



Leseprobe

Uwe Todsien

Verbrennungsmotoren

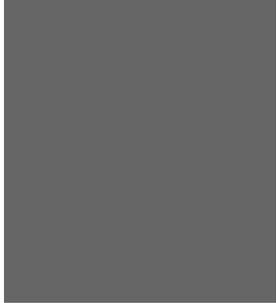
ISBN (Buch): 978-3-446-45096-7

ISBN (E-Book): 978-3-446-45227-5

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45096-7>

sowie im Buchhandel.



Vorwort

Dieses Buch, das auf der Grundlage meiner Vorlesungen an der Hochschule Hannover entstanden ist, soll sowohl den Studierenden einen Einstieg in die Thematik der Verbrennungsmotoren ermöglichen als auch den in der Praxis stehenden Ingenieuren als Nachschlagewerk zur Auffrischung des vorhandenen Wissens dienen. Deshalb wurde besonderer Wert auf die Grundlagen gelegt, und es wurden Beispiele und Übungsaufgaben hinzugefügt.

Das vorliegende Buch soll und kann nicht die umfangreichen Werke über Verbrennungsmotoren ersetzen, sondern nur um eine Facette ergänzen. In erster Linie wird das Buch ein Lehrbuch sein, d. h., dass Studierende, die geringe Vorkenntnisse haben, auch mit diesem Buch arbeiten können. Somit ist einerseits ein breiter Raum für die Grundlagen vorgesehen. Andererseits müssen die momentanen Entwicklungen und damit die neuesten Erkennt-

nisse berücksichtigt werden, um ein aktuelles Buch anzubieten, das auch ein Nachschlagewerk für den Praktiker ist.

In der zweiten Auflage wurde dieses Buch in einigen Punkten erweitert und präzisiert sowie die neuesten Entwicklungen und Kennwerte eingefügt.

Vielen Dank allen aufmerksamen Lesern, die mir geholfen haben Druckfehler und Ungenauigkeiten zu beseitigen und damit das Buch weiter zu verbessern.

Besonderer Dank gebührt dem Hanser Verlag, insbesondere Frau Ute Eckardt und Frau Katrin Wulst für die gute Unterstützung und die sorgfältige Drucklegung und den zahlreichen Firmen für die freundliche Überlassung von Unterlagen und Bildern ihrer Motoren und Motorenbauteile.

Hannover, Januar 2017

Uwe Todsén

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	9			
2	Überblick	10			
	2.1 Geschichtlicher Überblick.....	10			
	2.2 Eigenschaften	11			
	2.3 Probleme	13			
	2.3.1 Umweltprobleme	13			
	2.3.2 Kraftstoffe	14			
	2.4 Zukunftsaussichten.....	14			
	2.5 Einteilung der Verbrennungsmotoren.....	15			
3	Thermodynamische Grundlagen	20			
	3.1 Kreisprozesse	20			
	3.1.1 Carnot-Prozess	21			
	3.1.2 Gleichraumprozess.....	22			
	3.1.3 Gleichdruckprozess	24			
	3.1.4 Seiliger-Prozess (Gemischter Prozess)...	25			
	3.1.5 Vergleich der Kreis- prozesse	28			
	3.2 Verluste des vollkommenen Motors.....	28			
	3.3 Vergleich des wirklichen Prozesses mit dem des vollkommenen Motors	29			
	3.4 Gütegrad	30			
	3.5 Energiebilanz	32			
4	Kinematik, Kräfte und Momente im Motor.....	34			
	4.1 Kinematik des Kurbeltriebes.....	34			
	4.2 Kräfte und Momente im Triebwerk.....	35			
	4.2.1 Kräfte und Momente im Einzylinder- triebwerk.....	35			
	4.2.2 Überlagerung von Gas- und Massenkräften	39			
	4.2.3 Einfachster Massen- ausgleich der Massen- kräfte I. Ordnung.....	40			
	4.2.4 Vollständiger Massenausgleich der Massenkräfte I. und II. Ordnung	41			
	4.3 Kräfte und Momente in Mehrzylindermotoren	41			
5	Kenngößen	49			
	5.1 Hub/Bohrung	49			
	5.2 Leistung und Mitteldruck.....	50			
	5.3 Wirkungsgrade	52			
	5.4 Zylinderfüllung	56			
	5.5 Kolbengeschwindigkeit.....	57			
	5.6 Verdichtungsverhältnis	58			
	5.7 Weitere Kenngößen	59			
	5.8 Kennfelder	61			
6	Kraftstoffe.....	67			
	6.1 Flüssige Kraftstoffe aus Erdöl.....	67			
	6.1.1 Eigenschaften der Kraftstoffe	69			
	6.1.2 Oktanzahl.....	73			
	6.1.3 Cetanzahl.....	74			

6.2	Gaskraftstoffe	75	9	Verbrennung	124
6.3	Alternative Kraftstoffe	77		9.1 Minimale Luftmenge und Heizwert.....	125
6.3.1	Alternative Kraftstoffe für Ottomotoren	78		9.1.1 Gemischheizwert.....	126
6.3.2	Alternative Kraftstoffe für Dieselmotoren.....	79		9.1.2 Gemisch ansaugende Motoren	126
7	Gemischbildung und Zündung	81		9.1.3 Luft ansaugende Motoren	127
7.1	Gemischbildung bei Ottomotoren	81		9.1.4 Kennwerte.....	127
7.1.1	Äußere Gemisch- bildung durch Vergaser	81		9.2 Verbrennung beim Ottomotor.....	129
7.1.2	Äußere Gemisch- bildung durch Einspritzung.....	83	10	9.3 Verbrennung beim Dieselmotor..	130
7.1.3	Innere Gemischbildung durch Einspritzung	87		Abgas und Abgasgrenzwerte	135
7.2	Zündung bei Ottomotoren	91		10.1 Entstehung der Schadstoffe	135
7.2.1	Arten der Zünd- systeme	92		10.1.1 Ottomotor	135
7.2.2	Zündkerzen	95		10.1.2 Dieselmotor	137
7.3	Gemischbildung bei Dieselmotoren.....	96		10.2 Senkung der Emission von Ottomotoren	138
7.3.1	Brennräume	96		10.2.1 Innermotorische Maßnahmen	138
7.3.2	Einspritzpumpen.....	97		10.2.2 Außermotorische Maßnahmen	138
7.3.3	Einspritzdüsen.....	105		10.3 Senkung der Emissionen von Dieselmotoren.....	140
7.3.4	Einspritzparameter	107		10.3.1 Innermotorische Maßnahmen	140
				10.3.2 Außermotorische Maßnahmen	143
8	Ladungswechsel	109		10.4 Abgasmessung und Abgasgesetzgebung.....	146
8.1	Steuerzeiten.....	109		11	Leistungssteigerung
8.2	Nockenauslegung	110		11.1 Möglichkeiten der Leistungssteigerung.....	150
8.3	Kennwerte des Nockens.....	115		11.2 Aufladungsarten	154
8.4	Variable Ventilsteuerungen	116		11.2.1 Fremdaufladung	154
8.4.1	Nockenwellenver- stellung.....	116		11.2.2 Mechanische Auf- ladung.....	154
8.4.2	Ventilhubverstellung zweistufig.....	118		11.2.3 Abgasturboaufladung (ATL).....	156
8.4.3	Ventilhubverstellung vollvariabel	120		11.2.4 Druckwellenaufladung	169

