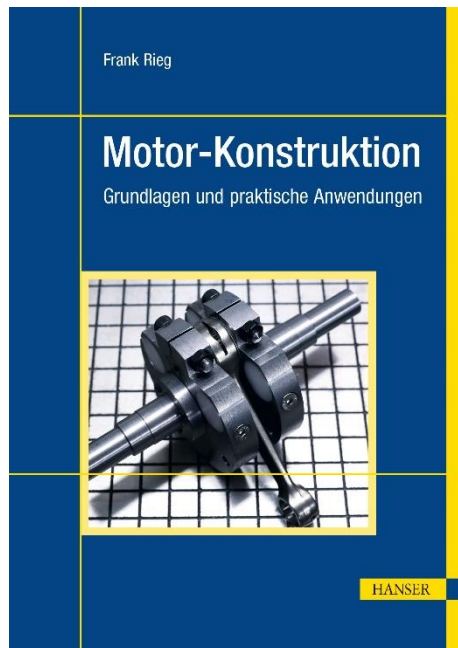


HANSER



Leseprobe

zu

Motor-Konstruktion

von Frank Rieg

Print-ISBN: 978-3-446-48204-3

E-Book-ISBN: 978-3-446-48209-8

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446482043>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Inhalt

Vorwort	IX
1 Verbrennungsmotoren	1
1.1 Von der Dampfmaschine zum Verbrennungsmotor	1
1.2 Die Funktion eines Viertaktmotors	12
1.3 Die Funktion eines Zweitaktmotors	21
1.4 Der Wankelmotor	26
1.5 Verbrennungsmotoren für Flugzeug-, Schiffs- und Automodelle	29
1.6 Im Motorenbau ist nichts wirklich neu	34
1.7 Schiebermotoren – Alternative zu Tellerventilen?	38
1.8 Patente – sinnvoll oder nicht?	42
2 Basisgrößen und Grundausslegung	45
2.1 Grundlegende Formeln und Sachverhalte	45
2.2 Weitere Aspekte der Grundausslegung	51
3 Kurbelgehäuse, Zylinder und Kolben	55
3.1 Kurbelgehäuse	55
3.2 Zylinder	61
3.3 Kolben	73
4 Kurbelwelle und Pleuel	85
4.1 Die Kurbelwelle	85
4.2 Die Pleuelstange	92
4.3 Kräfte am Kurbeltrieb	94
4.4 Massenausgleich am Einzylinder	102
4.5 Kräfte und Momente I. und II. Ordnung	108
4.6 Massenausgleich am Mehrzylinder	114
4.7 Zylinderanordnungen	118
4.8 Radial- und Tangentialkräfte am Kurbeltrieb	126

5	Lager, Dichtungen und Schmierung	133
5.1	Kurbelwellen- und Pleuellager	133
5.1.1	Wälzlager	133
5.1.2	Passungen	157
5.1.3	Gleitlager	159
5.2	Radialwellendichtungen	172
5.3	Das Schmiersystem	180
5.3.1	Öle	180
5.3.2	Ölpumpen und Ölkreislauf	187
6	Besonderheiten bei Viertaktern	193
6.1	Zylinderkopf und Ventile	193
6.1.1	Der Zylinderkopf	193
6.1.2	Die Ventile	210
6.2	Die Nockenwelle	220
6.2.1	Grundsätzliches zur Nockenwelle	220
6.2.2	Nockenformen und Nockenfolger	222
6.2.3	Berechnung ruckfreier Nocken nach KURZ/BENSINGER	227
6.2.4	Der Selbstbau von Nockenwellen	234
7	Besonderheiten von Zweitaktern	245
8	Zündanlagen	255
8.1	Batteriezünder	257
8.2	Magnetzünder	267
8.3	Zündkerzen	272
9	Vergaser und Kraftstoffe	279
9.1	Vergaser	279
9.1.1	Das Grundprinzip	279
9.1.2	Einfache Schiebervergaser	282
9.1.3	Gleichdruck- bzw. Unterdruck-Vergaser	290
9.1.4	PKW-Vergaser	292
9.2	Kraftstoffe	295
10	Anlassen	301

11	Selbstbau von einfachen Vier- und Zweitaktern	307
11.1	Selbstbau von Kurbelwelle und Pleuel	308
11.1.1	Das grundsätzliche Vorgehen	308
11.1.2	Hirth-Verzahnungen	328
11.1.3	Press- und Klemmverbände	333
11.2	Selbstbau eines Einzylinder-Viertakters	340
11.3	Selbstbau eines Einzylinder-Zweitakters	349
12	Videos	363
	Literatur und Bildquellen	367
	Stichwortverzeichnis	381



Vorwort

Motoren, genauer Verbrennungsmotoren, gehören zu den faszinierendsten Maschinen, die der Mensch erfunden hat, und Motoren begeistern nach wie vor sehr viele Menschen, nicht nur die wachsende Schar von Oldtimerfans. Der Beiratsvorsitzende eines weltbekannten deutschen Industrieunternehmens sagt dazu: „Vom Emotionalen her ist dem Verbrennungsmotor nichts gewachsen. Das ist einfach so.“¹ Egal, was ideologiegetriebene Politiker in Berlin und Brüssel verbieten wollen – der Verbrennungsmotor wird niemals sterben! Es ist nicht ausgeschlossen, dass er mit klimaneutralen E-Fuels sogar eine Renaissance erleben wird.

Dieses Buch ist aus meiner über viele Jahre gehaltenen gleichnamigen Vorlesung entstanden. Daher sind als Leser Studierende des Maschinenbaus adressiert, aber auch interessierte Motoren- und Oldtimerfans werden aus dem Buch Nutzen ziehen können. Letzterer Leserkreis möge die manchmal vorkommenden Formeln überspringen. Ich werde mich auf die mechanische Konstruktion von Verbrennungsmotoren beschränken und die Thermodynamik samt der Gemischbildung außen vor lassen; darüber gibt es mehr als genug Literatur. Doch über die eigentliche mechanische Konstruktion gibt es wenig praxis-brauchbares Schrifttum; dabei ist sie viel spannender, weil man die hier gewonnenen Kenntnisse auf viele andere technische Dinge übertragen kann – von Pumpen und Kompressoren bis zu Wärmepumpen.

