1 Vorgehensweise und Randbedingungen	154
3.5.2 Rekonstruktion des Drehmomentenverlaufs	156
3.6 Simulationsergebnisse	159
3.6.1 Stationäre Untersuchungen (Parametervariationen)	160
3.6.1.1 Lastvariation gedrosselter Ottomotor	160
3.6.1.2 Einfluß von Zündung und Brenndauer	162
3.6.1.3 Variation von Verdichtungsverhältnis, Last und Spitzendruck am Großdieselmotor	164
3.6.1.4 Untersuchungen zu vollvariablen Ventiltrieben	165
3.6.1.5 Variation der Saugrohrlänge und der Ventilsteuerzeiten (Ottomotor, Vollast)	167
3.6.1.6 Untersuchungen zum Restgas bei einem abgasturboaufgeladenen Pkw-Dieselmotor	167
3.6.1.7 Umblasen Großdieselmotor	171
3.6.2 Transiente Untersuchungen	174
3.6.2.1 Lastaufschaltung Generator	174
3.6.2.2 Hochlauf eines Dieselmotors mit Registeraufladung	176
3.6.2.3 Beschleunigung eines NFZ im direkten Gang	177
3.6.2.4 Beschleunigung eines NFZ von 0 auf 80 km/h	178
3.6.2.5 Eingriffsmöglichkeiten am Abgasturbolader (Wastegate, VTG, elektrisch unterstützter Lader, elektrischer Zusatzverdichter)	180
3.6.2.6 Teil des ECE-Zyklus	182
3.6.2.7 Warmlauf im ECE-Zyklus	184
3.6.2.8 Beschleunigung und Lastabwurf beim turboaufgeladenem Ottomotor	186
4 Dreidimensionale, instationäre Strömungsfelder	189
4.1 Navier-Stokes-Gleichungen	189
4.1.1 Strömungsfeld	189
4.1.2 Erhaltungssätze	190
4.1.3 Allgemeine Grundgleichungen	192
4.1.4 Numerische Integrationsverfahren	195
4.2 Reynoldsgemittelte Navier-Stokes-Gleichungen	197
4.3 Turbulenzmodelle	198
4.3.1 Wirbelviskositätshypothese	198

4.3.2	Das k, ε -Modell	199
4.3.3	Reynoldsspannungs-Modelle	201
4.4	Wandgesetze	201
4.4.1	Universelles Geschwindigkeitsgesetz	202
4.4.2	Universelles Temperaturgesetz	204
4.4.3	Eindimensionale Wandbindungsgleichung	206
4.5	Anwendungen	209
5.	Verbrennungsmodelle	213
5.1	Klassifizierung	213
5.2	Phänomenologische Mehr-Zonen-Modelle	216
5.2.1	Dieselmotorische Verbrennung	216
5.2.2	Ottomotorische Verbrennung	225
5.2.3	Schadstoffbildung	229
5.3	Dreidimensionale Modelle	232
5.3.1	Dieselmotorische Verbrennung	232
5.3.2	Ottomotorische Verbrennung	236
5.3.3	Zusammenfassung und Ausblick	240
Anhang A:	Thermodynamische Grundlagen	242
Literatur		247
Stichwortverzeichnis		253

Abkürzungen

AGR	Abgasrückführung
AÖ	Auslaß öffnet
ATL	Abgasturbo-Aufladung
AV	Auslaßventil
BB	Brennbeginn
	Blowby
BD	Brenndauer
BR	Brennraum
BV	Brennverlauf
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
Kst	Kraftstoff
KW	Kurbelwinkel
LDA	ladedruckabhängiger Vollastanschlag
LES	Large-Eddy-Simulation
LLK	Ladeluftkühler
LWOT	Ladungswechsel-OT
MOT	Motorblock
MSL	Motorschlucklinie
MUP	Massenumsatzpunkt
NFZ	Nutzfahrzeug
NN	Neuronales Netz
ÖK	Ölkühler
ÖW	Ölwanne
OT	oberer Totpunkt
OHC-GG	Sauerstoff-Wasserstoff-Kohlenstoff-Gleichgewicht
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 Turboladegerometrie
ZOT	Zünd-OT (oberer Totpunkt)
ZV	Zündverzug
ZZP	Zündzeitpunkt

