

**Helmut Eichlseder  
Manfred Klüting  
Walter F. Piock**

**Grundlagen und Technologien  
des Ottomotors**

**Der Fahrzeugantrieb  
Herausgegeben  
von Helmut List**



**SpringerWienNewYork**



# Der Fahrzeugantrieb

Herausgegeben von Helmut List

Wissenschaftlicher Beirat

K. Kollmann, H. P. Lenz, R. Pischinger

R. D. Reitz, T. Suzuki

Helmut Eichlseder  
Manfred Klüting  
Walter F. Piöck

Grundlagen und Technologien des Ottomotors

Der Fahrzeugantrieb

SpringerWienNewYork

Dipl.-Ing. Dr. Helmut Eichlseder

Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik  
Technische Universität Graz, Graz, Österreich

Dr.-Ing. Manfred Klütting

BMW AG, München, Deutschland

Dr. Walter F. Piöck

AVL List GmbH, Graz, Austria

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Produkthaftung: Sämtliche Angaben in diesem Fachbuch (wissenschaftlichen Werk) erfolgen trotz sorgfältiger Bearbeitung und Kontrolle ohne Gewähr. Insbesondere Angaben über Dosierungsanweisungen und Applikationsformen müssen vom jeweiligen Anwender im Einzelfall anhand anderer Literaturstellen auf ihre Richtigkeit überprüft werden. Eine Haftung des Autors oder des Verlages aus dem Inhalt dieses Werkes ist ausgeschlossen.

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

© 2008 Springer-Verlag/Wien

Printed in Austria

Datenkonvertierung: Thomson Press (India) Ltd., Chennai

Druck: Druckerei Theiss GmbH, A-9431 St. Stefan im Lavanttal

Gedruckt auf säurefreiem, chlorfrei gebleichtem Papier – TCF

SPIN 11422563

Mit 262 Abbildungen

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.

ISSN 1617-8920

ISBN 978-3-211-25774-6 SpringerWienNewYork

# Vorwort

Im Rahmen der von Hans List herausgegebenen Reihe „Die Verbrennungskraftmaschine“ wurde die Gemischbildung und Verbrennung im Ottomotor bereits erstmals vor 40 Jahren in einem Werk von K. Löhner und H. Müller behandelt. 1990 verfasste H. P. Lenz, dem fortgeschrittenen Stand der Technik entsprechend, eine neue Ausgabe.

Seit dieser Zeit hat beim Ottomotor eine rasante und von vielen im Ausmaß unerwartete Entwicklung stattgefunden. Auf Anregung von Prof. Helmut List wurde das vorliegende Buch erstellt, um dieser Entwicklung Rechnung zu tragen. Sein Engagement und seine Unterstützung haben dieses Werk in der vorliegenden Form ermöglicht, wofür wir ihm herzlich danken.

Die Entwicklung des Ottomotors wurde in den letzten Jahren von weiterer Emissionsminderung und Vollaststeigerung, aber vor allem von der CO<sub>2</sub>-Emissions- und damit Verbrauchsminderung vorangetrieben. Das dazu erforderliche Wissen um die Grundlagen der ottomotorischen Gemischbildung und Verbrennung konnte im gleichen Zeitraum mit neuen Diagnostik- und Simulationsverfahren erarbeitet und wesentlich erweitert werden.

Die mit diesen Erkenntnissen aktualisierten Grundlagen des ottomotorischen Arbeitsprozesses und die heute relevanten Rahmenbedingungen bilden den ersten Teil des vorliegenden Werkes. In weiteren Kapiteln wird wesentlichen Neuentwicklungen bei Komponenten und konzeptioneller Gestaltung von Ottomotoren Rechnung getragen. An die Stelle der früher einen großen Raum einnehmenden Vergasertechnik sind überwiegend elektronisch geregelte Gemischbildungssysteme getreten. Diese als Saugrohr- oder Direkteinspritzung ausgeführten Systeme erweitern die Funktionalität des Ottomotors essentiell. Mit den neuen Freiheitsgraden wird die Möglichkeit für neue ottomotorische Konzepte wie beispielsweise vollvariable Ventilsteuerung, geschichtete Verbrennung und homogene Selbstzündung geschaffen. Entsprechend ihrer Bedeutung wird diesen neuen Technologien ein Kapitel gewidmet, das darüber hinaus einen Ausblick auf alternative Kraftstoffe bis hin zur zukunftsweisenden Wasserstofftechnologie gibt. Ergänzend werden die für diese Technologien erforderliche Motorsteuerung und Abgasnachbehandlung behandelt.