Sie werden daher nicht nur das Wesentliche über die Funktion von Motoren und ihrer Komponenten erfahren, sondern auch Verbesserungen und Eigenanfertigungen von manchen Bauteilen sehen. Gerade für angehende Ingenieure ist Werkstatt-Praxis wirklich wichtig. Alle von mir beschriebenen Eigenkonstruktionen wurden von mir in meiner privaten Keller-Werkstatt angefertigt und später in einem Versuchslabor des Lehrstuhls Konstruktionslehre und CAD der Universität Bayreuth getestet und erprobt. Um diese Dinge anzufertigen, sind nur eine konventionelle Drehmaschine, eine konventionelle Fräsmaschine sowie ein Schweißgerät erforderlich – damit ist jede bessere Institutswerkstatt oder Werkstatt einer Fachhochschule ausgestattet. Aber auch jeder Motoren- und Oldtimerfan kann sie in seiner privaten Hobbywerkstatt mit den o. g. Werkzeugmaschinen nachbauen.

An Verbrennungsmotoren betrachte ich hauptsächlich Ottomotoren, wobei die mechanischen Grundlagen selbstverständlich auch für Dieselmotoren gelten. Ergänzend, um das Gesamtbild besser zu verstehen, beschreibe ich Vergaser (Kapitel 9) und einfache

¹ Frankfurter Allgemeine Zeitung, 6.4.2024, S. 24

Zündanlagen (Kapitel 8), wie sie früher üblich waren. Diese fast historischen Motor-Zusatzkomponenten haben den Charme, dass sie eben leicht zu verstehen sind. Die eigentlich sehr wertvollen Elektronikthemen wie computergesteuertes Motormanagement müssen aus Platzgründen außen vor bleiben.

Es wird Ihnen auffallen, dass der Text in der Ich-Form geschrieben ist. Ich bin bewusst von der hölzernen Wissenschaftsschreibweise, die ich sowieso noch nie mochte, abgewichen. Es soll ein modernes, frisches Buch sein; daher habe ich auch eine Menge Bilder von meinen früheren Fahrzeugen und Erlebnisse eingebaut, die das Gesagte bekräftigen. Eigene Erfahrungen – bei mir sind es 40 Jahre Berufserfahrung in der Antriebstechnik – sind allemal besser als Buchweisheiten! Eine Reihe von mir gedrehter Videos ergänzt den Text. Eine Übersicht aller Videos mit direkter Verlinkung finden Sie in Kapitel 12.

Mein Freund und Kollege Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer sah das ganze Buch kritisch durch und las Korrektur; speziell die Formeln und Zahlenrechnungen kontrollierte Dr.-Ing. Florian Hüter. Frau Manuela Lackner unterstützte mich bei redaktionellen Arbeiten, Meister Manfred Gramß und Herr Michael Rupprecht führten mit mir die Prüfstandsaufbauten und Motortests durch. Ihnen allen sei sehr herzlich gedankt. Ferner danke ich folgenden Firmen für die Überlassung bzw. Abdruckgenehmigung von Bildmaterial: Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Robert Bosch GmbH, AUDI AG, KS Gleitlager GmbH, Freudenberg Sealing Technologies GmbH, BMW AG, Rheinmetall AG und Verlag Kleine Vennekate.

Bayreuth, Juni 2024

Frank Rieg

■ 1.1 Von der Dampfmaschine zum Verbrennungsmotor

Lassen Sie mich kurz die geschichtliche Entwicklung hin zum Verbrennungsmotor skizzieren, weil das einiges zum Verständnis beiträgt: Zu den *Wärme kraftmaschinen* gehören die Dampfmaschinen, die Dampf- und Gasturbinen sowie die Verbrennungsmotoren. Alle setzen Wärmeenergie in Form von heißen Gasen in mechanische Energie um. Beginnen wir mit der Dampfmaschine:

Die ersten Dampfmaschinen wurden im 18. Jahrhundert in England entwickelt, um die Kohlegruben zu entwässern. Es gab Vorläufer, aber die Dampfmaschine des Engländers THOMAS NEWCOMEN setzte sich einigermaßen durch, obwohl ihr Wirkungsgrad bei lächerlichen 0,5 bis 1 % lag, das heißt, 99 % der Wärmeenergie gingen vollkommen nutzlos verloren. Man sagte damals, dass man, um ein Kohlebergwerk mit der Newcomen-Dampfmaschine zu entwässern, ein weiteres Kohlebergwerk bräuchte, um die Newcomen-Dampfmaschine überhaupt zu betreiben! Woran lag das? Betrachten Sie dazu [Bild 1.1](#): Der Dampf aus dem Kessel A wurde in den Zylinder B geleitet, und dieser Dampf schob den Kolben P nach oben. Gleichzeitig sorgte der Waagebalken oder *Balancier* dafür, dass der Pumpenkolben auf der linken Seite nach unten ging. Nun wurde der Dampf abgestellt und das Ventil V' geöffnet: Kaltes Wasser strömte in den Zylinder, der Dampf kondensierte und dadurch bildete sich ein Unterdruck. Da der äußere Luftdruck jetzt größer war als der Unterdruck im Dampfzylinder, drückte nun der äußere Luftdruck (deswegen ist der Dampfzylinder oben offen!) den Kolben nach unten, und es wurde Arbeit geleistet: Der Pumpenkolben wurde nach oben gezogen und das Wasser aus dem Bergwerk abgepumpt. Dies ließ dem jungen Schotten JAMES WATT aus armem Elternhaus, der als Instrumenten-Mechaniker in der Universität von Glasgow arbeitete, keine Ruhe, nachdem er ein Modell einer Newcomen-Maschine reparieren sollte. Und jetzt kommt etwas, was heutzutage wohl undenkbar wäre: Um die Schriften OTTO VON GUERICKE zu verstehen, lernte er Deutsch! In dem Industriellen MATTHEW BOULTON fand er einen Partner, der die Finanzierung des Baus der neuartigen Maschine übernahm, und es wurde die Firma BOULTON & WATT gegründet. Bei dieser ersten, 1776 hergestellten, Maschine [\[99\]](#) fällt auf, dass keine Kurbel verwendet wird, um die Schwingbewegung des Balanciers in eine Drehbewegung umzu-