11.3	Berechnung von aufgeladenen Motoren	170	13.2	Pleuelstange	188
11.3.1	Mechanische Auf- ladung und geänderte Atmosphäre	170	13.2.1	Aufbau	189
11.3.2	Abgasturboaufladung ..	171	13.2.2	Beanspruchungen	189
			13.2.3	Werkstoffe.....	190
12	Schmierung von Motoren.....	176	13.3	Kolben.....	190
12.1	Anforderungen und Aufgaben....	176	13.3.1	Aufbau	191
12.2	Grundöle	179	13.3.2	Beanspruchungen	191
12.2.1	Mineralöle.....	179	13.3.3	Herstellung, Gestaltung.....	193
12.2.2	Synthetische Flüssig- keiten	179	13.4	Kolbenringe	196
12.3	Additive für Motoröle	180	13.4.1	Kolbenringformen	197
12.3.1	Viskositätsindexver- besserer.....	180	13.4.2	Herstellung	198
12.3.2	Detergent- und Dispersant-Zusätze.....	180	13.4.3	Werkstoffe.....	199
12.3.3	Reibungsverminderer und Verschleißschutz- zusätze	181	13.5	Zylinder	200
12.3.4	Schauminhibitoren.....	182	13.5.1	Aufbau und Gestaltung	200
12.4	Viskositätsklassen für Motoröle..	182	13.5.2	Belastung	201
12.5	Veränderungen des Motoröls im Betrieb	182	13.5.3	Werkstoffe.....	201
12.6	Ölversorgung des Motors	184	13.6	Zylinderkopf	202
12.7	Ölwechsel	184	13.7	Ventile.....	203
				Literaturverzeichnis	206
13	Bauteile von Motoren	186		Sachwortverzeichnis	209
13.1	Kurbelwelle.....	186			
13.1.1	Aufbau	186			
13.1.2	Gestaltung.....	187			
13.1.3	Beanspruchungen	187			

5

Kenngrößen

Motorkenngrößen sind ein wichtiges Hilfsmittel zur Beurteilung und Einordnung bzw. zum Vergleich von Motoren. Es wird unterschieden zwischen den **Motorkenngrößen**, z. B. dem Hub-Bohrungs-Verhältnis und dem Verdichtungsverhältnis, sowie den **Betriebskenngrößen**, z. B. Leistung, Drehmoment oder Mitteldruck. Die hier behandelten Kenngrößen beziehen sich auf Hubkolbenmotoren, Wankelmotoren werden nicht behandelt.

5.1 Hub/Bohrung

Das **Hub-Bohrungs-Verhältnis** ist der Quotient aus dem Hub und dem Bohrungsdurchmesser.

Aus dem Produkt des Kolbenhubes s und der Kolbenfläche A_K , die sich aus dem Durchmesser D

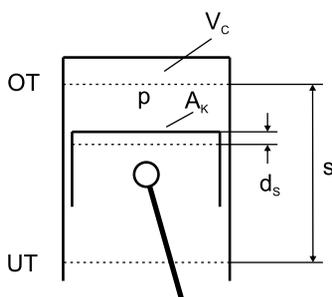
ergibt, errechnet sich das **Zylindervolumen** V_h des Zylinders bzw. multipliziert mit der Zylinderanzahl n das **Hubvolumen** des Motors V_H .

Zur Beschreibung werden die folgenden Bezeichnungen verwendet:

- $s/D = 1$ quadratisch,
- $s/D < 1$ kurzhubig,
- $s/D > 1$ langhubig.

Während im Pkw-Bereich alle drei Varianten – entsprechend der gewünschten Motorcharakteristik – eingesetzt werden, finden bei Lkw-Motoren vornehmlich langhubige Varianten Anwendung. Die **Vorteile** langhubiger Motoren gegenüber den kurzhubigen sind:

- günstige Drehmomentencharakteristik,
- kompakter Brennraum (Oberflächen-Volumen-Verhältnis günstig, η_g und Emissionen besser),
- geringere oszillierende Massen bei gegebenem Hubraum,



s = Kolbenhub
 A_K = Kolbenfläche
 p = Gasdruck im Zylinder
 V_c = Kompressionsvolumen

Bild 5.1 Kolbenweg

- kleinerer Kolbendurchmesser verringert die gaskraftbedingte Triebwerksbelastung bei identischem Zylinderdruckverlauf.

Folgende **Nachteile** stehen dem gegenüber:

- kleinerer Kolbendurchmesser bedingt kleinere Ventiltellerdurchmesser, dadurch wird der Öffnungsquerschnitt kleiner (Auswirkungen im oberen Drehzahlbereich)
- kleinerer Kolbendurchmesser bedingt bei konstantem Hubraum einen größeren Hub, die mittlere Kolbengeschwindigkeit c_m steigt,
- größerer Hub bewirkt i. d. R. einen größeren Pleuelschrägstand und damit eine größere Seitenkraftbelastung des Kolbens.

Das Verhältnis s/D beeinflusst die Charakteristik des Motors entscheidend, denn mit einer Variation des Hub-Bohrungs-Verhältnisses ist im Wesentlichen die Größe des Oberflächen-Volumen-Verhältnisses beeinflussbar. Dieses Verhältnis beziehungsweise die Brennraumoberfläche ist bei einem Kurzhubmotor größer als bei einem langhubigen, also ungünstiger, da die Wärmeverluste größer sind.

5.2 Leistung und Mitteldruck

Bei einem Viertaktmotor mit seinen Takten Ansaugen - Verdichten - Expandieren - Ausschleiben ergibt sich der in Bild 5.2 dargestellte Druckverlauf im Zylinder (innerer oder indizierter Druck). Startpunkt ist in diesem Diagramm der Gaswechsel OT. Mit der Gl. 4.2 zur Berechnung des Kolbenweges in Abhängigkeit vom Kurbelwinkel lässt sich das **momentane Volumen** berechnen und das **Druck-Volumen-Diagramm** (p, V -Diagramm) erstellen. Die umschriebene Fläche entspricht der Arbeit. Die Hochdruckschleife ist positiv, die Gaswechselschleife bei Saugmotoren negativ. Da diese Flächen sich so

nur schwer miteinander vergleichen lassen, wird ein fiktiver Druck, der **innere** oder **indizierte Mitteldruck**, eingeführt. Dieser ergibt sich, indem die resultierende Diagrammfläche als Rechteck dargestellt wird, in dem die untere Seite mit dem Zylindervolumen V_h gebildet wird (Bild 5.2 unten). Für einen Zweitaktmotor ergibt sich der in Bild 5.3 dargestellte Druckverlauf.