Bei der Verfassung des Buches haben uns mehrere Fachleute durch Diskussion, Korrekturlesen des Textes und Anregungen wesentlich unterstützt, wofür ihnen herzlicher Dank gebührt. Besonders zu erwähnen sind an dieser Stelle Prof. Dr. Rudolf Pischinger, Dr. Günter Fraidl und Prof. Dr. Ulrich Spicher, die mit ihrem Fachwissen zum Gelingen des Werkes beigetragen haben.

Teile des Bildmaterials, vor allem ausgeführte Komponenten und Ausführungsformen, wurden ebenso wie die zugehörigen technischen Daten von Fahrzeug- und Komponentenherstellern bereitgestellt, wofür wir unseren Dank aussprechen möchten.

Frau Sabrina Kohlhofer wollen wir für die Koordinationsarbeiten bei der Verfassung des Manuskriptes danken. Sie hat diese aufgrund der Arbeitsbelastung und räumlichen Entfernung der Autoren und des Verlages durchaus herausfordernde Aufgabe mit bewundernswerter Übersicht und Geduld gelöst.

Einem weiteren Mitarbeiter des Institutes für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Herrn Christian Perktold, gebührt besonderer Dank. Leider ist es uns nicht mehr möglich, diesen Dank persönlich auszusprechen: Er wurde in der Fertigstellungsphase dieses Buches durch ein tragisches Lawinenunglück aus unserem Team gerissen. Er wird uns mit seiner offenen, lebendigen und liebenswürdigen Art in Erinnerung bleiben.

Im nun vorliegenden Buch werden die Grundlagen der innermotorischen Vorgänge im Ottomotor, deren Regelung sowie die Abgasnachbehandlung und neue Technologieansätze entsprechend dem aktuellen Stand der Technik und aufbauend behandelt. Dieses Werk wendet sich an Studierende und Ingenieure in Forschung und Entwicklung, aber auch an interessierte Praktiker. Diesen soll es als Lern- und Arbeitsbehelf sowie als Nachschlagewerk dienen.

Helmut Eichlseder, Manfred Klütting, Walter F. Piöck

# Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen XII

1	Historie und Rahmenbedingungen	1
1.1	Historie	1
1.2	Rahmenbedingungen	3
1.2.1	Testzyklen	3
1.2.2	Abgasgesetzgebung USA und Kalifornien	6
1.2.3	Abgasgesetzgebung Europa	6
1.2.4	Abgasgesetzgebung Japan	7
1.2.5	Regelungen zur Verbrauchsreduzierung	7
1.3	Technologien	8
2	Motorischer Arbeitsprozess	10
2.1	Merkmale und Einteilung	10
2.2	Kenngrößen	12
2.2.1	Leistung und Mitteldruck	12
2.2.2	Verdichtungsverhältnis	13
2.2.3	Wirkungsgrad	13
2.2.4	Energiebilanz und Verlustanalyse	14
2.3	Sonderverfahren	19
2.3.1	Lastregelung mit vollvariablen Ventiltrieben	19
2.3.2	Miller-Cycle	19
2.3.3	Atkinson-Cycle	20
3	Kraftstoffe	21
3.1	Zusammensetzung und Aufbau	21
3.1.1	Reine Kohlenwasserstoffe	21
3.1.2	Sauerstoffhaltige Kohlenwasserstoffe	23
3.1.3	Kraftstoffzusätze	24
3.1.4	Gasförmige Kraftstoffe	24
3.2	Eigenschaften	25
3.2.1	Flüssige Kraftstoffe	25
3.2.2	Heizwert und Gemischheizwert	27
3.2.3	Zündwilligkeit und Klopfestigkeit	29
3.2.4	Gesetzliche Anforderungen an Otto-Kraftstoffe	30

