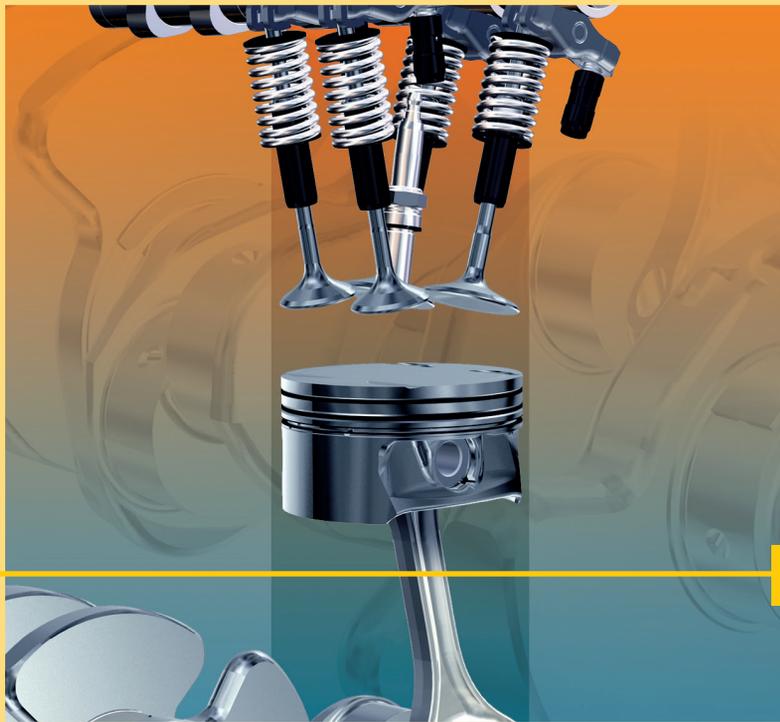


Uwe Todsén

Verbrennungs- motoren

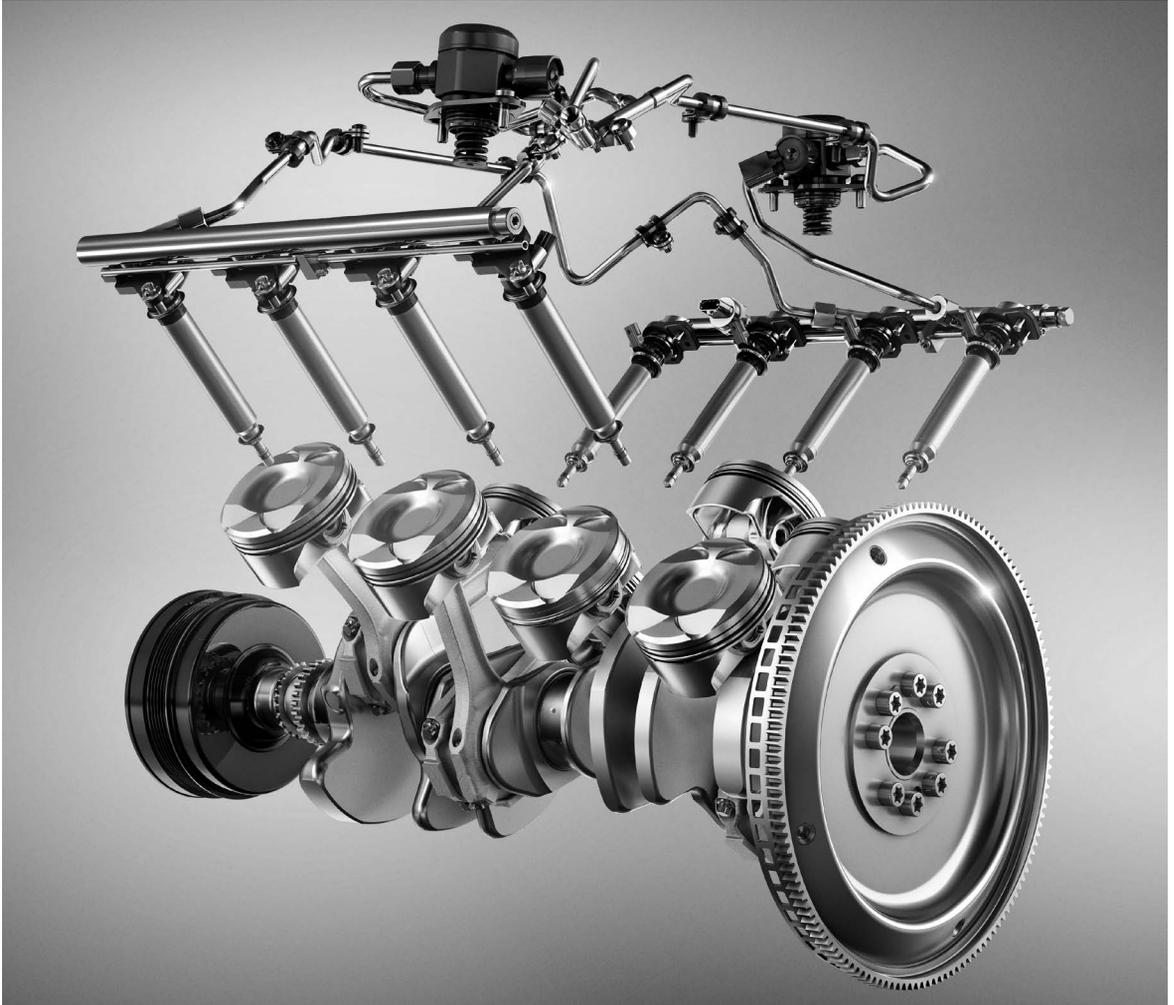


2., neu bearbeitete Auflage

HANSER

Todsen
Verbrennungsmotoren

Fahrzeugtechnik



5,5-Liter-V8-Motor mit Zylinderabschaltung, Leistung 310 kW (422 PS)

Uwe Todsén

Verbrennungsmotoren

2., neu bearbeitete Auflage

Mit 236 Abbildungen und 43 Tabellen

HANSER

Autor:

Prof. Dr.-Ing. Uwe Todsén
Hochschule Hannover
Fakultät II – Maschinenbau und Bioverfahrenstechnik