Für die Arbeit der Gaskraft am Kolben gilt mit den Bezeichnungen aus Bild 5.1:

$$dW_K = p \cdot A_K \cdot ds \quad (5.1)$$

Pro Arbeitspiel ergibt sich:

$$W_K = \oint p \cdot dV = p_{mi} \cdot V_h \quad (5.2)$$

und damit:

$$p_{mi} = W_K / V_h \quad (5.3)$$

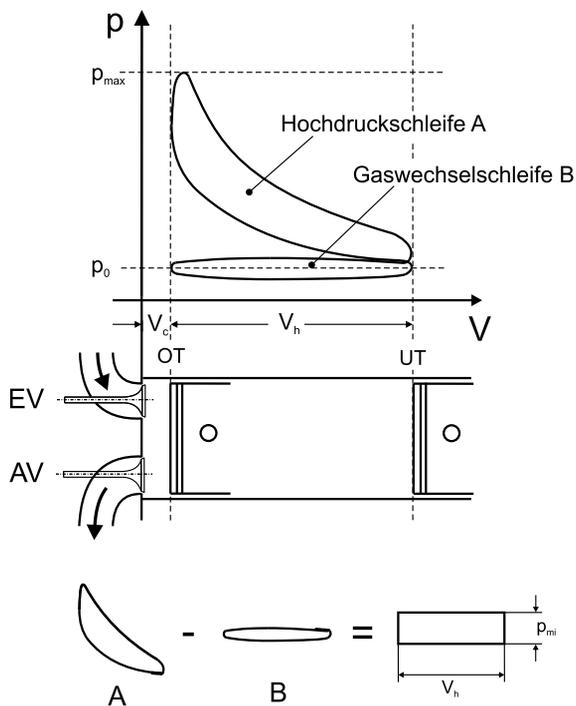


Bild 5.2 p, V -Diagramm eines Viertaktmotors

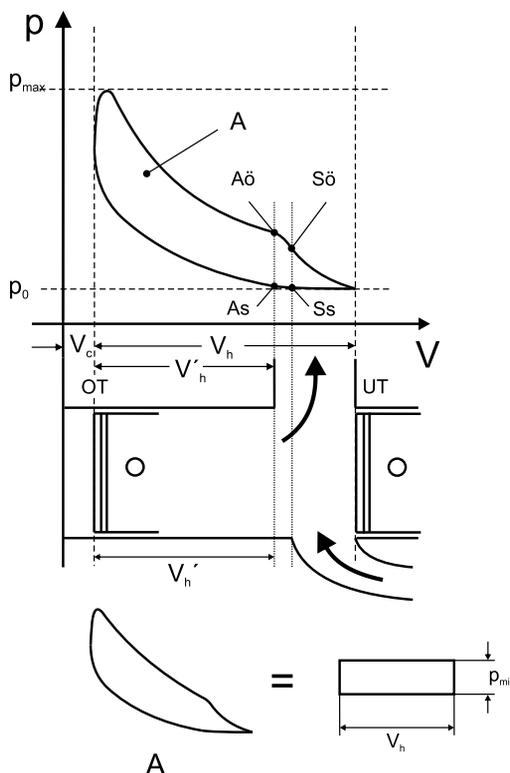


Bild 5.3 p, V -Diagramm eines Zweitaktmotors.
 V'_h effektives Hubvolumen

Aus der Kolbenarbeit oder aus dem Produkt des indizierten Mitteldruckes und dem Hubvolumen lässt sich die **Zylinderleistung** ermitteln, indem man mit der Drehzahl multipliziert. Hier ist jedoch eine Unterscheidung nötig, denn beim Viertaktmotor sind zwei Umdrehungen in der Kurbelwelle notwendig, um einmal Arbeit zu leisten, beim Zweitaktmotor wird bei jeder Umdrehung Arbeit geleistet. Dieses wird durch den Faktor i wie folgt berücksichtigt ($i = 1/2$ beim Viertakt; $i = 1$ beim Zweitakt). Somit ergibt sich die **indizierte Leistung** aus:

$$P_{iz} = i \cdot n \cdot p_{mi} \cdot V_h \quad (5.4)$$

Für einen Motor mit z Zylindern mit $z \cdot V_h = V_H$ ergibt sich:

$$P_i = z \cdot i \cdot n \cdot p_{mi} \cdot V_h = i \cdot n \cdot p_{mi} \cdot V_H \quad (5.5)$$

Die an der Antriebswelle **verfügbare Leistung** ist jedoch geringer als die ermittelte indizierte Leistung am Kolben. Die **Reibungsverluste** des Motors, zu der die gesamte Reibung und die erforderliche Antriebsleistung der Nebenaggregate gerechnet werden, mindern die indizierte Leistung P_i . Es ergibt sich die verfügbare - effektive - Leistung P_e zu:

$$P_e = P_i - P_r \quad (5.6)$$

Definiert man analog zum inneren Mitteldruck p_{mi} einen effektiven Mitteldruck p_{me} (Nutzmitteldruck), so ergibt sich:

$$P_e = i \cdot n \cdot p_{me} \cdot V_H \quad (5.7)$$

und für die **Reibleistung** mit dem Reibmitteldruck:

$$P_r = i \cdot n \cdot p_{mr} \cdot V_H = i \cdot n \cdot (p_{mi} - p_{me}) \cdot V_H \quad (5.8)$$

$$P_r = P_i - P_e \quad (5.9)$$

Zur Verdeutlichung sind in Bild 5.4 die fiktiven Mitteldrücke noch einmal dargestellt.