Formelzeichen

[]	Konzentration [mol / m ³]
A	Fläche [m ²]
	Parameter Zacharias
A*	Temperaturdifferenz Heider [K]
a	Konstante Vibe-Brennverlauf
	Schallgeschwindigkeit [m/s]
	Temperaturleitfähigkeit [m ² / s]
B	Funktion Heider
BD	Brenndauer [Grad]
b	Lagerbreite [m]
C	Funktion Lax Wendroff
	Konstante
C ₁	Konstante Woschni
C ₂	Konstante Woschni [m/(s K)]
C ₃	Konstante Vogel
C _{gl}	Konstante Heider
C _i	Konstante
c	Anteil Kohlenstoff [kg /kg Kst]
	Geschwindigkeit [m/s]
	Konstante
	spezifische Wärme [J/(kg K)]
c _K	Kolbengeschwindigkeit [m/s]
c _m	mittlere Kolbengeschwindigkeit [m/s]
c _p	spezifische Wärme bei konst. Druck [J/(kg K)]
c _u / c _i	Drallzahl
c _v	spezifische Wärme bei konst. Volumen [J/(kg K)]
D	Durchmesser [m]
	Parameter Zacharias
	Zylinderdurchmesser [m]
$\frac{D}{Dt}$	totale Ableitung

$\frac{\partial}{\partial t}$	lokale Ableitung
d	Wanddicke [m]
d_m	mittlerer Turbinendurchmesser [m]
E	Energie [J]
E_{kin}	kinetische Strahlenergie [J]
ED	Einspritzdauer [Grad]
e	Exzentrizität, Schränkung [m]
	spezifische Gesamtenergie [J/kg]
F	Funktion Lax Wendroff
	Funktion
	Kraft [N]
FA	Parameter Zacharias
G	Funktion Lax Wendroff
	Gibbs-Funktion [J]
$g(r)$	Tropfengrößenverteilungsfunktion
H	Enthalpie [J]
H_u	unterer Heizwert [J/kg]
h	Anteil Wasserstoff [kg /kg Kst]
	spezifische Enthalpie [J / kg]
I	Impuls [(kg m)/s]
iz	Anzahl Leitungsabschnitte
K	Gleichgewichtskonstante
K_c	Behältersteifigkeit [N/m ⁵]
K_d	Differentialbeiwert
K_i	Integralbeiwert
k	Konstante
	turbulente kinetische Energie [m ² / s ²]
	Wärmedurchgangszahl [W / (m ² K)]
	Zählindex
k_R	Rohrreibungskoeffizient [m / s ²]
L	Länge [m]
	integrales Längenmaß [m]
L_{min}	Mindestluftbedarf
	stöchiometrisches Luftverhältnis
l	Pleuellänge [m]
L_T	Taylor-Mikrolänge [m]
M	Masse [kg]
	Molmasse [kg / kmol]
Ma	Machzahl
m	Masse [kg]

	Vibe-Parameter
m_p	Exponent Verdampfung
N	Zahl der Brennstofftropfen
Nu	Nußelt-Zahl
n	Anzahl Mole
	Drehzahl [U / min]
	Polytrophenexponent
O	Sauerstoff
o	Anteil Sauerstoff [kg / kg Kst]
P	Leistung [W]
Pr	Prandtl-Zahl
p	Druck [N / m ²]
	Partialdruck [N / m ²]
p_0	Schleppdruck [N / m ²]
Q	Wärmemenge [J]
q	spezifische Wärmeenergie [J / kg]
	Wärmestromdichte [J / (m ² s)]
R	Gaskonstante [J/(kg K)]
R_0	universelle Gaskonstante [J/(mol K)]
R_m	Gaskonstante des Gemisches
R_{th}	thermischer Ersatzleitkoeffizient [W / (m ² K)]
Re	Reynolds-Zahl
r	Kurbelwellenradius [m]
	Luftgehalt
	Radius [m]
Sc	Schmidt-Zahl
SF	Spülfaktor
Sh	Sherwood-Zahl
SMD	Sauter Mean Diameter [m]
s	Kolbenweg [m]
	Länge [m]
s_L	laminare Flammengeschwindigkeit [m / s]
T	Temperatur [°C]
t	Zeit [s]
U	Innere Energie [J]
u	spezifische Innere Energie [J / kg]
	Geschwindigkeitskomponente [m / s]
u / c_0	Laufzahl
V	Volumen [m ³]
v	Geschwindigkeitskomponente [m / s]
	spezifisches Volumen [m ³ / kg]