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

ISBN 978-3-446-45096-7

E-Book-ISBN 978-3-446-45227-5

Einbandbild und Bild Seite 2: Daimler AG

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2017 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

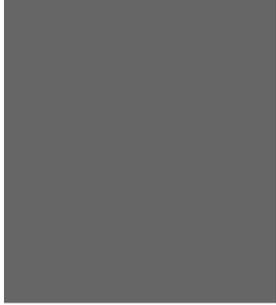
Lektorat: Ute Eckardt

Herstellung: Katrin Wulst

Satz: Beltz, Bad Langensalza

Druck und Bindung: Kösel, Krugzell

Printed in Germany



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 Außer-motorische 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 Außer-motorische Maßnahmen	143
8	Ladungswechsel	109		10.4 Abgasmessung und Abgasgesetzgebung	146
8.1	Steuerzeiten	109			
8.2	Nockenauslegung	110			
8.3	Kennwerte des Nockens	115			
8.4	Variable Ventilsteuerungen	116	11	Leistungssteigerung	150
8.4.1	Nockenwellenver- stellung	116		11.1 Möglichkeiten der Leistungssteigerung	150
8.4.2	Ventilhubverstellung zweistufig	118		11.2 Aufladungsarten	154
8.4.3	Ventilhubverstellung vollvariabel	120		11.2.1 Fremdaufladung	154
				11.2.2 Mechanische Auf- ladung	154
				11.2.3 Abgasturboaufladung (ATL)	156
				11.2.4 Druckwellenaufladung	169

11.3	Berechnung von aufgeladenen Motoren	170	13.2	Pleuelstange	188
11.3.1	Mechanische Aufladung 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 Flüssigkeiten	179	13.4	Kolbenringe	196
12.3	Additive für Motoröle	180	13.4.1	Kolbenringformen	197
12.3.1	Viskositätsindexverbesserer.....	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			

1

Einführung

Verbrennungsmotoren sind als Energiewandlungsmaschinen seit über 100 Jahren weit verbreitet und sichern auch heute noch unsere Mobilität. Bedingt durch die Endlichkeit der Ressourcen an fossilen Energieträgern sind die jetzt geführte Diskussion nach Ersatzlösungen dieser Energieträger und die Erarbeitung grundsätzlicher Alternativen für Fahrzeugantriebe unerlässlich. Jedoch werden noch für viele Jahre Motoren die Konzepte für unsere Mobilität bestimmen, die den heutigen Motoren sehr ähnlich sind. Somit ist es auch in der Zukunft sinnvoll, sich mit den Verbrennungsmotoren auseinanderzusetzen.

Zur Standortbestimmung ist es wichtig, sowohl einen Blick in die Vergangenheit als auch in die Zukunft zu richten. Die Entwicklung in der Vergangenheit zeigt, dass sich seit über 50 Jahren keine grundsätzlich neuen Konzepte durchgesetzt haben. Die zukünftige Entwicklung wird eine Vielzahl von Antriebskonzepten mit unterschiedlichen Kraftstoffen bringen, allerdings wird der herkömmliche **Verbrennungsmotor** weiterhin die Basis aller dieser Konzepte sein, und daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Weiterentwicklung.

Die Reihenfolge der einzelnen Kapitel dieses Lehrbuches orientiert sich an dem bewährten Aufbau der Vorlesung, der einen leichten Einstieg in das Verständnis der Zusammenhänge ermöglicht. Um den Umfang des Buches nicht zu sprengen, werden die heute eingesetzten bzw. in der Entwicklung befindlichen Technologien beschrieben. Hieraus ergibt sich, dass z. B. der **Wankelmotor** und der **Stirlingmotor** nicht Gegenstand der Erörterungen sind.

Zunächst werden die thermodynamischen und mechanischen Grundlagen der Verbrennungsmotoren ausführlich behandelt. Hieraus entwickeln sich die Kennzahlen, die dem Leser eine Grundlage für den Vergleich und die Bewertung realer Motoren ermöglichen. Im Weiteren werden die Kraftstoffherstellung und die Anforderungen dazu beschrieben. Der Weg des Kraftstoffes durch den Motor bildet den roten Faden für die folgenden Kapitel. Am Anfang stehen die **Gemischbildungsverfahren** von Benzin- und Dieselmotoren. Die Füllung des Arbeitsraumes wird mithilfe der **Ladungswechselorgane** gesteuert. Nachdem sich das Gemisch im Brennraum befindet, muss mit der Verbrennungsberechnung die Umsetzung erläutert werden. Die sich hieraus ergebenden **Abgase** müssen ggf. nachbehandelt werden. Die Beschreibung der Grenzwerte und Testverfahren sind hier wichtig. Das Kapitel **Leistungssteigerung** ist keine Bauanleitung „Wie mache ich mein Auto schneller?“, sondern beschreibt die Möglichkeiten, durch Aufladung die Leistung von Verbrennungsmotoren signifikant zu steigern. Im Zuge des Downsizings von Motoren zur **Kraftstoffeinsparung** wird diese Thematik immer wichtiger. Weiterhin wird ein kurzer Einblick in die **Schmierung** von Motoren gegeben.

Das abschließende Kapitel über die **Bauteile** von Verbrennungsmotoren gibt einen Einblick über deren Aufbau und die Aufgaben. Hier kann es nicht das Ziel sein, allumfassend die Bauteile zu beschreiben, sondern es werden die Anforderungen an diese Motorenbauteile und Lösungskonzepte hierfür erläutert.

2

Überblick

Bei einer **Verbrennungskraftmaschine** handelt es sich um eine Kraftmaschine (Maschine, die mechanische Leistung abgibt), in der ein Wärmeprozess und ein Verbrennungsprozess gekoppelt ablaufen.

Im Verlaufe des Prozesses wird die chemisch gebundene Energie des Kraftstoffes durch **Verbrennung** auf dem Wege über thermische Energie in mechanische Arbeit umgewandelt.

Bei **Kolbenmaschinen** besitzt der Arbeitsraum starre Wände, von denen mindestens eine Wand (Kolben) so bewegt wird, dass sich ein veränderliches Volumen ergibt. Die Arbeitsleistung erfolgt durch Nutzung des Gasdruckes.

2.1 Geschichtlicher Überblick

Die Entwicklung der Verbrennungsmotoren begann in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts mit der Weiterentwicklung der Dampfmaschine.