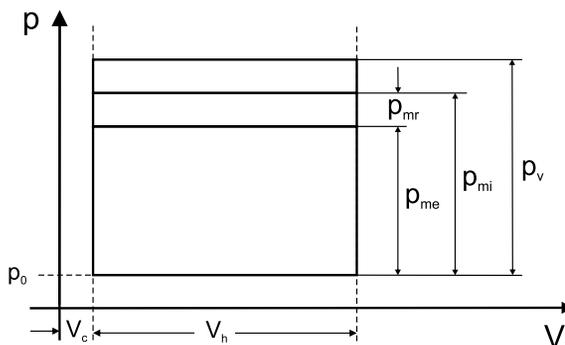


Bild 5.4 Vergleich der Mitteldrücke

Stellt man die Gl. 5.7 nach p_{me} um:

$$p_{me} = \frac{P_e}{i \cdot n \cdot V_H} = \frac{M \cdot \omega}{i \cdot n \cdot V_H} = \frac{M}{V_H} \cdot \frac{2\pi}{i} \quad (5.10)$$

Tabelle 5.1 p_{me} -Werte heutiger Motoren

Motorentyp		Effektiver Mitteldruck p_{me} in bar
Motorradmotoren		... 12
Pkw-Ottomotoren	ohne Aufladung	10 ... 13
	mit Aufladung	13 ... 30
Pkw-Dieselmotoren	ohne Aufladung	9 ... 10,5
	mit Aufladung	23 ... 32
Renntmotoren	ohne Aufladung	... 19
	mit Aufladung	... 37
Lkw-Dieselmotor mit Aufladung		15 ... 26
Größerer Dieselschnellläufer		6 ... 29
Mittelschnellläufer		15 ... 25
Langsamläufer (Kreuzkopf, 2T = Zweitakt)		9 ... 16

so ergibt sich für eine Übersichtsrechnung für einen Viertaktmotor die folgende Zahlenwertgleichung, die für einen Viertaktmotor gilt, wenn M in Nm und V_H in dm^3 eingesetzt wird:

$$p_{me} = 0,126 \cdot M / V_H \quad \text{in bar} \quad (5.11)$$

Werte für effektive Mitteldrücke heutiger Motoren sind in Tabelle 5.1 wiedergegeben.

In dieser und den folgenden Tabellen sind Kennwerte wiedergegeben, die bei der Drucklegung dieses Buches aktuell sind. Die ständige Weiterentwicklung der Motoren bedingt natürlich eine stetige Veränderung der Werte. Trotz dieser Einschränkung ermöglichen die Kennzahlen dem Leser die Einordnung und Bewertung eigener Ergebnisse.

5.3 Wirkungsgrade

Die allgemeine Definition des **Wirkungsgrades** ist:
 $\eta = \text{Nutzen} / \text{Aufwand}$.

Betrachtet man als Nutzen die **Motorleistung** P und als Aufwand die mit dem Kraftstoff eingebrach-

te **Energie** $E = \dot{m}_b \cdot H_u$, wobei \dot{m}_b die eingebrachte Kraftstoffmasse pro Zeit und H_u der Heizwert des Brennstoffes ist, so ergibt sich:

$$\eta = \frac{P}{\dot{m}_b \cdot H_u} \quad (5.12)$$

Wird als Leistung die indizierte Leistung eingesetzt, errechnet sich der **innere Wirkungsgrad** aus:

$$\eta_i = \frac{P_i}{\dot{m}_b \cdot H_u} \quad (5.13)$$

Mit der effektiven Leistung ergibt sich der **effektive Wirkungsgrad**:

$$\eta_e = \frac{P_e}{\dot{m}_b \cdot H_u} \quad (5.14)$$

Der **innere Wirkungsgrad** berücksichtigt die Wandlungsverluste vom Kraftstofftropfen bis zum Druck auf den Kolben und umfasst den Wirkungsgrad des vollkommenen Motors und den Gütegrad:

$$\eta_i = \eta_v \cdot \eta_g \quad (5.15)$$

Die Wirkungsgrade des vollkommenen Motor η_v und der Gütegrad η_g sind bereits in Kapitel 3 beschrieben worden.

Der **mechanische Wirkungsgrad** bezieht die effektive auf die indizierte Leistung, d. h., es werden sämtliche mechanischen Verluste des Motors und die Antriebsleistung der Nebenaggregate einbezogen:

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} = \frac{P_i - P_r}{P_i} = \frac{p_{me}}{p_{mi}} \quad (5.16)$$

Damit lässt sich der **Gesamtwirkungsgrad** aus den Einzelwirkungsgraden darstellen:

$$\eta_e = \eta_v \cdot \eta_g \cdot \eta_m \quad (5.17)$$

Dieser Zusammenhang ermöglicht die Aufstellung einer Wirkkette des gesamten motorischen Prozesses bis zur Nutzleistung:

$$\dot{m}_b \cdot H_u \xrightarrow{\eta_v} P_v \xrightarrow{\eta_g} P_i \xrightarrow{\eta_m} P_e$$

Weiterhin ist die Aufteilung der Verluste in einem Sankey-Diagramm darstellbar (Bild 5.5).

Diese schematische Darstellung gibt einen Überblick über die Größenordnung der Verluste.

Mechanischer Wirkungsgrad

Der mechanische Wirkungsgrad kann nach Gl. 5.16 ermittelt werden. Hierzu muss die Reibleistung des Motors oder der Reibmitteldruck ermittelt werden. Die **Reibleistung** des Motors beinhaltet sowohl die mechanischen Verluste als auch die Antriebsleistung der Nebenaggregate. Die Gesamtreibung kann sowohl im motorischen Betrieb (gefeuert) als auch beim fremd angetriebenen Aggregat (geschleppt) ermittelt werden. Beschrieben werden die folgenden Verfahren:

- gefeuert: Indizierung, Willians-Linie,
- geschleppt: Schleppversuch, Auslaufversuch, Abschaltversuch.

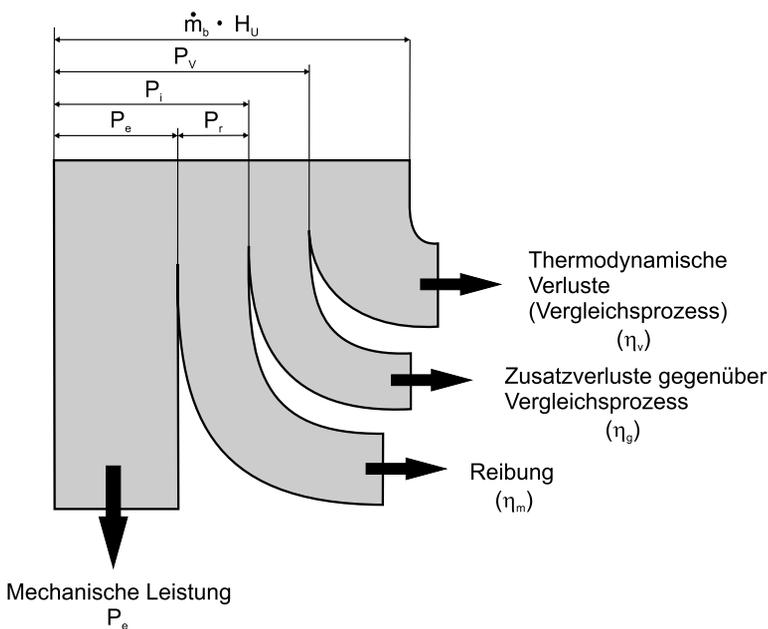


Bild 5.5 Sankey-Diagramm eines Motors (Als ganz grobe Aufteilung kann man sich merken: 1/3 der eingesetzten Energie geht in das Abgas, 1/3 in die Kühlung und 1/3 steht an der Abtriebswelle zur Verfügung.)