3.3	Herstellung von Otto-Kraftstoffen	32
3.3.1	Herstellung aus Mineralöl	32
3.3.2	Alternative Herstellmethoden für flüssige Kraftstoffe	33
3.3.3	Bereitstellung von Wasserstoff	35
3.3.4	Energie- und Emissionsbilanzen – „Well to Tank“	35
4	Gemischbildung	37
4.1	Grundlagen der Gemischbildung	37
4.1.1	Zerstäubung	37
4.1.2	Charakterisierung von Tropfenspektren	42
4.1.3	Verdampfung	44
4.1.4	Numerische Methoden zur Berechnung der Gemischbildung	46
4.2	Äußere Gemischbildung	50
4.2.1	Zentrale Gemischbildung	50
4.2.2	Dezentrale Gemischbildung	58
4.3	Innere Gemischbildung	62
4.3.1	Zylinderströmung und Einspritzung	62
4.3.2	Mischungsprozess	63
4.3.3	Interaktion des Einspritzstrahls mit einer Wand	65
4.4	Charakterisierung der Gemischbildung	67
4.4.1	Einspritzstrahl	67
4.4.2	Gemischbildung und Motorgeometrie	70
5	Gemischbildner	74
5.1	Vergaser	75
5.1.1	Einfacher Kraftfahrzeug-Vergaser	75
5.1.2	Elektronischer Vergaser	77
5.1.3	Gleichdruckvergaser	78
5.1.4	Schiebervergaser	78
5.2	Zentraleinspritzung	79
5.3	Saugrohr-Einzeleinspritzung	79
5.3.1	Aufbau eines Saugrohr-Einspritzventils	80
5.3.2	Zumessung und Aufbereitung	80
5.3.3	Einblaseventil für gasförmige Kraftstoffe	84
5.3.4	Elektrische Ansteuerung und Durchflussverhalten	84
5.4	Benzin-Direkteinspritzung	85
5.4.1	Drallinjektor	87
5.4.2	Injektor mit Mehrlochdüse	89
5.4.3	Injektor mit Schlitzdüse	90
5.4.4	Nach außen öffnende Düse	90
5.4.5	Direkte Gemischeinblasung	93
5.5	Hydraulische Anforderungen an das Kraftstoffversorgungssystem	95
5.5.1	Niederdruck-Kraftstoffsystem	95
5.5.2	Hochdruck-Kraftstoffsystem	95
6	Ladungswechsel und Strömung	97
6.1	Kenngrößen des Ladungswechsels	97

- 6.1.1 Spülung 100
- 6.1.2 Abgasrückführung 103
- 6.2 Auslegung 105
- 6.3 Wellendynamische Aufladeeffekte 106
  - 6.3.1 Schwingrohraufladung 106
  - 6.3.2 Resonanzaufladung 107
  - 6.3.3 Auslegungsbeispiele 107
- 6.4 Aufladung 108
  - 6.4.1 Mechanische Aufladung 113
  - 6.4.2 Abgasturboaufladung 114
  - 6.4.3 Erweiterte Turboaufladung 117
  - 6.4.4 Impulsaufladung 118
- 6.5 Strömung im Motor 118
  
- 7 Zündung und Entflammung 122
  - 7.1 Grundlagen der Funkenzündung 122
    - 7.1.1 Zündvorgang 122
    - 7.1.2 Entflammungsphase und Flammenkernbildung 124
  - 7.2 Zyklische Schwankungen und Entflammung 127
  - 7.3 Zündsysteme für Funkenzündung 129
    - 7.3.1 Spulenzündung 129
    - 7.3.2 Hochspannungs-Kondensatorzündung 130
    - 7.3.3 Mehrfunkenzündung und Wechselstromzündung 130
    - 7.3.4 Magnetzündung 130
  - 7.4 Zündkerze 131
    - 7.4.1 Funktion und Anforderungen 131
    - 7.4.2 Aufbau 131
    - 7.4.3 Betriebstemperatur und Wärmewert 132
    - 7.4.4 Elektrodengeometrie und Funkenstrecke 133
    - 7.4.5 Funkenlage 134
    - 7.4.6 Ionenstrommessung 135
  - 7.5 Alternative Zündsysteme 136
    - 7.5.1 Oberflächenzündung 136
    - 7.5.2 Plasmastrahlzündung 137
    - 7.5.3 Laserzündung 137
    - 7.5.4 Sonderzündverfahren 138
  