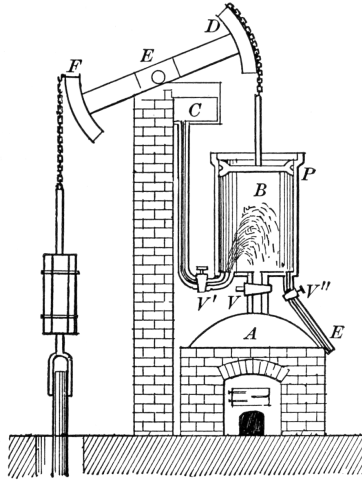


Bild 1.1 Eine Newcomen-Dampfmaschine [98]

setzen, sondern ein Planetengetriebe mit zwei Zahnrädern¹, weil die Kurbelwelle für irgendwen patentiert war. Jahrelang hatte er große Probleme, hinreichend genau hergestellte Dampfzylinder zu bekommen. Beachten Sie ferner, dass es Stahl im heutigen Sinne zu dieser Zeit ebenfalls noch nicht gab. Der Engländer HENRY BESSEMER entwickelte das 1855 patentierte Bessemer-Verfahren, mit dem Stahl im großen Stil erzeugt werden konnte, wobei bereits 1862 ALFRED KRUPP dieses neuartige Verfahren in Deutschland einführte. Das funktioniert wie folgt: Das flüssige Roheisen, das aus dem Hochofen kommt, wird in einen Konverter, die Bessemer-Birne, gegeben und von unten wird Luft eingeblasen, welche die unerwünschten Eisenbegleiter verbrennt, Bild 1.2. Das Bessemer-Verfahren ist ein *Blasverfahren* für die Stahlherstellung.

Doch es geschieht noch mehr: Stahl ist eine „Mischung“ aus Eisen und Kohlenstoff, und durch das *Frischen*, wie der Blasvorgang heißt, wird der Kohlenstoffgehalt eingestellt, und zwar auf unter 2 %. Dann ist diese Eisen-Kohlenstoff-Verbindung knetbar, also umformbar durch Schmieden und Biegen, und wird *Stahl* genannt. Das Bessemer-Verfahren funktioniert aber nur bei phosphorarmen Erzen. Um andersartige Erze zu verarbeiten, entwickelte SIDNEY THOMAS das nach ihm benannte Verfahren, das dem Bessemer-Verfahren an und für sich nicht unähnlich ist. Das Thomas-Verfahren wurde bis etwa 1970 in Deutschland verwendet und durch das *Linz-Donawitz-Verfahren* ersetzt. Hier wird reiner Sauerstoff auf das flüssige Roheisen geblasen. Man kann sich vorstellen, dass bei diesen Blasprozessen jede Menge unguter Abgase entstehen, und noch schlimmer ist es bei der Roheisenherstellung, der Vorstufe der Stahlherstellung: Hier wird der *Hochofen* mit einer Mischung aus Eisenerz, Kalk und Koks² beschickt. Das saubere Elektrostahl-Verfahren, bei dem riesige Graphitelektroden mit ihren brennenden Lichtbögen bei Stromstärken bis zu 100.000 A das Stahlbad auf 3500 °C erhitzen, braucht dafür gigantische Strommengen. Die Stahlherstel-

¹ Was aber kinematisch auf dasselbe herauskommt

² Schon die Koksherstellung in der Kokerei ist nicht unbedingt umweltfreundlich. Andererseits fällt dort Kokereigas an, das frühere Stadtgas, das man vor dem Erdgas verwendete.

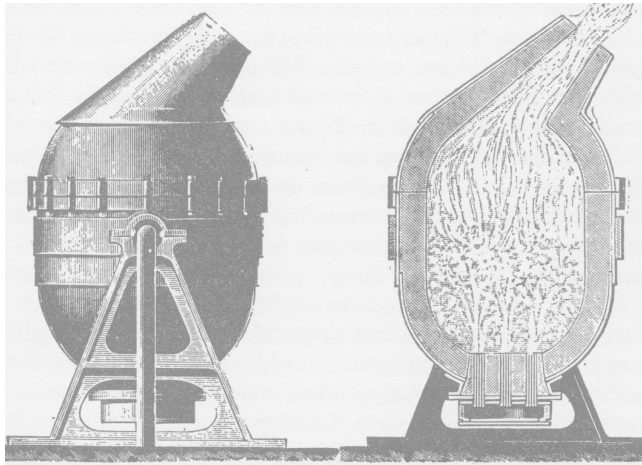


Bild 1.2 Eine Bessemer-Birne [1]

lung ist eben sehr energieintensiv, aber Stahl ist das mit Abstand wichtigste und meistverwendete Metall.

JAMES WATT stand für die Bauteile seiner Dampfmaschine nur Gusseisen³ und bestenfalls Puddelstahl und Schweißstahl zur Verfügung. Trotz allen Schwierigkeiten: Mit seiner Niederdruck-Dampfmaschine begann das industrielle Zeitalter, Bild 1.3. Bei der

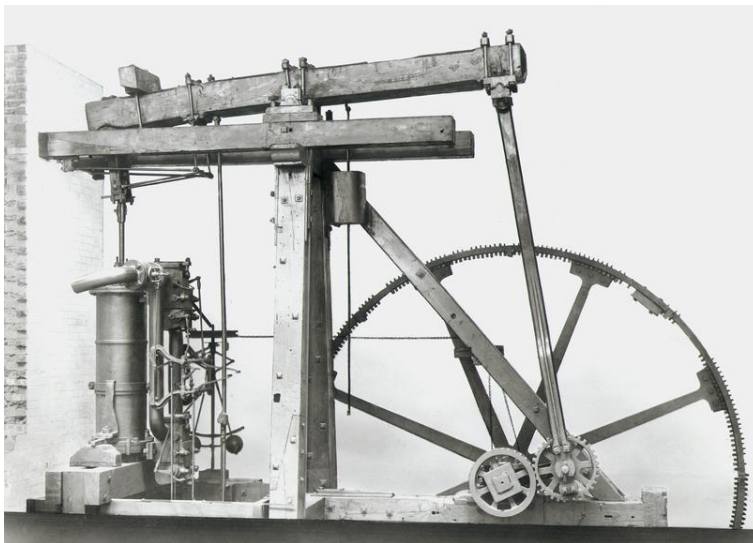


Bild 1.3 Eine Boulton & Watt-Dampfmaschine [99]

³ Gusseisen ist wie Stahl eine Eisen-Kohlenstoffverbindung, aber der Kohlenstoffgehalt ist deutlich höher als 2 %. Dadurch lässt sich Gusseisen sehr gut vergießen, aber es ist spröde und nicht schmiedbar. Gusseisen samt seiner Herstellung kennt man wohl seit dem 14. Jahrhundert.