Beim **Schleppversuch** sind die Bedingungen im Vergleich zum motorischen Betrieb verändert:

- Temperatur verringert,
- geänderte Gaswechselschleife,
- negative indizierte Arbeit der Kompression und Expansion,
- geänderte Belastungsverhältnisse.

Bei der **Indizierung** wird aus dem p, V -Diagramm die am Kolben vorhandene Arbeit ermittelt sowie mit Gl. 5.3 der indizierte Mitteldruck berechnet und mit dem effektiven Mitteldruck verglichen. Der **Reibmitteldruck** ergibt sich aus:

$$p_{mr} = p_{mi} - p_{me} \quad (5.18)$$

Mit Hilfe der **Willians-Linie** können näherungsweise die mechanischen Verluste eines Motors bestimmt werden. Auf dem Motorenprüfstand werden bei konstanter Drehzahl der Kraftstoffmassenstrom und der effektive Mitteldruck bestimmt und in einem Diagramm aufgetragen (Bild 5.6). Linearisiert man den Verlauf der Kurve im unteren Lastbereich und verlängert man die Gerade bis zum Schnittpunkt mit der Abszisse, ergibt sich im Schnittpunkt der **Reibmitteldruck**.

Bei der linearen Interpolation wird vorausgesetzt, dass der innere Wirkungsgrad η_i konstant ist. Dies ist bei Dieselmotoren bei niedrigen Lasten zulässig. Bei Ottomotoren werden die Veränderungen

gen der Drosselverluste mit der Last mit gemessen und führen zu Ungenauigkeiten. Aus Gl. 5.13 ergibt sich:

$$\eta_i = \frac{P_i}{\dot{m}_B \cdot H_u} = \frac{(P_e + P_r)}{\dot{m}_B \cdot H_u} = \frac{(p_{me} + p_{mr}) \cdot V_H \cdot n \cdot i}{\dot{m}_B \cdot H_u} = \text{konst.} \quad (5.19)$$

Somit gilt bei konstanter Drehzahl:

$$\frac{p_{me1} + p_{mr}}{\dot{m}_{B1}} = \frac{p_{me2} + p_{mr}}{\dot{m}_{B2}} \quad (5.20)$$

Dies ermöglicht die Berechnung des Reibmitteldruckes unter den o. g. Einschränkungen. Das Verfahren ist mit einer hohen Streuung der Ergebnisse behaftet, da die lineare Interpolation der Kurve mit einer gewissen Subjektivität belastet ist. Es stellt jedoch durch die Einfachheit des Verfahrens eine schnelle Möglichkeit der Ermittlung des Reibmitteldruckes dar.

Mithilfe des **Schleppversuches** kann mit den genannten Einschränkungen aus dem Schleppmoment M_s der Reibmitteldruck ermittelt werden. Es gilt:

$$P_r = p_{mr} \cdot V_H \cdot n \cdot i = M_s \cdot \omega \quad (5.21)$$

Daraus ergibt sich:

$$p_{mr} = \frac{P_r}{V_H \cdot n \cdot i} = \frac{M_s \cdot 2\pi \cdot n}{V_H \cdot n \cdot i} = \frac{M_s \cdot 2\pi}{V_H \cdot i} \quad (5.22)$$

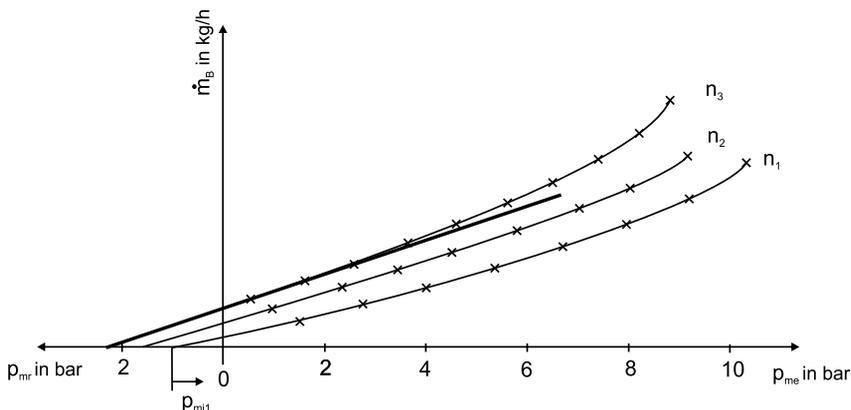


Bild 5.6 Bestimmung des Reibmitteldruckes mit der Willians-Linie (nach [8])

Durch die Demontage einzelner Aggregate und Bauteile des Motors kann hiermit der Anteil dieser Teile am Reibmitteldruck ermittelt werden (Strip-Versuch).

Beim **Auslaufversuch** wird mithilfe der Drehzahländerung nach Abschalten des Motors das Reibmoment bestimmt. Hierbei ist allerdings die genaue Ermittlung des Massenträgheitsmomentes θ erforderlich.

$$M_r = \theta \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (5.23)$$

Der **Abschaltversuch** wird vorzugsweise bei größeren Motoren angewendet, bei denen das erforderliche Schleppmoment sehr große Werte annimmt. Es wird zunächst die effektive Leistung des gesamten Motors bestimmt und dann mit der erbrachten Leistung des Motors verglichen, bei dem bei einigen Zylindern die Kraftstoffzufuhr unterbrochen ist. Hieraus ergeben sich zwei Gleichungen mit zwei Unbekannten, aus denen der Reibmitteldruck bestimmbar ist. Zum einfacheren Verständnis wird das Verfahren im Folgenden an einem Vierzylindermotor erläutert:

$$4 \cdot P_i - 4 \cdot P_r = P_{e1ges} \quad \text{vier Zylinder arbeiten} \quad (I)$$

$$2 \cdot P_i - 4 \cdot P_r = P_{e2ges} \quad \text{zwei Zylinder arbeiten} \quad (II)$$

Gl. (I) – Gl. (II) ergibt:

$$2 \cdot P_i = P_{e1ges} - P_{e2ges}$$

Wird diese Gleichung mit 2 multipliziert und in (I) eingesetzt, folgt:

$$2 \cdot P_{e1ges} - 2 \cdot P_{e2ges} - 4 \cdot P_r = P_{e1ges}$$

Somit kann die **Reibleistung** eines Zylinders ermittelt werden:

$$P_r = \frac{1}{4} \cdot P_{e1ges} - \frac{1}{2} \cdot P_{e2ges}$$

Und die **Reibleistung des Vierzylindermotors** wird:

$$P_{rges} = P_{e1ges} - 2 \cdot P_{e2ges}$$

Bei der Ermittlung des Reibmitteldruckes ergeben sich mit der Indizierung die genauesten Werte, die Ergebnisse, die mit der Willians-Linie erzielt wurden, kommen diesen am nächsten, wobei die Streuung sehr viel größer ist. Das Niveau der geschleppt ermittelten Reibmitteldrucke wird, bedingt durch die veränderten Randbedingungen, niedriger ermittelt. Der Reibmitteldruck hängt stark von der Drehzahl und von der Last des Motors ab. Exemplarisch ist in Bild 5.7 ein Kennfeld des mechanischen Wirkungsgrads wiedergegeben. Es zeigt sich, dass bei kleinen Lasten und Drehzahlen nur sehr niedrige Werte erreicht werden.