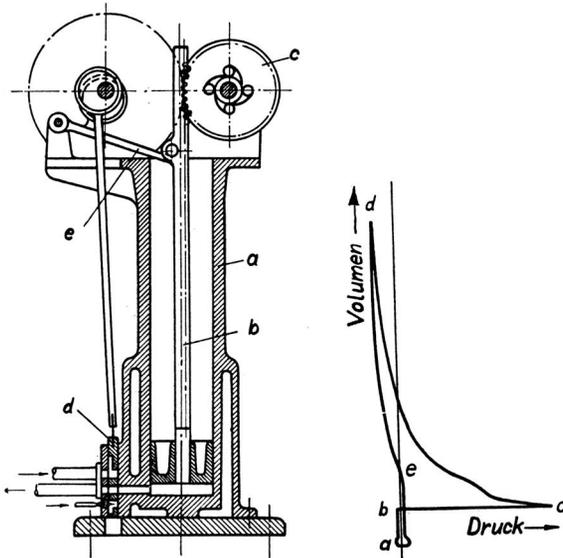
Tabelle 2.1 gibt einen kurzen, natürlich nicht vollständigen Überblick über wichtige Entwicklungsschritte der Verbrennungsmotoren. Die angegebenen Werte für die erreichte Leistung und den effektiven Wirkungsgrad dokumentieren jeweils die erreichten Verbesserungen. Die Einzelschritte zeigen wichtige Eckpunkte und damit auch, dass alle

entscheidenden Verbesserungen der Motoren, wie eine Aufladung mithilfe von Abgasturboladern und die direkte Einspritzung bei Otto- und Dieselmotoren, schon bis 1952 bekannt waren. Die Entwicklungen in den folgenden Jahren beschränkten sich darauf, die Motoren in einzelnen Schritten ständig zu optimieren. Andere Erfindungen, zum Beispiel Motoren, die nach dem Wankel-Prinzip arbeiten, konnten sich nicht durchsetzen.

Der **Ottosche Flugkolbenmotor** (zweite Zeile in der Tabelle 2.1) hatte einen für die damalige Zeit überraschend niedrigen Gasverbrauch und wurde in großer Anzahl ausgeführt. Der Arbeitszyklus dieses Motors startete mit dem Anheben des Kolbens (b) auf 1/12 des Hubes und bewirkte damit das Ansaugen des Gas-Luft-Gemisches. Nach dem Entzünden des Gemisches steigt der Druck, und der Kolben fliegt nach oben (daher der Name). Die kinetische Energie wird über die Zahnstange auf das Zahnrad (c) mit Freilauf übertragen. Nach Erreichen des oberen Totpunktes sinkt der Kolben wieder ab und gibt seine potenzielle Energie an das Schwungrad ab. Dabei werden die Abgase ausgeschoben. Durch das Schwungrad wird der Kolben erneut angehoben und Frischgas angesaugt, der Arbeitszyklus beginnt von neuem. Das Indikatordiagramm dieses Motors ist in Bild 2.1 rechts gezeigt.

Tabelle 2.1 Entwicklungsschritte in der Motorenentwicklung

Jahr	Erfinder	Entwicklungsschritt
1860	Jean Lenoir	erster selbstansaugender Gasmotor, Prinzip einer Dampfmaschine, doppelwirkend, keine Vorverdichtung, elektrische Funkenzündung, $\eta_e = 2 \dots 3\%$, wegweisend für <i>Nikolaus Otto</i>
1867	Nikolaus August Otto Eugen Langen	atmosphärische Gasmaschine, Antrieb der Arbeitswelle über Sperrrad mit Freilauf, $\eta_e \approx 10\%$, max. Leistung 3 PS, in großer Stückzahl industriell hergestellt (s. Bild 2.1)
1876	Nikolaus August Otto	Viertakt-Gasmotor: Verwirklichung der Gemischverdichtung in Verbindung mit dem Viertaktverfahren, Drehzahl $120 \dots 180 \text{ min}^{-1}$, $\eta_e \approx 12\%$, Leistung 3 PS
1883 – 1886	Daimler-Maybach	schnelllaufender, leichter Benzinmotor, $n = 600 \text{ min}^{-1}$, Schwimmervergaser, $P = 0,25 \text{ PS}$, Beginn der Fahrzeugmotorisierung (Motorrad)
1897	Rudolf Diesel	Dieselmotor mit Lufterblasung, Motor mit Luftverdichtung und Selbstzündung, $\eta_e = 26\%$, $P = 18 \text{ PS}$ (Patent 1893)
1912	Gasmotorenfabrik Deutz	kompressorloser Dieselmotor mit Direkteinspritzung, Tauchkolben, $\eta_e = 30\%$, $P = 100 \text{ PS}$
1925	Alfred Büchi	Beschreibung der Aufladung von Dieselmotoren mit Abgasturbolader
1952		Gutbrot-Ottomotor mit Direkteinspritzung, Zweitakt
1953	Mercedes-Benz	MB 300SL Ottomotor mit Direkteinspritzung, Viertakt

**Bild 2.1** Ottoscher Flugkolbenmotor mit Indikator-diagramm [2]

2.2 Eigenschaften

Zur großen Verbreitung der Verbrennungsmotoren hat eine Reihe vorteilhafter **Eigenschaften** beigetragen:

- die Möglichkeit des Betriebes mit flüssigem Kraftstoff hoher Energiedichte, der besonders für den mobilen Einsatz große Vorteile bringt,
- ein guter Wirkungsgrad und damit der ökonomische Umgang mit den Kraftstoffen (bis über 50% der Kraftstoffenergie kann in Form von mechanischer Arbeit genutzt werden),
- die Motoren können einen sehr großen Leistungsbereich abdecken (von unter 0,1 kW bei Modellmotoren bis über 80 000 kW bei einem Schiffsmotor),
- die Motoren decken einen breiten Bereich in der Komplexität ab, es sind einfache robuste Maschinen sowie kompakte Höchstleistungsaggregate möglich.