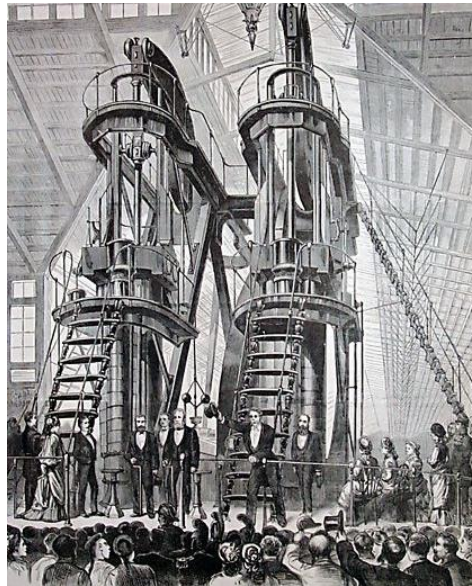


Bild 1.4 Eine Corliss-Dampfmaschine [100] mit 1400 PS bei 36 U/min. Der berühmte amerikanische Präsident ULYSSES S. GRANT und KAISER PEDRO II. VON BRASILIEN starteten die riesige Maschine auf der Weltausstellung 1876 in Philadelphia.

Watt'schen Dampfmaschine war der Wirkungsgrad etwa 3 %. In den nächsten Jahrzehnten wurde die Dampfmaschine ständig weiterentwickelt, **Bild 1.4**, und im 2. Weltkrieg bauten die Alliierten rund 2700 *Liberty-Schiffe*, **Bild 1.5**, die mit Dreifach-Verbund-Dampfmaschinen, **Bild 1.6**, von 2500 PS ausgestattet waren, die man relativ einfach und schnell bauen und reparieren konnte. Dagegen hatten bereits im 1. Weltkrieg die meisten der deutschen schweren Kreuzer und Schlachtschiffe der Kaiserlichen Marine *Parsons-Dampfturbinen*, **Bild 1.7**, so z. B. die SMS VON DER TANN⁴, **Bild 1.8**, mit vier Parsons-Turbinen. Heute werden moderne Schiffe fast ausnahmslos von langsam laufenden Zweitakt-Dieselmotoren angetrieben; mitunter werden gleich mehrere davon über Schiffsgetriebe miteinander gekoppelt, und moderne Kriegsschiffe haben zusätzlich noch ein oder zwei Gasturbinen, die bei Bedarf zugeschaltet werden. Ansonsten sind Gasturbinen Teil aller Strahltriebwerke für Flugzeuge. Man hat in der Vergangenheit Versuchsmuster von Personenautos⁵ gebaut, die von Gasturbinen angetrieben wurden. Dies war in der Euphorie der Nachkriegszeit entstanden, in der man dachte, alles mögliche mit Gasturbinen antreiben zu können, weil im 2. Weltkrieg die ersten brauchbaren Strahltriebwerke von BMW und Junkers für den ersten Strahl-Jagdbomber der Welt, die Messerschmidt Me262 „Schwalbe“, entwickelt wurden.

⁴ Die SMS VON DER TANN nahm als Teil der HOCHSEEFLOTTE an der Seeschlacht am Skagerrak gegen die britische GRAND FLEET teil. Diese Seeschlacht ging ziemlich unentschieden aus, obwohl die Briten weitaus mehr Schiffe und Geschütze mit größeren Kalibern zur Verfügung hatten. Aber die deutschen Entfernungs-messer und Kanonen waren wesentlich präziser und damit die Trefferrate der deutschen Schiffe höher.

⁵ In den 1950er-Jahren bauten die Firmen Rover und FIAT derartige Prototypen, während Norton ein Motorrad mit Dieselmotor vorstellte. Aus allen diesen Versuchsmustern ist niemals eine Serienfertigung entstanden.



Bild 1.5 Ein Liberty-Schiff, das waren sehr rationell gefertigte Frachtschiffe für die Geleitzüge der Alliierten. Rund 2700 Stück wurden im 2. Weltkrieg von US-Schiffswerften gebaut [103].

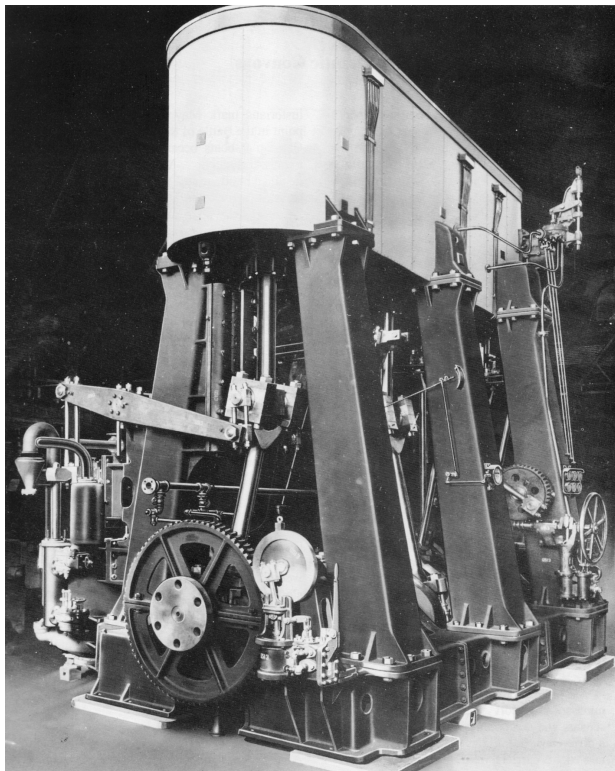


Bild 1.6 Die Dreifach-Verbund-Dampfmaschine eines Liberty-Schiffs, 140 t Gewicht, 2500 PS bei 76 U/min