- 8 Verbrennung 139
  - 8.1 Grundlagen und Ziele 139
  - 8.2 Thermodynamik der Verbrennung 140
    - 8.2.1 Luftbedarf und Luftverhältnis 140
    - 8.2.2 Energiebilanz und Heizwert 141
    - 8.2.3 Zusammensetzung und Stoffwerte des Verbrennungsgases 142
    - 8.2.4 Reaktionskinetik 143
    - 8.2.5 Zündprozesse 145
    - 8.2.6 Strahlung der Flamme 145
    - 8.2.7 Ionisation der Flamme 145

- 8.3 Flammenausbreitung 146
  - 8.3.1 Laminare Flammenausbreitung 146
  - 8.3.2 Turbulente Flammenausbreitung 147
- 8.4 Limitierte und nichtlimitierte Schadstoffe, Schadstoffbildung 149
  - 8.4.1 Nichtlimitierte Schadstoffe 150
  - 8.4.2 Limitierte Schadstoffe 150
  - 8.4.3 Schadstoffentstehung 150
- 8.5 Homogene Selbstzündung 152
- 8.6 Verbrennungsanomalien 154
  - 8.6.1 Glühzündungen 154
  - 8.6.2 Klopfende Verbrennung 155
  
- 9 Abgasnachbehandlung 158
  - 9.1 Abgasnachbehandlung bei  $\lambda = 1$ -geregelten Motoren 158
    - 9.1.1 Emissionen im Testzyklus 158
    - 9.1.2 Reaktionsmechanismen 160
    - 9.1.3 Funktion des  $\lambda = 1$ -geregelten Dreiwege-Katalysators 161
    - 9.1.4 Systemoptimierung 164
    - 9.1.5 Systemerweiterungen 166
  - 9.2 Abgasnachbehandlung mit  $\lambda > 1$ -geregelten Motoren 168
    - 9.2.1 Funktion des DeNO<sub>x</sub>-Katalysators 168
    - 9.2.2 Systemoptimierung der „mageren“ Abgasnachbehandlung 170
    - 9.2.3 Alternative Nachbehandlungskonzepte 171
  
- 10 Ottomotorische Technologien 173
  - 10.1 Zielfelder 173
  - 10.2 Konventioneller Ottomotor mit Saugrohreinspritzung 175
    - 10.2.1 Ventiltriebskonzepte 175
    - 10.2.2 Variabilitäten der Sauganlagen 177
    - 10.2.3 Variabilitäten der Ventiltriebe (teilvariable Ventiltriebe) 178
    - 10.2.4 Restgassteuerung 179
  - 10.3 Variable Ladungsbewegung 181
  - 10.4 Vollvariabler Ventiltrieb 185
    - 10.4.1 Drosselfreie Laststeuerung mit vollvariablen Ventiltrieben 185
    - 10.4.2 Der mechanisch vollvariable Ventiltrieb 186
    - 10.4.3 Der elektromechanische Ventiltrieb 189
    - 10.4.4 Der elektrohydraulische Ventiltrieb 191
  - 10.5 Variables Verdichtungsverhältnis 194
  - 10.6 Zylinderabschaltung 196
  - 10.7 Benzin-Direkteinspritzung 199
    - 10.7.1 Homogene Brennverfahren mit Direkteinspritzung 200
    - 10.7.2 Schichtkonzepte der ersten Generation – wand- und luftgeführte Brennverfahren 203
    - 10.7.3 Schichtkonzepte der zweiten Generation – strahlgeführte Brennverfahren 206
  - 10.8 Downsizing 208
  - 10.9 Kontrollierte homogene Selbstzündung 211

10.10	Zweitakt-Kleinmotoren	214
10.11	Großgasmotoren	217
10.12	Rotationskolben-Motoren	220
10.13	Brennverfahren für alternative Kraftstoffe	222
10.13.1	Flüssiggas	223
10.13.2	Erdgas	223
10.13.3	Methanol und Ethanol	226
10.13.4	Wasserstoff	227
11	Motorsteuerungen	239
11.1	Systembeschreibung	239
11.1.1	Modellbasierte Funktionsstruktur	239
11.1.2	Drehmomentbasierte Funktionsstruktur	240
11.1.3	Vernetzte Funktionsstruktur	240
11.2	Funktionen	241
11.2.1	Allgemeine Funktionen	242
11.2.2	Diagnose- und Sicherheitskonzepte	243
	Anhang	245
	Literatur	248
	Namen- und Sachverzeichnis	260

# Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

## Formelzeichen

$a, \alpha$	Aufladegrad [–]	$m_A, m_E$	insgesamt ausströmende, einströmende Gasmasse [kg]
$A$	(Querschnitts-)Fläche [m <sup>2</sup> ]	$m_{AG}, m_{AGi}, m_{AGe}$	Abgasmasse [kg], intern, extern rückgeführte Abgasmasse [kg]
$b$	spezifischer Kraftstoffverbrauch [g/kW h]	$m_B, m_L$	Brennstoffmasse [kg], Luftmasse [kg]
$b_e$	effektiver spezifischer Kraftstoffverbrauch [g/kW h]	$m_{Fr}, m_{Sp}$	Frischladungsmasse [kg], Spülmasse [kg]
$C$	elektrische Kapazität [F]	$m_{RG}, m_{VG}$	Restgasmasse [kg], Verbrennungsgasmasse [kg]
$d$	Zylinderdurchmesser [m]	$\dot{m}$	Massenstrom [kg/s]
$d_T$	Tropfendurchmesser [m]	$\dot{m}_B, \dot{m}_L$	Massenstrom Brennstoff, Luft [kg/s] (auch kg/h möglich)
$d_V$	Ventildurchmesser	$M_d$	(Motor-)Drehmoment [N m]
$D$	(charakteristischer) Durchmesser [m]	$n$	Anzahl; (Motor-)Drehzahl [min <sup>-1</sup> ], manchmal auch [s <sup>-1</sup> ]; Polytropenexponent [–]
$DF$	Downsizing-Faktor [–]	$Oh$	Ohnesorgezahl [–]
$D$	(mittlerer Tropfen-)Durchmesser [m] (auch [mm, $\mu$ m])	$p$	Druck, Partialdruck [bar, Pa]
$D_{32}$	Sautertropfendurchmesser [m] (auch [mm, $\mu$ m])	$p_0$	Standarddruck, $p_0 = 1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar}$
$E$	elektrische Energie [J]; Exergie [J]	$p_i, p_e$	indizierter Mitteldruck [Pa], effektiver Mitteldruck [Pa] (auch [kPa, bar])
$h$	spezifische Enthalpie [J/kg]	$p_m, p_r$	Mitteldruck [bar], Reibungsmitteldruck [bar]
$h_u^*$	Heizwert (bezogen auf 1 kg Verbrennungsgas) [J/kg]	$P$	Leistung [W, kW]
$H$	Enthalpie [J]	$P_e$	effektive Leistung [kW]
$H_G, \bar{H}_G$	Gemischheizwert [J/m <sup>3</sup> ]	$q$	spezifische Wärme (menge) [J/kg]
$H_m$	molare Enthalpie [J/kmol]	$\dot{Q}$	Wärmestrom [W]
$H_o$	Brennwert (früher: oberer Heizwert) [J/kg]	$Q$	Wärme [J]; elektrische Ladung [C]
$H_u$	Heizwert (früher: unterer Heizwert) [J/kg] (alle Heizwerte auch [kJ/kg, MJ/kg])	$Q_a$	äußere Wärme [J]
$H_u^*$	Heizwert (bezogen auf 1 kmol Verbrennungsgas) [J/kmol]	$Q_{rev}$	reversible Wärme [J]
$H_v, H_p$	Heizwert bei $v = \text{konst.}$ bzw. $p = \text{konst.}$ [J/kg]	$dQ_B/d\varphi$	Brennverlauf [J/KW]
$i$	Laufvariable (1, 2, ..., n)	$dQ_H/d\varphi$	Heizverlauf [J/KW]
$I$	elektrische Stromstärke [A]	$dQ_W/d\varphi$	Wandwärmeverlauf [J/KW]
$K_c$	Gleichgewichtskonstante (bezogen auf Konzentrationen) [–]	$r$	Kurbelradius [m]; spezifische Verdampfungswärme [J/kg]
$K_p$	Gleichgewichtskonstante (bezogen auf Partialdrücke) [–]	$R$	spezifische Gaskonstante [J/kg K]; elektrischer Widerstand [ $\Omega$ ]; Tropfenradius [m] (auch [mm, $\mu$ m])
$L$	Luftbedarf [kg/kg <sub>B</sub> ] (auch andere Einheiten möglich)	$R_m$	allgemeine (molare) Gaskonstante: $R_m = 8314,3 \text{ J/kmol K}$
$L_P$	leistungsbezogener Luftdurchsatz [kg/kW s] (auch andere Einheiten möglich)	$Re$	Reynoldszahl [–]
$L_{st}$	stöchiometrischer Luftbedarf [kg/kg <sub>B</sub> ]	$s$	Länge, Höhe, Kolbenhub, Wanddicke [m]; Schichtdicke (des Gaskörpers, der Flamme) [m]; Flammengeschwindigkeit [m/s]
$m$	Masse [kg] oder [kmol]; Formfaktor (des Vibe-Brennverlaufs) [–]		