Einsatz finden Verbrennungsmotoren unter anderem

- in Kraftfahrzeugen, wobei im Pkw-Bereich sowohl Otto- als auch Dieselmotoren eingesetzt werden und im Lkw-Bereich vornehmlich Dieselmotoren,
- in Schienenfahrzeugen mit Dieselmotoren,
- in Schiffen mit Dieselmotoren,
- in Baumaschinen und landwirtschaftlichen Anwendungen mit Dieselmotoren,
- im stationären Bereich als Blockheizkraftwerke, Motorkraftwerke und Versorgungsanlagen.



Pkw-Motor,
0,5 l Hubraum/Zyl.



Lkw-Motor,
2 l Hubraum/Zyl.



**Viertakt-Mittelschnellläufer
L32/44 Common Rail,
35 l Hubraum/Zyl.**



Bild 2.2 Größenvergleich zum Viertakt-Mittelschnellläufer [2]

Pkw-Motor,
0,5 l Hubraum/Zyl.



Lkw-Motor,
2 l Hubraum/Zyl.



**Viertakt-Mittelschnellläufer L48/60,
108 l Hubraum/Zyl.**

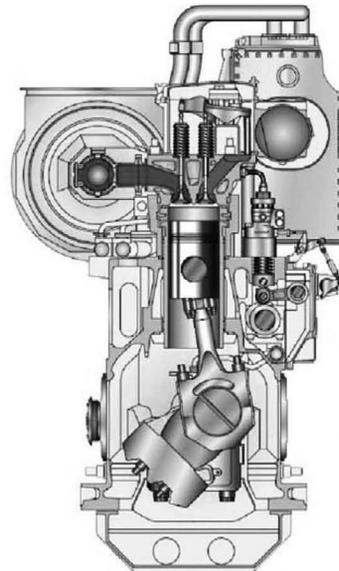


Bild 2.3 Größenvergleich zum Viertakt-Mittelschnellläufer (groß) [2]

Pkw-Motor,
0,5 l Hubraum/Zyl.



Lkw-Motor,
2 l Hubraum/Zyl.



Zweitakt-Langsamläufer K98ME,
2005 l Hubraum/Zyl.

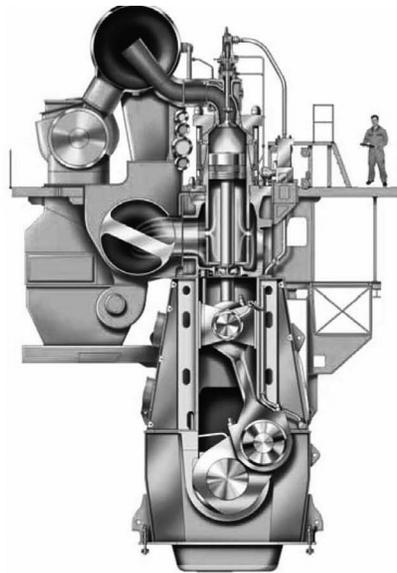


Bild 2.4 Größenvergleich zum Zweitakt-Langsamläufer [2]

Verbrennungsmotoren werden in einem sehr breiten **Drehzahlpektrum** verwendet. Nach der Drehzahl unterscheidet man [4]:

- langsamlaufende Motoren ($60 \dots 200 \text{ min}^{-1}$), z. B. in großen Schiffsantrieben,
- mittelschnelllaufende Motoren ($200 \dots 1000 \text{ min}^{-1}$) z. B. als Lokomotivenmotoren, in kleinen Schiffsantrieben,
- schnelllaufende Motoren, z. B. als Pkw-Antriebe, sie erreichen höchste Drehzahlen (bei Rennmotoren über $19\,000 \text{ min}^{-1}$).

Einen Größenvergleich der Motoren zeigen die Bilder 2.2 bis 2.4 [2]. Beginnend mit einem Pkw-Motor (0,5 l Hubraum pro Zylinder) und einem Lkw-Motor (2 l Hubraum von Zylinder) zeigt Bild 2.2 einen Mittelschnellläufer. Der Vergleich mit einem großen Viertakt-Mittelschnellläufer (108 l Hubraum pro Zylinder) wird in Bild 2.3 und mit einem Zweitakt-Langsamläufer (2005 l Hubraum pro Zylinder) in Bild 2.4 angestellt, er zeigt eindrucksvoll die Dimensionen dieser Motoren.

2.3 Probleme

2.3.1 Umweltprobleme

Abgas

Schon in der Mitte des 20. Jahrhunderts wurden in Kalifornien systematische Untersuchungen durchgeführt, um die Emissionen von Kraftfahrzeugen zu reduzieren. Die Smogproblematik, saurer Regen, Kanzerogenität von Dieselabgasen führten weltweit zur Begrenzung der Emissionen. Für Ottomotoren wurden 1974 in den USA (zunächst unregelmäßige) Katalysatoren und in Deutschland ab 1989 geregelte Katalysatoren zur Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte der Emissionen erforderlich.

Die heutigen Grenzwerte und deren Ermittlung unterscheiden sich in den verschiedenen Regionen der Erde stark. So werden in Europa, Japan und den USA verschiedene Prüfzyklen zur Ermittlung der Emissionen herangezogen (s. Kapitel 10). In der Diskussion ist jetzt allerdings eine Vereinheitlichung

mit dem WLTP (worldwide harmonized light duty vehicle test procedure).

Lärm

Das Außengeräusch von Kraftfahrzeugen ist begrenzt, schon in den 50er-Jahren des letzten Jahrhunderts gab es erste Vorschriften. Im Jahr 1995 wurde der Grenzwert für das Vorbeifahrgeräusch eines Pkws auf 94 dB(A) festgelegt, weitere Reduktionen werden folgen. Bei vielen Fahrzeugen dominieren heute ab einer gewissen Geschwindigkeit jedoch Wind- und Abrollgeräusche.

2.3.2 Kraftstoffe

Die verwendeten Kraftstoffe werden nach ihrer Herkunft in fossil oder nicht fossil unterschieden.

Fossile Kraftstoffe

Die Verfügbarkeit der fossilen Energieträger ist eine seit Jahrzehnten diskutierte Frage. Auffällig bei den Antworten ist, dass die Zeitspanne der Verfügbarkeit nahezu konstant bleibt. Neu entdeckte Vorräte, bessere Fördermethoden, höhere Preise für Rohöl und damit die Möglichkeit der Erschließung früher unwirtschaftlicher Quellen, die sinkenden Kraftstoffverbräuche und Optimierung der Raffinerieprozesse führen zu einer Streckung dieses Zeitraumes. Dagegen spricht die zunehmende Motorisierung, besonders in den wirtschaftlich aufstrebenden Ländern. Sicher ist jedoch die Endlichkeit der Vorräte, sodass die Entwicklung von Alternativen immer dringlicher wird.