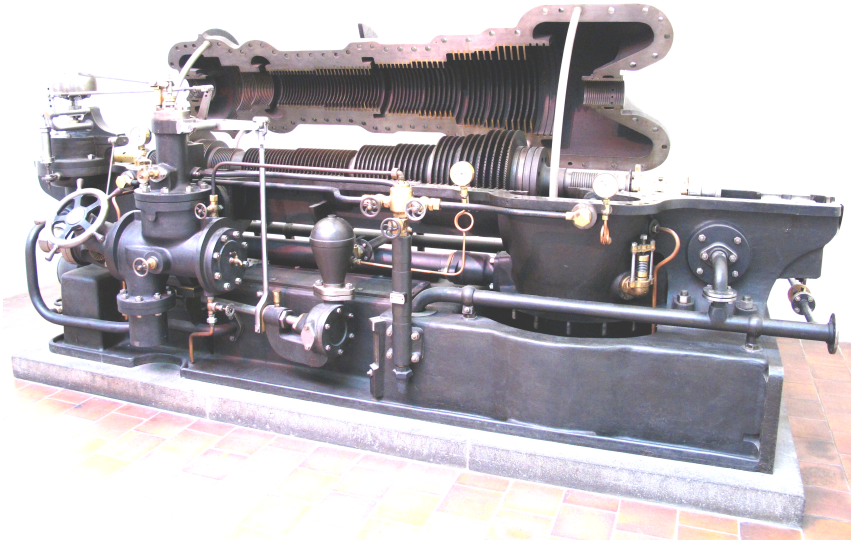


Bild 1.7 Eine frühe Parsons-Dampfturbine [101]

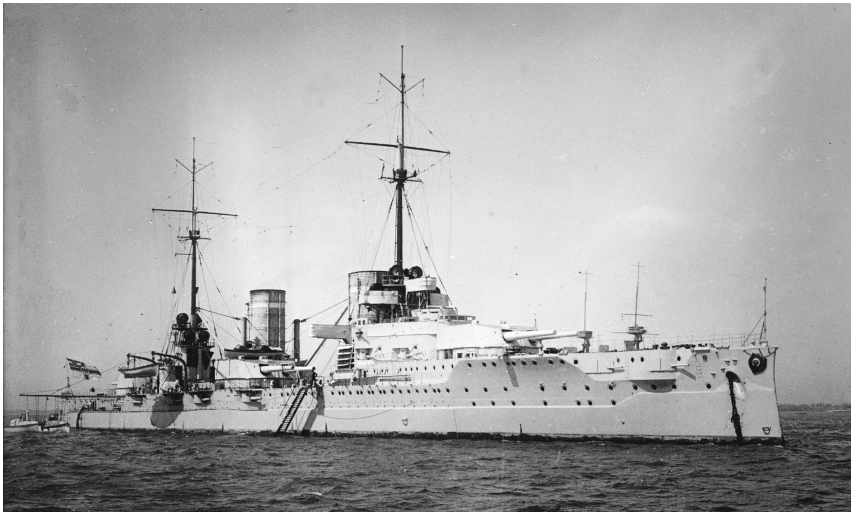


Bild 1.8 Der Schlachtkreuzer SMS VON DER TANN der Kaiserlichen Marine, 1911 in Dienst gestellt. Vier *Parsons-Dampfturbinen* mit zusammen 42.000 PS und 18 Dampfkesseln. 900 Mann Besatzung, Hauptbewaffnung acht Kanonen mit Kaliber 28 cm [105].

Strahltriebwerke haben den Vorteil von hoher Leistung auf kleinem Raum, aber die Nachteile, dass sie teuer, sehr anspruchsvoll in Bezug auf Material und Fertigung und äußerst durstig sind. Man kann sie zwar mit Kerosin, das ist eine Art Billig-Diesel, betreiben, aber für Landfahrzeuge ist das nichts. Erstaunlicherweise rüsten die Amerikaner ihren modernen Kampfpanzer M1 Abrams mit einer 1500-PS-Gasturbine aus, während der deutsche Leopard 2A6 mit einem 1500-PS-Dieselmotor⁶ ausgestattet ist.

Nochmal zurück zu den Wirkungsgraden: Bei Dampflokomotiven, Bild 1.10, die bis in die 1960er-Jahre auf manchen Nebenstrecken ganz regulär verkehrten, betrug der Wirkungsgrad wenig mehr als 10 %; dabei waren die Dampfdrücke etwa 15 bar. Benzinmotoren in heutigen Autos und Motorrädern haben Wirkungsgrade um 40 %, Dieselmotoren etwas mehr. Gas- und Dampfturbinen liegen bei etwa 40 %, wobei Dampfturbinen in Kohle- und Kernkraftwerken mit 200 bar Dampfdruck und auf über 500 °C hochüberhitztem Dampf betrieben werden. Die effizientesten Wärmekraftmaschinen, die man heute kennt, sind sehr große, langsam laufende Zweitakt-Dieselmotoren, wie sie in Schiffe eingebaut werden: Der Wirkungsgrad ist etwa 53 % [8]. Also selbst hier wird rund die Hälfte der Energie des Kraftstoffs ungenutzt in die Luft geblasen, und zwar in Form von Abgaswärme und Kühlungswärme. Aus Sicht des Ingenieurs ist das eigentlich eine Katastrophe – aber man hat bis heute nichts Besseres gefunden! Okay, große Elektromotoren mit 100.000 PS, wie sie in Pumpspeicher-Kraftwerken als Motoren und umgepolt als Generatoren eingesetzt werden, können Wirkungsgrade bis zu 98 % erreichen. Bei kleineren Elektromotoren ist der Wirkungsgrad deutlich schlechter, aber immer noch viel besser als bei ähnlich großen Wärmekraftmaschinen. Leider haben elektrische Maschinen einen Schönheitsfehler, und das ist bei mobilen Anwendungen die Speicherung der elektrischen Energie, Stichwort Batterien und deren Aufladen. Der riesige Vorteil aller Wärmekraftmaschinen ist eben, dass sie chemisch gebundene Energie in Form von Benzin, Wasserstoff, Propan- und Butangas, Dieselöl, Kerosin, Schweröl oder auch Kohle nutzen können: Das bedeutet enorme Energiemengen auf kleinstem Raum! Ein Beispiel gefällig? Ein größerer SUV fährt mit 80 l Diesel, also über den Daumen 80 kg Diesel, ca. 1000 km weit. Ein in der Größe vergleichbarer SUV desselben Herstellers braucht für 500 km einen Batteriesatz von 800 kg (Stand 2023). Wenn Sie bedenken, dass der allererste VW-Golf 800 kg wog, dann ist das Gewichtsverhältnis der Energiespeicher 1:20 zu Ungunsten des Batteriesatzes. Elektroautos sind keine Erfindung der Neuzeit, sondern an sich ein alter Hut: Schon 1899 fuhr der Belgier CAMILLE JENATZY mit seinem Elektrorennwagen „La Jamais Contente“⁷ einen Geschwindigkeitsrekord mit über 100 km/h, Bild 1.9. Die deutsche Automobilfabrik Hansa-Lloyd in Bremen baute bereits 1912 Elektrolastwagen [19], und im Berlin der 1920er- und 1930er-Jahre fuhren Tausende von Elektrolastwagen, u. a. für die Deutsche Reichspost.