$S$	Entropie [J/K]	$\zeta_u$	Umsetzungsgrad [–]
$t$	Zeit [s]; Temperatur [°C]	$\eta$	molekulare (dynamische) Viskosität; Wirkungsgrad [–]
$T$	Temperatur [K]	$\eta_C$	Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses [–]
$U$	elektrische Spannung [V]; innere Energie [J]	$\eta_e, \eta_i$	effektiver Wirkungsgrad, indizierter (innerer) Wirkungsgrad [–]
$v$	spezifisches Volumen [m <sup>3</sup> /kg]; (Teilchen-) Geschwindigkeit [m/s]	$\eta_g$	Gütegrad [–]
$V$	Volumen [m <sup>3</sup> ], Zylindervolumen [m <sup>3</sup> , dm <sup>3</sup> ]	$\eta_{gl}$	Gleichraumgrad [–]
$\dot{V}$	Volumenstrom [m <sup>3</sup> /s]	$\eta_{LLK}$	Ladeluftkühler-Wirkungsgrad [–]
$V_c$	Verdichtungsvolumen [m <sup>3</sup> ]	$\eta_m$	mechanischer Wirkungsgrad [–]
$V_h, V_H$	Hubvolumen eines Zylinders, Hubvolumen des gesamten Motors [m <sup>3</sup> ], Hubvolumen [m <sup>3</sup> ] (auch [l])	$\eta_{s-i, K, \eta_{s-i, T}}$	innerer isentroper Wirkungsgrad des Kompressors (Verdichters), der Turbine [–]
VPI	Varianz-Koeffizient des indizierten Mittel- druck [%]	$\eta_{th}$	thermodynamischer Wirkungsgrad [–]
$w$	spezifische Arbeit [J/kg]	$\eta_v$	Wirkungsgrad des vollkommenen Motors [–]
$w_V$	spezifische Volumänderungsarbeit [J/kg]	$\kappa$	Isentropenexponent [–]
$W$	Arbeit [J]	$\lambda$	Schubstangenverhältnis [–]; Wärmeleitfähigkeit, Wärmeleitzahl [W/m K]; Wellenlänge [m]
$W_e, W_i$	effektive Arbeit, innere (indizierte) Arbeit [J]	$\lambda, \lambda_V, \lambda_{VG}$	Luftverhältnis (Luftzahl), Verbren- nungsluftverhältnis, Luftverhältnis des Verbrennungsgases [–]
$W_v, W_V$	Arbeit des vollkommenen Motors, Volumänderungsarbeit [J]	$\lambda_a$	Luftaufwand [–]
We	Weberzahl [–]	$\lambda_f$	Fanggrad [–]
$x$	Feuchtegrad [–]; Strecke, (Kolben-)Weg, Koordinate [m]; Durchbrennfunktion des Brennverlaufs, Umsetzrate [–, %]	$\lambda_l$	Liefergrad [–]
$x_{AG}, x_{RG}, x_{VG}$	Abgasanteil [–]; Restgasanteil [–]; Verbren- nungsgasanteil [–]	$\lambda_s$	Spülgrad [–]
$x_{AGe}$	externe Abgasrückführrate [–]	$\mu$	Durchflusszahl [–]; Überströmkoefizient [–]
$y$	Koordinate [m]	$\mu\sigma$	Durchflusskennwert [–]
$z$	Koordinate [m]; Zylinderzahl [–]	$\rho$	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$Z_D$	Drallzahl [–]	$\sigma$	Versperrungsziffer [–]; Oberflächenspannung [N/m <sup>2</sup> ]
$Z_T$	Tumblezahl [–]	$\sigma_{pi}$	Standardabweichung des indizierten Mittel- druckes [Pa] (auch [kPa, bar])
$\alpha$	Aufladegrad [–]; Wärmeübergangskoeffizient [W/m <sup>2</sup> K]; Kontraktionsziffer (Durch- flusszahl) [–]	$\sum$	Summe
$\Delta$	Differenz zweier Größen	$\varphi$	Kurbelwinkel [° KW]; Geschwindigkeitsbei- wert [–]
$\varepsilon$	Verdichtungsverhältnis [–]; Dissipation	$\Phi$	Equivalence Ratio (= 1/ $\lambda$ ) [–]
$\varepsilon'$	Verdichtungsverhältnis des Zweitakt-Motors [–]	$\psi$	Durchflussfunktion [–]
		$\omega$	Winkelgeschwindigkeit [s <sup>-1</sup> ]