Alternative Kraftstoffe

In dieser Kategorie sind Kraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, aber auch Wasserstoff zu nennen. So nehmen z. B. Alkohol, Biodiesel und verflüssigtes Gas einen wachsenden Anteil als Kraftstoff

ein. Diese Entwicklung ist hilfreich, um die fossilen Energieträger zu strecken, jedoch gibt es heute noch kein Verfahren, das die fossilen Energieträger völlig ersetzt.

2.4 Zukunftsaussichten

Zukünftig müssen die **Otto-** und **Dieselmotoren** noch weiter optimiert werden. Das Potenzial der möglichen Verbrauchsreduktion in den nächsten 15 Jahren wird mit etwa 30% angegeben [3].

Der Grad der Elektrifizierung wird in den nächsten Jahren deutlich steigen, denn die **Hybridtechnologie** - von Start-Stop bis zum Fullhybrid - zeigt einen Weg zur weiteren Kraftstoffeinsparung. Ein reiner Elektroantrieb wird in den nächsten Jahren, außer im innerstädtischen Bereich, bedingt durch die Schwierigkeit in der Speichertechnologie, noch keine große Bedeutung erlangen können. Auch die **Brennstoffzellenantriebe** werden sich in den nächsten Jahren noch nicht in großem Maße durchsetzen. Der Versuch einer Prognose für den deutschen Markt wird im Folgenden dargestellt. Bild 2.5 zeigt die Motorisierung der Pkw-Neuzulassungen für das Jahr 2010. Etwa 1% dieser Fahrzeuge hat keinen reinen Benzin- oder Dieselantrieb.

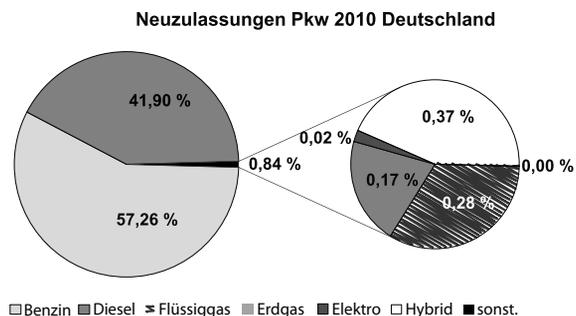


Bild 2.5 Pkw-Neuzulassungen im Jahr 2010, geordnet nach dem verwendeten Kraftstoff [VDA]

Tabelle 2.2 Entwicklung alternativer Antriebskonzepte

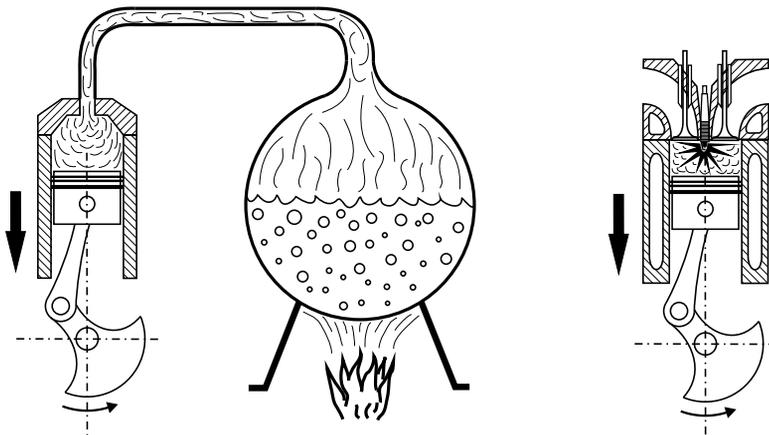
Motorentyp	Anteil 2010	Anteil 2030	
		Vorsichtige Prognose	Optimistische Prognose
Gasmotoren	0,45	5,0	10,0
Elektromotoren	0,02	0,5	2,0
Wasserstoff direkt	0,00	0,00	0,00
Brennstoffzelle	0,00	0,01	0,1
Hybrid (alle)	0,37	10,0	18,0
Summe	0,84	15,51	30,1

Wie werden sich diese Anteile bis zum Jahr 2030 verändern? Ausgehend von dem Bestand der Pkws 2010 mit alternativen Antriebsquellen, wird der Anteil im Jahr 2030 in zwei Szenarien abgeschätzt (Tabelle 2.2).

Hieraus ergibt sich, dass auch am Ende des Vorhersagezeitraumes noch ein sehr großer Anteil der Fahrzeuge mit ausschließlich verbrennungsmotorischem Antrieb ausgestattet ist. Dies dokumentiert die zukünftige Dominanz der Verbrennungsmotoren als Antriebsquelle für Kraftfahrzeuge.

2.5 Einteilung der Verbrennungsmotoren

Die Beschreibung der Verbrennungsmotoren nach einzelnen Kriterien ermöglicht einen Gesamtüberblick über die Spannbreite der Motoren. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge sind die Möglichkeiten der Unterscheidung vielfältig [4], [5]. Die wichtigsten werden im Folgenden wiedergegeben.



Äußere Verbrennung

Innere Verbrennung

Bild 2.6 Kontinuierliche und intermittierende Verbrennung

Prozesse

Je nach Art des Prozesses unterscheidet man zwischen geschlossenen und offenen Prozessen.

Beim **geschlossenen Prozess** ändert sich das Arbeitsfluid nicht, und die Verbrennung erfolgt kontinuierlich außerhalb des Arbeitsraumes (Bild 2.6). Bezüglich der Abgas- und Geräuschemission ist dieser Prozess günstig. Beispiele sind: Dampfmotor, Stirlingmotor.

Beim **offenen Prozess** ist das Arbeitsfluid das verdrängende Kraftstoff-Luft-Gemisch. Es muss nach der Arbeitsleistung erneuert werden. Die intermittierende Verbrennung ist typisch für offene Kolbenprozesse. Da die hohen Temperaturen des Mediums nur kurzzeitig auftreten, lassen sich die thermischen Belastungen der Bauteile in Grenzen halten. Bei diesen Prozessen ergeben sich Zündungs-, Verbrennungs- und Emissionsprobleme.