Die meisten Dampfmaschinen wurden zum Antrieb von Maschinen in Fabriken eingesetzt: Eine zentrale Dampfmaschine trieb unter der Decke des Fabrikgebäudes hängende Transmissionswellen an, von denen Lederriemen zu den jeweiligen Maschinen gingen, Bild 1.11. Der Nachteil von Dampfmaschinen ist, dass man zusätzlich Dampfkessel braucht und die wiederum *Chauffeure*⁸ brauchten. Diese Dampfkessel flogen früher gerne in die Luft, und

⁶ Im 2. Weltkrieg hatten die angloamerikanischen und deutschen Panzer Benzinmotoren, während die Rote Armee bei ihrem phantastischen T-34 das einzig Richtige machte: Sie verwendete einen hervorragend konstruierten Dieselmotor mit Direkteinspritzung bei 500 PS und 12 Zylindern.

⁷ Französisch für „die nie Zufriedene“

⁸ Chauffeur ist das französische Wort für „Heizer“.



Bild 1.9 Der Elektrorennwagen *La Jamais Contente* fuhr bereits 1899 über 100 km/h.



Bild 1.10 Eine deutsche Dampflokomotive 41241 im Essener Hauptbahnhof in den 1980er-Jahren [102]: Bei Dampflokomotiven beträgt der Wirkungsgrad nur etwa 10 %!

daher gründete man in Deutschland den „Dampfkessel-Überwachungsverein“, den Vorläufer des heutigen TÜV.

Es war daher naheliegend, eine Kraftmaschine zu entwerfen, die ohne teure Nebenaggregate wie Dampfkessel auskommt, und der berühmte holländische Physiker CHRISTIAAN HUYGENS erfand 1673 einen Schießpulvermotor, [Bild 1.12](#). Dies war eine atmosphärische Maschine, in der eine Schießpulverladung einen Kolben nach oben trieb. Die anschließende Abkühlung der heißen Gase bewirkte einen Unterdruck im Zylinder, und der äußere Luftdruck drückte den Kolben nach unten, der seinerseits ein Gewicht anhub. Wir kennen dieses Prinzip bereits von der Newcomen-Dampfmaschine, und es wird uns gleich wieder begegnen.

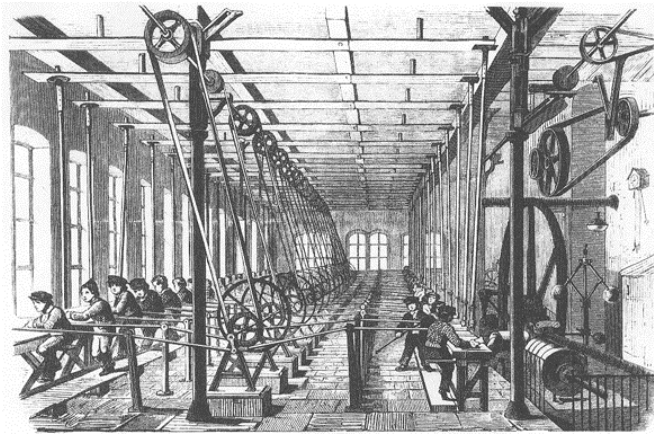


Bild 1.11 Kinderarbeit in einer Fabrik in Aschaffenburg 1858. Zentrale Transmissionswellen unter der Decke treiben über Lederriemen die an den Arbeitsplätzen befindlichen Maschinen an.

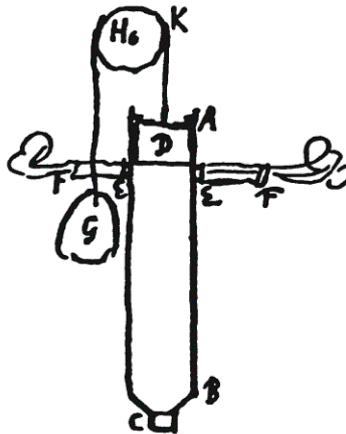


Bild 1.12 Der Schießpulvermotor von CHRISTIAAN HUYGENS 1673

Eine Dampfmaschine ist meist doppelt wirkend: Auf der linken Seite des Kolbens wird etwas Dampf über Schieber oder Ventile eingelassen. Dieser expandiert, weil er ja unter Druck steht, und schiebt den Kolben nach rechts. Auf der anderen Seite des Kolbens, also der rechten Seite, öffnen Schieber oder Ventile und lassen den durch das Arbeiten verbrauchten Dampf ins Freie. Das bedeutet: Bei jedem Hin und Her des Kolbens wird Arbeit geleistet, also pro Kurbelumdrehung zwei Kraftimpulse. Dieses an und für sich verlockende Prinzip wendete der Belgier JEAN-JOSEPH ÉTIENNE LENOIR auf seinen frühen Verbrennungsmotor an, nur dass er statt Dampf ein Gemisch aus Stadtgas und Luft verwendete, das er mit einer frühen Form der elektrischen Zündkerze anzündete. Das Gasgemisch wurde nicht verdichtet – und das ist genau der Trick des Motors von NIKOLAUS OTTO, wie sich gleich zeigen wird: OTTO gilt als der Erfinder des modernen Verbrennungsmotors, obwohl er Vorgänger wie ALPHONSE BEAU DE ROCHAS hatte. Aber als Erfinder gilt nach heutiger Auffassung, wer nicht nur eine geniale Idee hat, sondern dieser Idee auch zum Durchbruch verhilft. Daher sind heute CARL BENZ und GOTTLIEB DAIMLER als Erfinder des Automobils⁹ bekannt, obwohl auch sie mehrere Vorgänger wie SIEGFRIED MARKUS und JULIUS SÖHNLEIN hatten – aber diese Herren bauten eben nur Unikate, ohne die Idee weiterzuverfolgen.



Bild 1.13 NIKOLAUS AUGUST OTTO, der Erfinder des modernen Verbrennungsmotors

OTTO, [Bild 1.13](#), machte eine Kaufmannslehre, er war in technischen Dingen also Autodidakt – übrigens wie FELIX WANKEL, der eigentlich gelernter Buchhändler war.¹⁰ Er las in den Zeitungen reichlich optimistische Berichte über den Lenoir-Motor und sie brachten ihn auf die Idee, sich selbst mit dem Bau einer solchen, verbesserten Maschine zu befassen [1]. Er tat sich mit dem Unternehmer und Ingenieur EUGEN LANGEN zusammen und

⁹ Wenn man einen US-Amerikaner fragt, wird der auf die Frage nach dem Erfinder des Automobils wahrscheinlich HENRY FORD antworten.