$v_i \frac{\partial}{\partial x_i}$	konvektive Ableitung
W	Arbeit [J]
\dot{W}	Leistung [W]
We	Weber-Zahl
w	Geschwindigkeit [m / s] Geschwindigkeitskomponente [m / s] spezifische Arbeit [J / kg]
X	Regelgröße
X_d	Regelabweichung
x	Anteil Koordinate Molenbruch [mol / kg] Weg [m]
\dot{x}	Reaktionsrate
x_i	verallgemeinerte Koordinate [m]
y	Koordinate
z	Koordinate Korrekturfaktor

Griechische Symbole

α	Durchflußkoeffizient Koeffizient Lax Wendroff Wärmeübergangskoeffizient [W / (m ² K)]
β	Koeffizient Lax Wendroff Winkel [Grad]
Δ	Verbrennungsterm
$\Delta_R G^0$	Standard-Reaktionsenthalpie [J]
$\Delta h, \Delta h_v$	Verdampfungsenthalpie [J / kg]
Δm	Vibe-Parameter
Δp	Druckdifferenz [N / m ²]
Δt	Zeitabschnitte [s]
Δt_v	Verweilzeit [s]
$\Delta \phi$	Brenndauer [Grad]
δ	Grenzschichtdicke [m]
δ^*	Verdrängungsdicke
δ_h^*	Enthalpieverlustdicke

ε	Dissipationsrate [m^2 / s^2] Konstante Kühlziffer Verdichtungsverhältnis
ζ	Rohrreibungszahl
η	dynamische Viskosität [$(\text{N s}) / \text{m}^2$]
η_U	Umsetzungsgrad
Θ	Gesamtoberfläche Tropfen [m^2] Massenträgheitsmoment [kg / m^2]
ϑ	bezogene Temperatur [K]
κ	Isentropenexponent
λ	Verbrennungsluftverhältnis Wärmeleitfähigkeit [$\text{W} / (\text{m K})$]
λ^*	Mischungsstöchiometrie
λ_0	Verbrennungsluftverhältnis Heider
λ_L	Liefergrad
λ_S	Schubstangenverhältnis
μ	Durchflußkoeffizient
ν	dynamische Viskosität [m^2 / s]
ν_i	stöchiometrischer Koeffizient
ν_τ	Wandschubspannungsgeschwindigkeit [m / s]
π	bezogener Druck Druckverhältnis Kreiszahl
π_T^*	Reziprokwert Turbinendruckverhältnis
π_V	Verdichterdruckverhältnis
ρ	Dichte [kg / m^3]
τ	Flugzeit [s] Zeit (Zündverzug) [s]
τ_{ij}	Schubspannungstensor
τ_R	Mischungsdauer
τ_{zu}	Zündverzugszeit [s]
Φ	spezifische Kühlleistung [W / K]
φ	Grad Kurbelwinkel [°KW]
Ψ	Auslaßfunktion
ψ	relatives Lagerspiel [m]
ω	Winkelgeschwindigkeit [s^{-1}]
$\dot{\omega}$	Winkelbeschleunigung [s^{-2}]