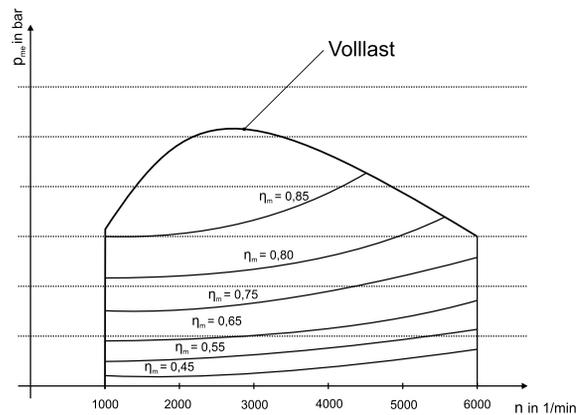


Bild 5.7 Mechanischer Wirkungsgrad

Spezifischer Kraftstoffverbrauch

Der absolute Kraftstoffverbrauch eines Motors gibt eine Aussage über den Aufwand zum Betrieb eines Motors. Zum Vergleich der Wirtschaftlichkeit verschiedener Motoren ist jedoch eine normierte Größe erforderlich. Hier wird der auf die Leistung bezogene Kraftstoffverbrauch herangezogen; dieser Wert wird **spezifischer Kraftstoffverbrauch** genannt.

Bezieht man den Kraftstoffmassenstrom auf die innere Leistung, ergibt sich der **innere spezifische Verbrauch** b_i , und bei Bezug auf die effektive Leis-

Tabelle 5.2 Beispielhafte Kennwerte heutiger Motoren

Motor	Min. spezifischer Kraftstoffverbrauch in g/kWh	Max. effektiver Wirkungsgrad in %
Kleinmotoren (Zweitakt)	350	25
Motorradmotoren	270	32
Pkw-Ottomotoren	250	35
Pkw-Dieselmotoren DI aufgeladen	200	42
Lkw-Dieselmotoren mit Aufladung	190	45
Langsamläufer (Kreuzkopf, 2T)	156	54

tung ergibt sich der **effektive spezifische Kraftstoffverbrauch** b_e :

$$b = \frac{\dot{m}_b}{P} \rightarrow b_i = \frac{\dot{m}_b}{P_i}$$

$$\rightarrow b_e = \frac{\dot{m}_b}{P_e} \quad (5.24)$$

Wird in dieser Gleichung die allgemeine Beziehung für den Wirkungsgrad Gl. 5.12 eingesetzt, ist die Beurteilung der **Wirtschaftlichkeit** mit dem Wirkungsgrad des Prozesses und dem Heizwert des Brennstoffes möglich.

$$b = \frac{1}{\eta \cdot H_u} \rightarrow b_i = \frac{1}{\eta_i \cdot H_u}$$

$$\rightarrow b_e = \frac{1}{\eta_e \cdot H_u} \quad (5.25)$$

Werte für den minimalen spezifischen Verbrauch heutiger Motoren sind in Tabelle 5.2 wiedergegeben.

5.4 Zylinderfüllung

Die **Leistung** eines Motors ist davon abhängig, wie viel Kraftstoff in jedem Zylinder verbrannt werden kann. Diese Menge ist davon abhängig, wie viele Sauerstoffanteile zur Verfügung stehen und somit wie viel Frischluft in den Zylinder eingebracht wur-

de. Zur Beurteilung der Zylinderfüllung werden Luftaufwand und Liefergrad herangezogen.

Luftaufwand

Der Luftaufwand λ_a ist ein Maß für die dem Motor zugeführte Frischladung. Es ist das Verhältnis der gesamten zugeführten Frischladung je Arbeitsspiel m_g , bezogen auf die theoretische Ladung je Arbeitsspiel m_{th} .

Es ergibt sich für einen Zylinder:

$$\lambda_a = \frac{m_g}{m_{th}} = \frac{m_g}{V_h \cdot \rho_{th}} \quad (5.26)$$

Setzt man die Dichte des angesaugten Gemisches bzw. der angesaugten Luft gleich der theoretischen Ladungsdichte, lässt sich der Luftaufwand als volumetrische Größe ermitteln:

$$\lambda_a = \frac{V_g}{V_{th}} \quad (5.27)$$

Liefergrad

Der Liefergrad λ_l ist das Maß für die im Zylinder nach Abschluss des Ladungswechsels verbleibende Frischladung.

Sachwortverzeichnis

A

Abdichten 177
Abgase 9
Abgasgrenzwerte 145
Abgasprüfung 146
Abgasreinigung 145
Abgasrückführrate 64
Abgasrückführung 142
– innere 138
Abgasturbine 171
– Druck vor der 171
Abgasturboaufladung 19
Abschaltversuch 55
Abstreifringe 197
Additive 180
Adsorption, physikalische 181
Ähnlichkeit, geometrische 60
Ähnlichkeiten, mechanische 60
Aluminiumlegierungen 193
Anergie 32
Anfettung 83
Ansaugen 36
Aö 110
Arbeit, indizierte 172
Arbeitstakte 16
Aromaten 68, 179
As 110
Aufladesystem, dreistufiges 153
Aufladung, mechanische 19
Auge 189
Ausgleichsmassen 40
Ausgleichswelle 41
Auslassventile 16, 203
Auslaufversuch 55
Ausscheiden 36
Ausspeicherung 140

Autogas 76

B

Bauteile 9
Bauweise
– axiale 158
– radiale 157
Belastung, thermische 192
Beschleunigerpumpe 82
Beschleunigung 82
– Bestimmung der 35
Beschleunigungsklopfen 74
Betriebskenngrößen 49
Betriebspunkt 61
Betriebstemperatur 140
Betriebsverhalten 63
– Verbesserung des 168
Biegebeanspruchung 187
Biegewechselbeanspruchungen 188
Bimetallventil 204
Biodiesel 77, 80
Blow-by-Gas 196
Bodenplatte 202
Boxermotor 19
Brenndauer 129
Brennstoffzellenantriebe 14
BTL 80
Büchi-Punkt 161
Buchsen 201
Büffelcharakteristik 168