¹⁰ Nicht dass Sie denken, alle großen Erfinder rund um den Motor wären Autodidakten: RUDOLF DIESEL, CARL BENZ, GOTTLIEB DAIMLER, HUGO JUNKERS und CLAUDE DORNIER waren allesamt studierte Maschinenbau-Ingenieure.

sie gründeten zusammen 1864 die erste Motorenfabrik der Welt, N.A. Otto & Cie. in Köln-Deutz. Dort trat übrigens 1872 als technischer Leiter GOTTLIEB DAIMLER ein, der seinen genialen Schützling WILHELM MAYBACH sozusagen als Adjutanten mitbrachte. Zuerst bauten OTTO und LANGEN eine atmosphärische Gasmaschine basierend auf dem Prinzip von HUYGENS bzw. NEWCOMEN, bei der die expandierenden Gase den Arbeitskolben nur in die Höhe hoben, während dann nach Abkühlung der Gase der äußere Luftdruck den Kolben nach unten drückt und nun Arbeit geleistet wird. Eine am Kolben befestigte Zahnstange erzeugte mit einem Klinkengesperre und einem Zahnrad eine Drehbewegung, Bild 1.14. So unvollkommen diese Maschine und so miserabel ihr Wirkungsgrad von etwa 10 % aus heutiger Sicht waren, gewann doch diese erste in Serie gefertigte Gasmaschine die goldene Medaille auf der Pariser Weltausstellung 1867, weil sie der Lenoir-Maschine hinsichtlich des Gasverbrauchs weit überlegen war [1]. 1872 waren schon 1000 Exemplare dieser Gasmaschine gebaut worden. Doch das war erst der Anfang ...

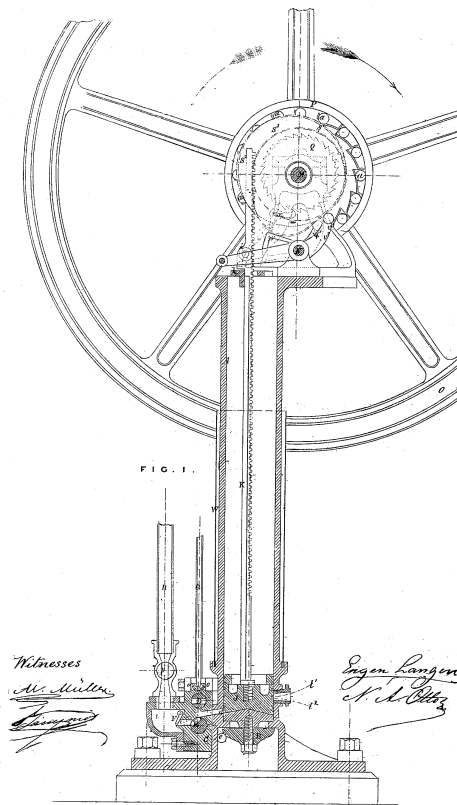


Bild 1.14 Die atmosphärische Gasmaschine von OTTO und LANGEN [106]

Stichwortverzeichnis

A

ACEA-Klassen [184](#)
Alusil [65](#)
Anlassen [301](#), [348](#), [358](#)
Ansaugkanal [219](#)
API Commercial-Klassen [184](#)
API Service-Klassen [183](#)
Arbeit
 innere [45](#)
 Nutz- [46](#)
Arenakolben [80](#)
ATF [185](#)
Ausgleichsluftdüse [293](#)
Ausgleichswelle [110](#)
Ausklipppunkt [159](#), [165](#)

B

Basisgrößen [45](#)
Batteriezündung [255](#)
Bernoulli-Gleichung [279](#)
Beschichten [65](#)
Beschleunigerpumpe [288](#), [293](#)
Bessemer-Verfahren [2](#)
Betriebsventilspiel [223](#)
Bleitetraethyl [297](#)
Boxermotor [122](#), [195](#)

C

CAD [307](#)
CIH-Motor [197](#)
Coffman-Starter [306](#)

D

Dampflokomotive [7](#)

Dampfmaschine [1](#), [10](#), [33](#)
Dampfturbine [4](#)
DOHC [20](#), [53](#)
DOHC-Motor [202](#)
Doppelkolbenmotor [25](#)
Doppelpassung [343](#)
Drehkolbenmotor [27](#)
Drehmoment [45](#)
Drehmomentschlüssel [210](#)
Drehzahlmesser [102](#)
Druckverlauf [46](#)
Düsennadel [282](#)
Dynastarter [304](#)

E

Eatonpumpe [191](#)
Eigenfrequenz [217](#)
Einmassenschwinger [217](#)
Elektroauto [7](#)
Elektron [74](#)

F

Federkennlinie [217](#)
Festlager [136](#)
Fest-Loslagerung [57](#), [139](#)
Fluidbetrieb [160](#), [161](#), [165](#)
Flüssiggas [296](#)
Frischölschmierung [187](#)
Frühzündung [14](#)

G

Galnikal [65](#)
Gasturbine [4](#)
gebaute Kolben [77](#)

Gebrauchsmuster 44
Gegenkolbenmotor 26, 34
Gegenläufer 114
Gehäuseteilung
 horizontal 58
 vertikal 55
Getrennschmierung 246
Getriebeöl 181, 184
Gleichdruck-Vergaser 292
Gleichläufer 113
Gleichstromspülung 25
Gleitabgriff 242
Gleitlager 159
Gleitlagerschäden 165
Gleitsitz 158
Gleitwerkstoffe 165
Glühzünder 30
Gradscheibe 271
Grauguss 61
Grundausslegung 45
Gusseisen 3

H

Haftsitz 158
Hauptdüse 280
HC-Motor 197
Hertz'sche Pressung 221
Hirth-Verzahnung 328
Hochspannungs-Magnetzündung 255
Honon 66
Hub-Bohrungs-Verhältnis 49
Hülsenkette 205
hydraulisches Abstützelement 201
Hydrostößel 199