### Weitere Indizes und Abkürzungen

0	Bezugs- oder Standardzustand	ab	abgeführt(e Wärme)
1	Zustand (im Querschnitt, am Punkt) 1	AGR	Abgasrückführung
2	Zustand (im Querschnitt, am Punkt) 2	AÖ	Auslass öffnet
10	geometrisch gewichtet	abs	absolut
20	oberflächengewichtet	AS	Auslass schließt; Arbeitsspiel
30	volumengewichtet	ATL	Abgasturboaufladung, Abgasturbolader
1-D	eindimensional	B	Brennstoff, Kraftstoff, Benzindampf; Zylinderbuchse; Behälter
3-D	dreidimensional	bez, Bez	bezogen, Bezug
a	aus, außen, äußere	CFD	Computational Fluid Dynamics
A	(Zylinder-)Auslass	CZ	Cetanzahl

diff	Diffusion	MKS	Mehrkörpersysteme
DNS	direkte numerische Simulation	ND	Niederdruck(phase)
dyn	dynamisch	NT	Nutzturbine
e	effektiv; ein, (Behälter-)Eintritt; eingebracht	Öl	Öl
E	(Zylinder-)Einlass	opt	optimal
EB	Einspritzbeginn	OT	oberer Totpunkt
ECU	Engine Control Unit	Pl	Plasma
EÖ	Einlass öffnet	r	Reibung
ES	Einlass schließt	real	real
FEM	Finite-Elemente-Methode	red	reduziert
Fl	Flamme, Flüssigkeit	rel	relativ
FSN	Filter Smoke Number (Schwärzungszahl)	RG	Restgas
Fu	Funken	rL	reale Ladung
G	Gas, gasseitig; Gemisch	rV	realer Verbrennungsablauf
GD-V	Gleichdruck-Verbrennung	s	isentrop, bei $s = \text{konst.}$ ; zur Spülung; spät
ges	gesamt	S	Grenze
GRGD-	kombinierte Gleichraum-Gleichdruck-	st	stöchiometrisch; stabil; stationär; statisch
V	Verbrennung	SZ	Schwärzungszahl
GR-V	Gleichraum-Verbrennung	t	turbulent
HD	Hochdruck(phase)	T	Tropfen; Turbine
HIL	Hardware in the Loop	th	theoretisch; thermodynamisch
i	innen, indiziert	TL	Teillast; Turbolader
id	ideal	u	unverbrannt
inj	Injektor	Ü	Überström-
k	kritisch	UT	unterer Totpunkt
K	Kraftstoff	uV	unvollkommene Verbrennung
Konv	Konvektion	v	verbrannt(e Zone); vollkommen; vor(laufende Welle)
konst.	konstant	V	Ventil; Verlust
KW	Kurbelwinkel	VB	Verbraucher; Verbrennungsbeginn
L	Luft	VD	Verbrennungsdauer
lam	laminar	VE	Verbrennungsende
Leck	Leckage, Blow-by	VL	Vollast
LES	Large Eddy Simulation (Grobstruktursimulation)	VT	Verdichterturbine
LIF	Laser induzierte Interferenz	w	wirksam
LL	Leerlauf	W	Wand(wärme); Wasser
LLK	Ladeluftkühler	WOT	Wechsel-OT
LW	Ladungswechsel	WV	Wandverlust
m	mittel; molar	Z	Zylinder
max	maximal	ZOT	Zünd-OT
Mess	Messung	zu	zugeführt(e) (Wärme)
min	minimal	ZV	Zündverzug
		ZZP	Zündzeitpunkt