C

CNG 75
CO-Emissionen 136, 137
Common Rail 104
Common-Rail-Systeme 107, 141

Comprexlader 169
Cracken 190
CTL 80
CVS-Verdünnungsverfahren 146

D

Dachelektrode 96
Dehnschrauben 189
Dehnungsverhältnis 25
Destillation 69
Diesel-Dilemma 137
Dieselkraftstoff 69
Dieselmotor 14, 57, 194
Direkteinspritzer 96
Dissoziation 29
Doppelbindungen 179
Doppeltrapezring 197
Downsizing 151
Drehmomentverhalten 161
Drehzahlspektrum 13
Dreibegekatalysator 138
Druck 171
Druckbelastung 39
Druckspannungen 187
Drucksteigerungsverhältnis 25, 26
Druck-Volumen-Diagramm 16, 50
Druckwellenlader 169

E

Eaton-Lader 156
Einbereichssole 182
Einlassventil 16, 109, 203
– Druck am 172
Einsatz 12, 200
Einspritzbeginn 108
Einspritzdauer 107

Einspritzdüsen 138
 Einspritzung
 – direkte 17, 97
 – indirekte 17
 – Qualität der 106
 Einspritzverlauf 107
 Eintrittszeitpunkt 141
 Einzelzylinderpumpe 98
 Elektrodenformen 96
 Energie 52
 Eö 110
 Es 110
 Ethanol 77, 78
 Exergie 32
 Expansion 36

F

Fahrwiderstandslinien 62
 FAME 80
 Fanggrad 57
 Feuersteg 191
 Filter, Regeneration des 143
 Flammpunkt 70
 Fließprozess, stationärer 32
 Flugkolbenmotor, Ottoscher 10
 Flüssigkeitskühlung 19
 Freilaufbedingung 160
 Fremdstoffe, feste 183
 Fremdzündung 18
 FTP 146
 Funkendauer 92

G

Gaskraft 189, 191
 Gaswechselschleife 30
 Gaswechselventile 203
 Gaswechselverluste 30
 Gehäuse 36
 Gemisch
 – homogenes 90
 – stöchiometrisches 17
 Gemischanreicherung 64
 Gemischaufbereitung 81
 Gemischbildung 131
 – äußere 17, 81
 – homogene 17

– inhomogene 17
 – innere 17, 81
 Gemischbildungsverfahren 9, 87
 Gemische 69
 Gemischheizwert 126, 127
 Gesamtwirkungsgrad 53
 Geschwindigkeit, Bestimmung der 35
 G-Lader 156
 Gleichdruckprozess 25
 Gleichraumprozess 22, 25
 Gradführung 34
 Grenzwerte 184
 GTL 80
 Gütegrad 30

H

HCCI 134
 HC-Emissionen 136, 137
 Heißfilm-Luftmassenmesser 85
 Heißschlamm 184
 Heizwert 125
 H-Gas 75
 Hitzdraht-Luftmassenmesser 85
 Hochaufladung 153
 Hochdrehzahlkonzepte 150
 Hochgeschwindigkeitsklopfen 74
 Höhenforschungsflugzeug 153
 Hohlnocken 113
 Hub-Bohrungs-Verhältnis 49
 Hubraummasse 60
 Hubvolumen 49
 Hybridtechnologie 14
 Hyperbar-Verfahren 168

I

Indizierung 35, 54

K

Kaltschlamm 184
 Kaltstart 83, 179
 – sicherer 59
 Kammerverfahren 96
 Kettenspanner 117
 Kippmoment 36
 Klassifikation 182
 Klopfen 59

Klopfgrenze 63
 Klopfneigung 73
 Klopfregelung, dynamische 65
 Klopfensensoren 74
 Klopfverhalten 74
 Knicksicherheit 189
 Kohlenstoff, Verbrennung von 125
 Kolben 34, 191
 Kolbenbolzen 34
 Kolbengeschwindigkeit, mittlere 58, 150
 Kolbenkrone 192
 Kolbenmaschinen 10
 Kolbenring 191, 196
 Kolbenschaft 192
 Kolbenweg 34
 Kompressionsvolumen 58
 Korrosionsinhibitoren 183
 Korrosionsschutz 177
 Kräfte 35
 – Übertragen von 176
 Kräfte II. Ordnung 38
 Kräfte I. Ordnung 38
 Kraftstoff, Viskositätsverringern
 durch 183
 Kraftstoffe
 – alternative 77
 – flüssige 125
 – gasförmige fossile 75
 Kraftstoffeinsparung 9
 Kraftstoffmassenstrom 62
 Kraftstoffverbrauch
 – effektiver spezifischer 56
 – spezifischer 55, 171
 Kreisprozesse 20
 Kreuzkopfführung 34
 Kühlkanal 194
 Kühlung 177
 Kurbelkröpfungen 39, 186
 Kurbelwelle 34
 – gegossene 187
 – geschmiedete 187

L

Ladedruck 172
 Ladungsschichtung 88

Ladungstemperatur 171
Ladungswechsel 89
Ladungswechselorgane 9
Ladungswechseltakte 16
Lager, Antrieb des 154
Lagerzapfen, Verlagerungsbahn des 40
Lastbereich, mittlerer 81
Laufbuchsen
– nasse 201
– trockene 200
Leerlauf 82
Leistung 56
– indizierte 51
– verfügbare 51
Leistungssteigerung 9
Leitschaufelapparat, verstellbarer 163
L-Gas 75
Liefergrad 70, 109, 151, 170, 172
– hoher 57
Literleistung 59
Lkw-Motoren 194
LNG 75
Lochdüse 105, 131
Luft, Temperatur der 171
Luftabbläsung 163
Luftaufwand 109
Luftkühlung 19
Luftmasse 126, 170
Luftmenge 125, 170
Luftmengenmesser 83, 85
Lufttemperatursensor 83
Luftverhältnis 127

M

Magnet 104
Magnetkupplung 167
Magnetventil 104
Magnetzündung 93
Masseelektroden 96
Massenausgleich 39
Massenkräfte 189, 191
Mehrbereichsöle 182
Mehrfacheinspritzungen 108
Mehrlochdüse 97
Metallhydridspeicher 78

Methan 77
Methanol 77, 78
– Umesterung mit 79
Mikro-Sacklochdüsen 106
Mindestluftbedarf 125
Mindestviskosität 178
Minutenring 197
Mischreibung 176
Mitteldruck
– indizierter 50, 172
– innerer 50
– Steigerung des effektiven 150
Monometallventil 204
Motoren
– aufgeladene 19
– Aufladung von 151
Motorenkennfeld 62
Motorkenngrößen 49
Motorkühlung 19
Motorlagerung 38
Motorleistung 52, 150
Motorprüfstände 146
MOZ 74
MPI multi point injection 83

N

Nacheinspritzung 104, 142
Naphthene 68, 179
Nasenminutenringe 198
Nebenkammermotoren 137
NEFZ 146
Nocken, ruckfreie 112
Nockenwelle 98
Nockenwellenversteller 116
Nockenwellenverstellung 109
Normalausgleich 41
Normalkraft 36
NO_x-Emissionen 136, 137
NO_x-Speicherkatalysator 140, 143
Nuten 191