I

indizieren 46
Invarstahl 76
IOE 16
ISO-Toleranzsystem 157
ISO-VG-Klasse 181

K

Kaltstartsystem 280
Kegelrollenlager 134, 139, 143
Kickstarter 302
Kipphebel 225

Kippspiel 323
Klemmverband 312, 339, 351
Klopfen 296
Kolben 73
Kolbenbolzen 78
Kolbeneinbauspiel 78
Kolbenfresser 252
Kolbengeschwindigkeit 219
 mittlere 46
Kolbenklemmer 250
Kolbenmaterial 74
Kolbenpumpe 191
Kolbenrinfstoß 80
Kolbenringe 79
Kolbenring-Spannband 70
Kondensator 263
Königswelle 203
Kontaktabstand 259
Kontinuitätsgleichung 219, 280
Konusspannelement 242, 311
Konusverbindungen 309
Kräfte am Kurbeltrieb 94, 126
Kraftstoff 295
Kreisbogennocken 234
Kreiskolbenmotor 27
Kreuzkopf 73
Kugelgraphitguss 64
Kugellager 134
Kurbelgehäuse 55, 351
Kurbelkröpfung 116
Kurbelwelle 85, 308
Kurzhuber 49

L

Lagerluft 153
Lagerspiel 160
Lanchester-Ausgleich 110
Langhuber 49
Laufbuchse 64
Leerlaufdüse 280
Leerlaufsystem 280, 293
Leichtmetallguss 64
Leistung 45
Leistungsbremse 46
Lokasil 65
Loslager 136
L-Ring 80

Luftzahl 279

M

Magnesium 65
Magnetzündler 267
Massenausgleich 102
Meisternocken 238
Messventilspiel 223
Modelldiesel 31
Modellmotor 29
Motoröl 181

N

Nadellager 134, 143
Nasenkolben 25
Nassumpfschmierung 187
Nelson-Bohnalite-Kolben 76
Nennmaß 158
Newtonsche Flüssigkeit 181
Niederspannungs-Magnetzündung 255
Nikasil 65
Nockenberechnung 227
Nockenfolger 198, 223
Nockenform 201, 223
Nockenschleifmaschine 238
Nockenwelle 220, 222

O

OHC 17, 53
OHC-Motor 197
OHV 17, 53
OHV-Motor 193
Oktan-Zahl 296
Öl 180
Ölfangring 313, 318
Ölkohle 249
Ölkühler 191

P

Paralleltwin 113
Passungen 157
Patente 42
Pendelanlasser 306
Pendelrollenlager 143
PKW-Vergaser 292
Planverzahnung 328
Pleuel 319

Pleuelstange 92
Pleuelstangenverhältnis 51, 114
Presssitz 158
Pressverband 333
Prismenfräser 331
Punktlast 148
pV-Diagramm 45

Q

Querstromspülung 25

R

Radialwellendichtring 172
Reibleistung 161
Reihenmotor 122
relative Exzentrizität 162, 163
relative Lagerspiel 161
Reversierstarter 301
Rillenkugellager 143
Rizinusöl 186
Rollenkette 205
Rollenstößel 223, 225
ruckfreier Nocken 235

S

SAE-Klasse 181
Schalenhartguss 220
Schieberausschnitt 282
Schiebersteuerung 38
 Burt-McCollum 39
 Flachschieber 27, 40
 Knight 38
 Walzenschieber 40
Schiebervergaser 282
Schlepphebel 201
Schleuderguss 64
Schleuderschmierung 187
Schließwinkel 259
Schlitzmantelkolben 75
Schlitzmaße Zweitakter 355
Schmierspalt Dicke 161
Schnüffelventil 16
Schräggugellager 139
Schubschraubtriebzanlasser 303
schwimmende Lagerung 57, 139
Schwimmernadelventil 280
Schwimmersystem 280

Schwungkraftanlasser 306
Schwunglichtmagnetzündler 268
Schwungrad 348
Shim 199, 224, 242
Simmerring 172
SOHC-Motor 197
Sommerfeld-Zahl 161, 163
Spreizung 239
Stahl 2
Stahlzylinder 66
Starterklappe 292
Sternmotor 122, 312
Steuerzeiten 222
Stirnräder 205
Strömungsgeschwindigkeit 219
SV 16, 53
SV-Motor 193
Synchrontester 288
Syntheseöl 186

T

Tangentennocken 224, 234
Tassenstößel 199, 223, 224, 240
Teilapparat 331
Titan 94
Tonnenlager 134, 143
Totpunkt
 oberer 14, 45, 346
 unterer 14, 45
Trockensumpfschmierung 188
Tunnelgehäuse 57
Tupfer 282

U

Umfangsgeschwindigkeit 161
Umfangslast 148
Umkehrspülung 25
Umlaufmotor 180
Umlaufschmierung 187
Unterbrecher 258, 269
Unterdruck-Vergaser 290

V

Ventil 202, 210
Ventilerhebungskurve 223, 239
Ventilfeder 216
Ventilfederspanner 214

Ventilführung 212, 346
Ventilschaftabdichtung 212
Ventilsitzfräser 213
Ventilsitzring 215
Ventilspiel 225
Ventilüberdeckung 239
Ventilüberschneidung 15
Venturirohr 279
Verbrennungsdruck 45
Verdichtungsverhältnis 51
Vergaser 279
Vergaser einstellen 288
Verluste
 mechanische 46
Vermicularguss 61
Verteiler 259
Viertaktprinzip 12
Viskosität 180
 dynamische 161
Viskositätsindex 185
V-Motor 118, 195
Vornocken 227

W

Wälzlager 133, 308
Wankelmotor 26
Wärmeausdehnungskoeffizient 75
Wärmewert 273
Winkelgeschwindigkeit 161
Wirkungsgrad 7, 46

Z

Zahnkette 205
Zahnradpumpe 191
Zahnriemen 204, 242
Zollerpleuel 25
Zündanker 269
Zündanlagen 255
Zündkerze 272
Zündlichtpistole 271
Zündspule 257
Zündzeitpunkt 259
Zweitakt-Kolben 81
Zweitaktmotor 21, 245, 349
Zweitaktöl 246
Zylinderanordnung 118
Zylinderanzahl 53

Zylinderbohrung [69](#)

Zylinderbohrwerk [66](#)

Zylinderkopf [193](#), [344](#), [356](#)

Zylinderkopfdichtung [72](#), [346](#)

Zylinderkopfschrauben [210](#)

Zylinderkurbelgehäuse [60](#)

Zylinderrollenlager [134](#), [143](#)