Arbeitsverfahren

Beim Arbeitsverfahren wird zwischen dem Vier- und Zweitaktverfahren unterschieden.

Beim **Viertaktverfahren** wird die Volumenänderung des Arbeitsraumes abwechselnd zur Arbeitsleistung und zum Ladungswechsel herangezogen. Bei Hubkolbenmotoren erfolgt die Steuerung in

der Regel durch **Ein- und Auslassventile**. Ein vollständiges Arbeitsspiel umfasst vier Takte:

1. Ansaugen,
2. Verdichten,
3. Expandieren,
4. Ausschieben.

Die Takte 2 und 3 werden **Arbeitstakte** und die Takte 1 und 4 **Ladungswechsellakte** genannt. Das Bild 2.7 zeigt schematisch einen Zylinder, in dem sich der Kolben zwischen den Umkehrpunkten hin und her bewegt. In der rechten Bildhälfte ist der Druckverlauf über der Zeit, in Grad Kurbelwinkel, dargestellt. Beginnend beim Gaswechsel im OT ergibt sich beim Ansaugen ein Unterdruck. Im Verdichtungstakt steigt der Druck zunächst langsam an, um nach der Zündung vor dem oberen Totpunkt stark anzusteigen. Der Expansion im dritten Takt folgt das Ausschieben im vierten Takt bei leichtem Überdruck. Das **Druck-Volumen-Diagramm** bezieht den Druckverlauf auf das Zylindervolumen und wird zur thermodynamischen Bewertung benötigt. Form und Größe der Druckschleifen hängen von der Führung des Arbeitsprozesses und von dem Lastzustand des Motors ab.

Beim **Zweitaktverfahren** erfolgt der Ladungswechsel zwischen den Arbeitstakten durch Ausspülen der Abgase mit Frischladung. Die Steuerung er-

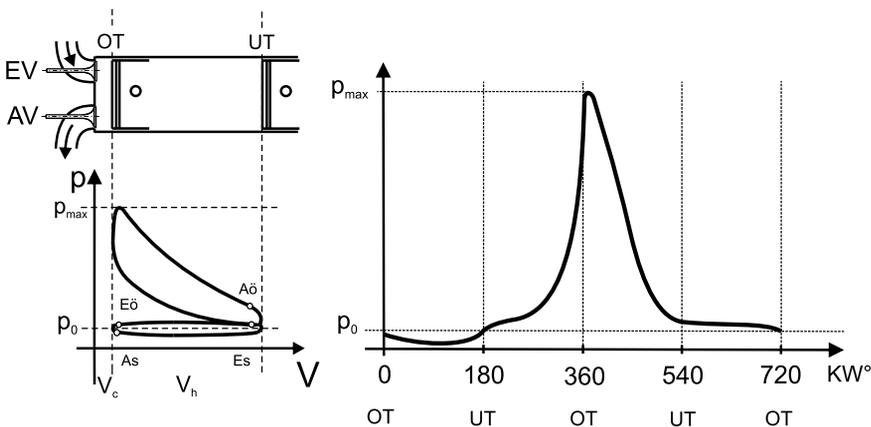


Bild 2.7 Schema des Viertaktprozesses. OT Oberer Totpunkt, UT Unterer Totpunkt, α Kurbelwinkel, gezählt vom Gaswechsel OT aufwärts, V_h Hubvolumen, V_c Kompressionsvolumen, $E_{\dot{o}}$ Einlass öffnet, E_s Einlass schließt, $A_{\dot{o}}$ Auslass öffnet, A_s Auslass schließt

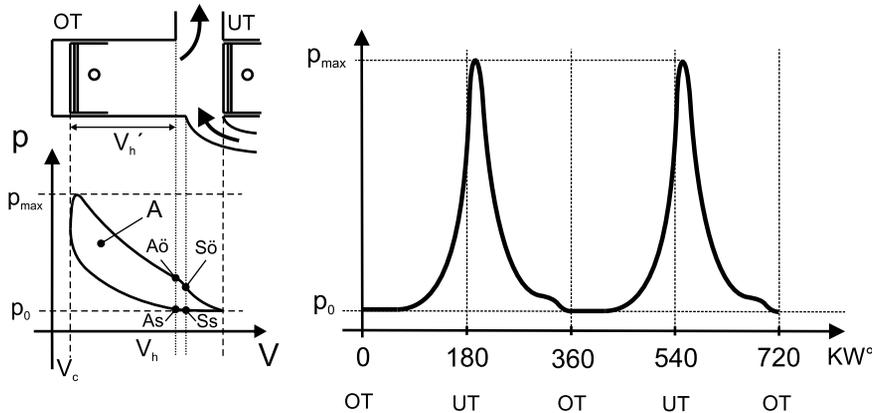


Bild 2.8 Schema des Zweitaktprozesses (S δ : Spülschlitze öffnet, Ss: Spülschlitze schließt)

folgt bei kleineren Motoren meist durch Ein- und Auslassschlitze im Zylinder, sodass für die Verdichtung und Expansion nicht der volle Hub genutzt werden kann. Es ist kein Ventiltrieb nötig, aber ein **Spülluftgebläse** für den Ladungswechsel. Ein Arbeitsspiel umfasst die zwei Arbeitstakte (Bild 2.8):

1. Verdichten,
2. Expandieren.

Gemischbildung

Bezüglich der Gemischbildung kann nach der Art der Gemischbildung unterschieden werden:

- Bei der **äußeren Gemischbildung** wird das Kraftstoff-Luft-Gemisch im Einlasssystem gebildet.
- Bei der **inneren Gemischbildung** erfolgt das Zusammenführen der Luft mit dem Kraftstoff im Arbeitsraum.

Es kann auch nach der Qualität der Gemischbildung unterschieden werden:

- Bei der **homogenen Gemischbildung** bildet sich das Gemisch im Ansaugsystem oder im Arbeitsraum während des Ansaugens.
- Bei der **inhomogenen Gemischbildung** erfolgt die Einspritzung in einem sehr kurzen Zeitintervall während des Verdichtungstaktes (Dieselmotor, Ottomotor mit Ladungsschichtung).