O

Öffnungszeiten 109
Öffnungszeitpunkte 109
Oktanzahl 76
Ölabstreifringe 197

Ölalterung 184
Olefine 68, 179
Ölwechsel 185
Ottokraftstoff 69
Ottomotor 14, 57
– direkteinspritzender 140
Ottomotor mit Direkteinspritzung 87
Oxidation 183
Oxidationsinhibitoren 183
Oxidationskatalysator 143, 145

P

PAOs 179
Paraffine 68, 179
Partikelemissionen 137
Partikelfilter 143, 145
Peptisierung 180
Piezoinjektoren 142
Pleuel 189
Pleuelauge 189
Pleuelkopf 189
Pleuellagerauslegung 39
Pleuelschrauben 189
Pleuelschraubenvorspannung 39
Pleuelstange 34
Polymere, öllösliche 180
Pressung, Hertzsche 115
Primärenergieträger
– fossile 77
– regenerative 77
Prozess
– gemischter 25
– geschlossener 16
– offener 16
Prüfmotoren 74
Pumpe-Düse-Einheit 99
Pumpe-Leitung-Düse 98
p,V-Diagramm 159

Q

Qualitätsregelung 17
Quantitätsregelung 17

R

Radialkraft 36
Radialverdichter 156

RAO-Test 179
 Rapsölmethylester 79
 Reaktion, chemische 181
 Realgaseinfluss 89
 Rechteckring 197
 Registeraufladung 164
 Reibleistung 51, 53, 55
 Reibmitteldruck 54
 Reibungsverluste 51
 Reichweite 67
 Reiheneinspritzpumpen 97
 Ringflattern 197
 Ringstoß 196
 Ringträger 195
 RME 79
 Rohöle 68
 Rollenprüfstände 146
 Rootsgebläse 154, 156
 Rotationsverdichter 156
 ROZ 74
 Rückstandsbildung 183
 Rückströmen 57
 Ruß 183
 Rußbildung 132
 Rußgrenze 63

S

Sacklochdüsen 106
 Saugmotor 18
 Saugrohreinspritzung 17, 83
 Scherung 183
 Schlamm Bildung 184
 Schlepphebeltrieb 115
 Schleppversuch 54
 Schließzeitpunkte 109
 Schmierfilm, tragfähiger 116
 Schmierstoffe 176
 Schmierung 9
 – elasto hydrodynamische 176
 – hydrodynamische 176
 Schmierungsverhältnisse 115
 Schmierzahl 116
 Schrägkantensteuerung 98
 Schwachaufladung 151, 153
 Schwefel 125, 140
 Schwenkmotor-Prinzip 118

Schwinghebellösung 119
 Schwungrad 40
 Schwungradauslegung 39
 SCR-Katalysator 143, 145
 Scrollverdichter 156
 Seiliger-Prozess 25
 Seitenelektrode 96
 Selbstzündung 18, 134
 Sitzlochdüsen 106
 Speicherkolben 102
 Spirallader 156
 SPI single point injection 83
 Spulenzündung 92
 Spülluftgebläse 17
 Stangenkraft 35
 Stauaufladung 159
 Steckpumpe 98
 Steuergerät 94
 Steuerzeiten 110, 116
 Stirlingmotor 9
 Stoßaufladung 159
 Stößelweg 111
 Sunfuel 77, 80
 Synfuel 80
 Synthesegas 77

T

Tangentennocken 113
 Tangentialkraft 36
 Tassenstößelantriebe 119
 Tassenstößeltrieb 115
 Teillast 82
 Teillastwerte 62
 Tellerventile 109
 Temperaturen 178
 – Richtwerte für 178
 Thermodynamik 20
 Tieftemperaturverhalten 179
 Torsion 188
 Totpunkt 34
 Transistorzündung, kontaktgesteuerte 93
 Trapezring 197
 Tumbelsystem 88
 Turbinendruckverhältnis 161

Turbolader, Reihenschaltung zweier 164

U

Unterbrecher 92

V

Valvetronic 122
 Ventilbetätigungen
 – elektromagnetische 122
 – hydraulische 123
 Ventildbewegung 110
 Ventile 138
 Ventilhubverstellung 118
 Ventilsitz 203
 Ventiltrieb, elastischer 114
 Ventilüberschneidung 109
 Veränderungskomplex 184
 Verbrauch
 – innerer spezifischer 55
 – spezifischer 62, 141
 Verbrennung 10, 124
 – unvollständige bei Luftmangel 126
 – vollständige bei Luftüberschuss 126
 Verbrennungskraftmaschine 10
 Verbrennungsmotor 9
 Verbrennungsvorgang 20
 Verdampfungsverluste 183
 Verdichtung 36
 Verdichtungsringe 197
 Verdichtungsverhältnis 58, 89
 – effektives 58
 – geometrisches 58
 Vergaser 81
 Vergleichswirkungsgrad 30
 Versäuerung 183
 Verschleißschutz 176
 Verstellung, stufenlose 122
 Verteilereinspritzpumpen 102
 Verweilzeit 35
 V-Form 19
 Viertaktverfahren 16
 Vierzylindermotor, Reibleistung des 55
 Viskositätserhöhung 183
 Viskositätsverringerung 183

Volllast 82
Volllastbereich 81
Volumen
- angesaugtes 126
- maximales 58
- momentanes 50
Voreinspritzungen 104
Vorkammerverfahren 96
Vornocken 112
Vorreaktionen 73
VR-Motor 19

W

Wandwärme 89
Wankelmotor 9
Wärme­kraft­prozess
- geschlossener 20
- idealer 21
Wärmemenge 172
Wärmeübertragung 20
Wasserstoff 77, 78
- Verbrennung von 125
waste gate 163

Willians-Linie 54
Wirbelkammer 97
Wirbelkammerverfahren 96
Wirkungsgrad 52
- des Seiliger-Prozesses 28
- effektiver 52
- innerer 52
- mechanischer 53
- thermischer 21
- thermodynamischer 22
Wirtschaftlichkeit 56

Z

Zapfendüse 105, 131
Zug-Druck-Wechselbeanspruchung
189
Zündanlage 91
Zündanlage, elektronische 94
Zündbeschleuniger 75
Zündenergie 91
Zündfolge 39
Zündgrenzen 71
Zündkerze 92

Zündspannung 91
Zündspule 92
Zündtemperatur 70
Zündung, vollelektronische 94
Zündverzug 129
Zündverzugszeit 74, 130
Zündwinkel 93
Zündwinkelkennfeld 94
Zündzeitpunkt 92
Zweifederdüsenhalter 107
Zweitaktverfahren 16
Zwischenhebel 122
Zyklus
- außerstädtischer 148
- europäischer 146
- innerstädtischer 148
Zylinder 201
Zylinderdruckmessung 35
Zylinderkopf 202
Zylinderleistung 51
Zylindervolumen 49
- minimales 58