Indices

-	gemittelt, zeitlicher Mittelwert
'	molare Größe
'	turbulente Schwankungsgröße
+	dimensionslose Größe
→	vektorielle Darstellung
•	Ableitung nach der Zeit
∞	außerhalb der Grenzschicht
0	Ruhezustand
	Schlepp
1	eintretend
	nach Drosselstelle
	vor Strömungsmaschine
	Zone 1
2	austretend
	nach Strömungsmaschine
	Zone 2
15	bei 15°C
A	Ausgangspunkt
	Auslaß
AÖ	Auslaß öffnet
a	außen
	austretend
	axial
ab	abströmend
B	Brennstoff
BB	Blowby
	Brennbeginn
BD	Brenndauer
BE	Brennende
Beh.	Behälter
Br	Brennstoff
bez.	Bezug
C	Kohlenstoff
CO ₂	Kohlendioxid
c	Kompression
cyl	Zylinder
d	Flügelrad
diff.	Diffusion

<i>E</i>	Einlaß
<i>EB</i>	Einspritzbeginn
<i>ES</i>	Einlaß schließt
<i>ESV</i>	Einspritzverlauf
<i>EV</i>	Einlaßventil
<i>e</i>	Einspritzverzug
	eintretend
	effektiv
<i>F</i>	Flammenfront
<i>FB</i>	Förderbeginn
<i>f</i>	fuel
<i>G</i>	Gaskraft
<i>Ges.</i> , <i>ges</i>	gesamt
<i>Gl</i>	Glysantin
<i>gl</i>	global
H_2	Wasserstoff
H_2O	Wasser
<i>Hub</i> , <i>h</i>	Hub
<i>i</i>	innere, innen
	Zählindex
<i>ind</i>	indiziert
<i>inj</i>	injiziert, Injektion (Strahl)
<i>is</i>	isentrop
<i>K</i>	Kühler
<i>Ko</i> , <i>Kol</i>	Kolben
<i>Komp</i>	Kompression
<i>Kr</i>	Kraftstoff
<i>KS</i>	Kurzschluß
<i>KW</i>	Kühlwasser
<i>k</i>	Kühlmedium
<i>korr.</i>	Korrektur, korrigiert
<i>krit.</i>	kritisch
<i>L</i>	Lagerbolzen
	Leitung
	Luft, Ladeluft
<i>M</i>	Massenkraft
<i>Mot</i>	Motor
<i>m</i>	Mittel-, mittlerer
	molar
	Mulde
<i>max</i>	maximal
N_2	Stickstoff

<i>n</i>	Drehzahl
<i>n.T.</i>	nach Turbine
<i>n.V.</i>	nach Verdichter
O_2	Sauerstoff
<i>OT</i>	oberer Totpunkt
<i>o</i>	obere
	Standardzustand
<i>Ph</i>	Phase
<i>p</i>	Druck
<i>pre</i>	premixed
<i>q</i>	Quell-, Quetsch-
<i>R</i>	Reaktions-
	Reibung
<i>r</i>	radial
	Reibung
	Rückwärtsreaktion
<i>SP</i>	Schwerpunkt
<i>sys</i>	System
<i>T</i>	tangential
	Temperatur
	Turbine
<i>TH</i>	Thermostat
<i>TL</i>	Turbolader
<i>t</i>	turbulent
<i>tats.</i>	tatsächlich
<i>th., theo.</i>	theoretisch
<i>Umg.</i>	Umgebung
<i>UT</i>	unterer Totpunkt
<i>u</i>	untere
<i>uv</i>	unverbrannt
<i>V</i>	Verdichter
V_η	Verlust, Viskositätseinfluß
V_ρ	Verlust, Dichteeinfluß
<i>v</i>	verbrannt
	Vorwärtsreaktion
<i>v.T.</i>	vor Turbine
<i>v.V.</i>	vor Verdichter
<i>v.Verbr.</i>	vor Verbrennung
<i>verd.</i>	verdampft
<i>W</i>	Wand
<i>x</i>	an der Stelle x
	Anteil C

	Ausgangspunkt
x_{RG}	Restgas
y	Anteil H
Z , Zyl.	Zylinder
ZV	Zündverzug
Zyl.W	Zylinderwand
ZZP	Zündzeitpunkt
z	Anteil O
zk	zu kühlendes Medium
zu	zuströmend
α	konvektiv
ε	Strahlung
η	Viskositätseinfluß
λ	Verbrennungsluftverhältnis
δ	am Rand der Grenzschicht
	Dichteeinfluß