Außerdem kann nach dem Ort der Gemischbildung unterschieden werden:

- **Saugrohreinspritzung** (Ottomotoren),
- **direkte Einspritzung** in den Arbeitsraum (Diesel- und Ottomotoren),
- **indirekte Einspritzung** in einen Nebenraum (Vorkammer- und Wirbelkammer-Dieselmotoren).

Leistungsregelung

Die Art der Leistungsregelung kann nach Qualitäts- und Quantitätsregelung unterschieden werden.

- Bei der **Qualitätsregelung** wird das Mischungsverhältnis aus Kraftstoff und Luft geändert, die Masse des Arbeitsfluids pro Arbeitsspiel bleibt näherungsweise konstant (Gemischregelung, Dieselmotor)
- Bei der **Quantitätsregelung** ändert sich die pro Arbeitsspiel eingesetzte Masse des Arbeitsfluids (Mengenregelung). Dabei bleibt die Zusammensetzung des Gemisches nahezu unverändert (Drosselregelung, Ottomotor).

Die Anforderung an die Güte der Gemischbildung lässt sich gut an dem Volumenverhältnis von Luft und Kraftstoff erkennen. Bei einem **stöchiometrischen Gemisch** werden in etwa 15 kg Luft mit 1 kg

in der Art auszunutzen, dass in einigen Lastpunkten die Füllung deutlich verbessert wird.

- Bei **aufgeladenen Motoren** führt die Erhöhung der Ladungsdichte vor dem Motor zu einer Erhöhung der Motorleistung. Bei der Aufladung werden die **mechanische Aufladung** (Verdichter wird direkt vom Motor angetrieben) und die **Abgasturboaufladung** (eine vom Motorabgas beaufschlagte Turbine treibt den Verdichter an) unterschieden (Bild 2.10).

Kühlung

Die Verbrennungsmotoren werden zum Schutz der Bauteile vor Überhitzungen und des Schmieröls gekühlt. Man unterscheidet **direkte** und **indirekte Motorkühlung** (Bild 2.11).

- Bei der **Luftkühlung** (direkte Kühlung) wird die Umgebungsluft direkt über die verrippte Oberfläche des Motors geführt.
- Bei der **Flüssigkeitskühlung** (indirekte Kühlung) gibt der Motor die Wärme an das Kühlmittel (meistens Wasser, selten Öl) als Zwischenträger ab. Die Wärmeabfuhr an die Umgebung erfolgt über Wärmeübertrager. Die gleichmäßigere Temperaturverteilung im Zylinder und der

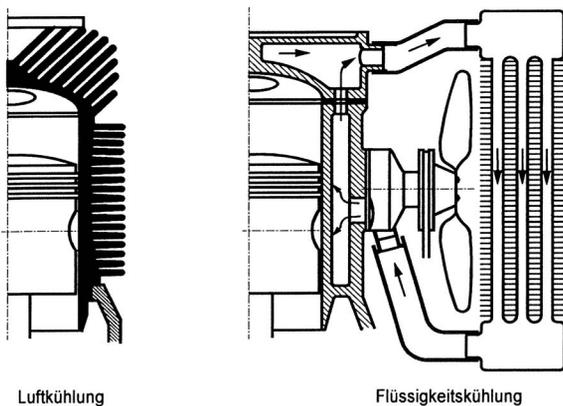


Bild 2.11 Luft- und Wasserkühlung [4]

bessere Wärmeübergang bieten thermische Vorteile. Zusätzlich ergeben sich durch die doppelten Wandungen akustische Vorteile.

Bauformen

Viele unterschiedliche Bauformen sind in der Entwicklung der Motoren untersucht und ausgeführt worden. Besonderer Aufwand wurde bei Motoren getrieben, bei denen es galt, möglichst viel Hubraum auf engem Raum unterzubringen, wie zum Beispiel bei Sternmotoren für Flugzeuge oder bei Dreieck- oder Deltamotoren in U-Booten.

Bei den heute eingesetzten Motoren sind die Zylinder entweder **in Reihe**, in **V-Form** oder gegenüberliegend als **Boxermotor** angeordnet. Eine Ausnahme hiervon bildet ein V-Motor mit geringem V-Winkel (V-Winkel = 15°), der als **VR-Motor** bezeichnet wird. Der W-Motor (Volkswagen) ergibt sich aus zwei VR-Motoren. Eine Übersicht der Anordnungen ist in Bild 2.12 wiedergegeben.

Diese Einteilung zeigt also schon einen Gesamtüberblick der Probleme der Verbrennungsmotoren, deren genauere Betrachtung und Analyse Inhalt der folgenden Kapitel ist.

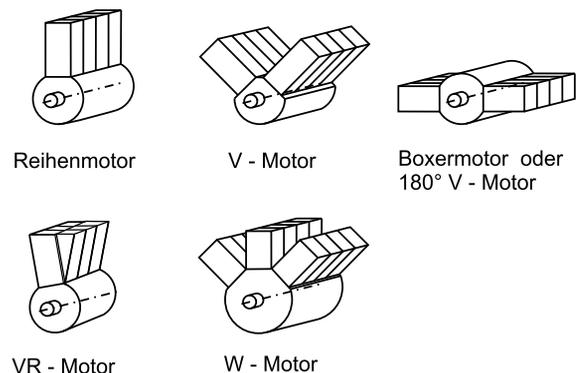


Bild 2.12 Zylinderanordnungen

3

Thermodynamische Grundlagen

Zur energetischen Betrachtung des Verbrennungsprozesses ist es notwendig, die **Thermodynamik** des Prozesses zu beschreiben. Der motorische Arbeitsprozess soll die mit dem Brennstoff zugeführte Energie zu einem möglichst großen Anteil in mechanische Arbeit umwandeln. Der tatsächlich erreichbare Wirkungsgrad ist stark vom Ablauf des thermodynamischen Prozesses abhängig. Die Umwandlungsprozesse sind sehr komplex, insbesondere der **Verbrennungsvorgang**, aber auch die Vorgänge bei der **Wärmeübertragung** an die Brennraumwände, auf die angrenzenden Motorenbauteile und das Kühlmedium. Diese Vorgänge lassen sich nur mit großem Aufwand erfassen und mit detaillierten Prozessberechnungen darstellen. In der hier vorliegenden Betrachtung wird aber vor allem den Kenntnissen über die Zusammenhänge der Prozesse besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Zur qualitativen Analyse sind keine detaillierten Prozessrechnungen erforderlich. Einfache **Modellvorstellungen** (Kreisprozesse) lassen bereits mit einem Minimum an rechnerischem Aufwand grundsätzlich Einflüsse auf den Prozesswirkungsgrad erkennen.

3.1 Kreisprozesse

Mithilfe von vereinfachten Modellvorstellungen eines **geschlossenen Wärmekraftprozesses** können grundsätzliche Aussagen über eine möglichst günstige Führung des Motor-Kreisprozesses hin-

sichtlich eines guten Wirkungsgrades getroffen werden.

Kreisprozesse setzen sich aus aufeinanderfolgenden Zustandsänderungen eines Arbeitsmittels zusammen. Bei geschlossenen Kreisprozessen werden die Bedingungen wieder auf den Anfangszustand zurückgeführt.

Dies wird durch die folgenden Vereinfachungen bei Verbrennungskraftmaschinen erreicht:

- Die stoffliche Umwandlung bei der Verbrennung wird vernachlässigt.
- Die Temperaturerhöhung erfolgt durch Wärmezufuhr.
- Die Wärmeabfuhr führt den Prozess zum Ausgangspunkt zurück.
- Wärmezufuhr und -abfuhr stellen den „Ersatz“ für den Ladungswechsel dar.

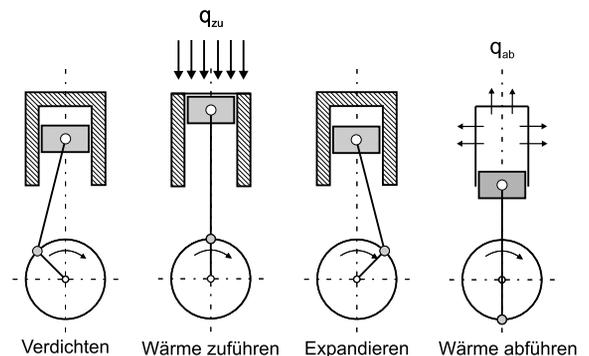


Bild 3.1 Kreisprozess eines Hubkolbenmotors

Als Prozesswirkungsgrad wird der **thermische Wirkungsgrad** η_{th} definiert. Dieser ist das Verhältnis der am Kolben geleisteten Arbeit, bezogen auf die zugeführte Wärme:

$$\eta_{\text{th}} = \frac{W_{\text{KA}}}{q_{\text{zu}}} = \frac{q_{\text{zu}} - q_{\text{ab}}}{q_{\text{zu}}} = 1 - \frac{q_{\text{ab}}}{q_{\text{zu}}} \quad (3.1)$$

Die am Kolben geleistete spezifische Arbeit w_{KA} entspricht der von den Prozesslinien des p, V -Diagramms eingeschlossenen Fläche (s. Bild 3.2).

3.1.1 Carnot-Prozess

Der Carnot-Prozess wird als **idealer Wärmekraftprozess** bezeichnet, da er der effektivste ist, der eine Wärmekraftmaschine beschreibt, denn bei einem gegebenen Temperaturverhältnis wird der höchste Wirkungsgrad erreicht. Er nimmt ausschließlich bei Prozesshöchsttemperatur Wärme auf, bei Prozessstiefsttemperatur gibt er Wärme ab.

Die Zustandsänderungen sind:

- isentrope Verdichtung (1 - 2),
- isotherme Expansion (Wärmezufuhr) (2 - 3),
- isentrope Expansion (3 - 4),
- isotherme Verdichtung (Wärmeabfuhr) (4 - 1).

Der **thermische Wirkungsgrad** ergibt sich zu:

$$\eta_{\text{th}} = 1 - \frac{q_{\text{ab}}}{q_{\text{zu}}} = 1 - \frac{T_1(s_1 - s_4)}{T_2(s_2 - s_3)} \quad (3.2)$$

Da die Entropiedifferenz bei der Wärmezufuhr und -abfuhr (isentrop) konstant ist, wird:

$$\eta_{\text{th}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (3.3)$$

Bei den in einer Verbrennungskraftmaschine herrschenden Temperaturen ergibt sich ein maximaler Wirkungsgrad von über 70%. Diese Zahl verdeutlicht, wie hoch der Wirkungsgrad in diesen Maschinen theoretisch steigen könnte. Der Prozess ist allerdings im Verbrennungsmotor mit einem guten Wirkungsgrad praktisch nicht durchführbar, denn das Druckverhältnis p_2/p_4 und das dazugehörige Verdichtungsverhältnis sind aus mechanischen Gründen nicht realisierbar. Weiterhin ist die Warmfestigkeit der Werkstoffe nicht ausreichend, wenn T_2 sehr hoch ist. Eine hohe Temperatur ist jedoch für einen guten Wirkungsgrad nötig. *Nikolaus Otto* scheiterte an diesen Problemen, als er seinen ersten Verbrennungsmotor betrieb, da die Leistungsabgabe seines Motors sehr klein war.

Es wird deutlich, dass für die Führung des Motorprozesses nicht nur rein thermodynamische Gesichtspunkte wichtig sind. Es ist derjenige Mo-

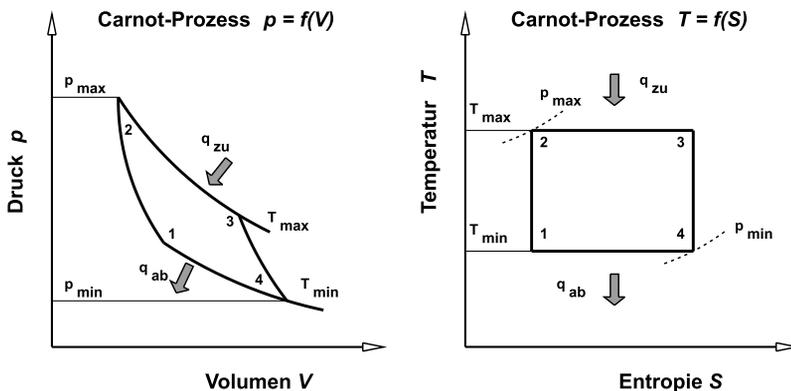


Bild 3.2 Zustandsänderungen im Carnot-Prozess