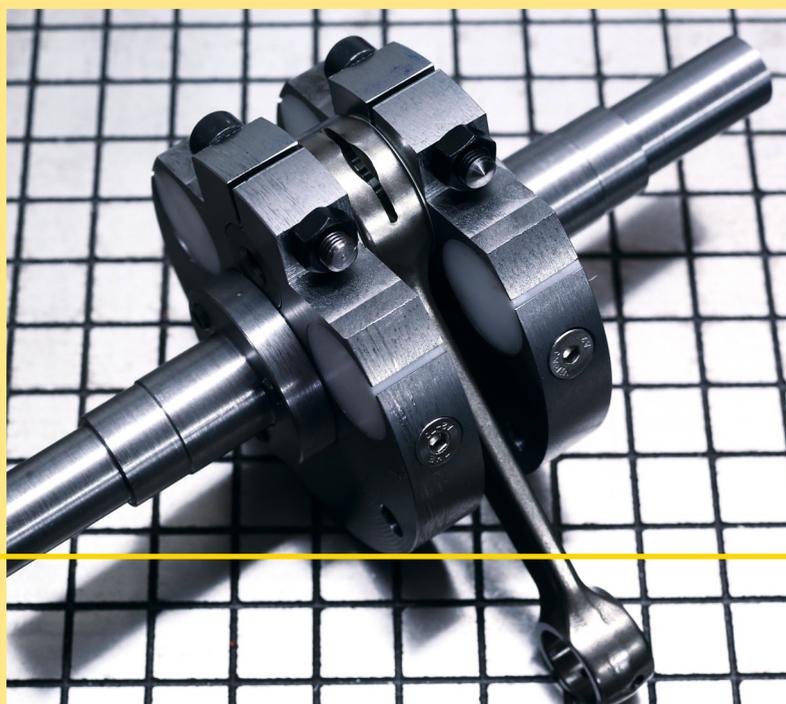


Frank Rieg

Motor-Konstruktion

Grundlagen und praktische Anwendungen



HANSER

Rieg Motor-Konstruktion



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Frank Rieg

Motor-Konstruktion

Grundlagen und praktische Anwendungen

HANSER

Über den Autor:

Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg, Universität Bayreuth



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

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

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers (m/w/d) verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Wir behalten uns auch eine Nutzung des Werks für Zwecke des Text- und Data Mining nach § 44b UrhG ausdrücklich vor.

© 2024 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Julia Stepp

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Titelmotiv: © Frank Rieg

Satz: Frank Rieg

Druck: CPI Books GmbH, Leck

Printed in Germany

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 Prüfstands-aufbauten 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

Verbrennungsmotoren

■ 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 *Wärme­kraft­ma­schinen* 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'S 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-

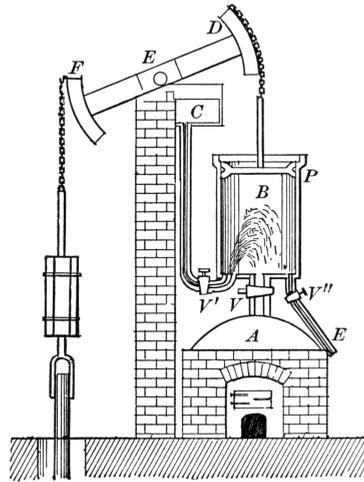


Bild 1.1 Eine Newcomen-Dampfmaschine [98]

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.

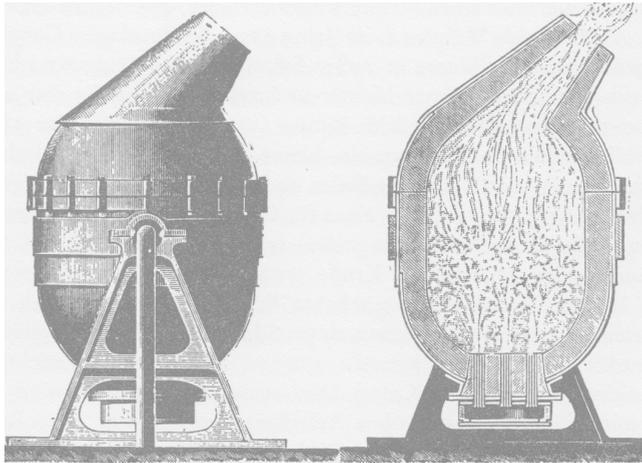


Bild 1.2 Eine Bessemer-Birne [1]

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 Schweißisen zur Verfügung. Trotz allen Schwierigkeiten: Mit seiner Niederdruck-Dampfmaschine begann das industrielle Zeitalter, **Bild 1.3**. Bei der

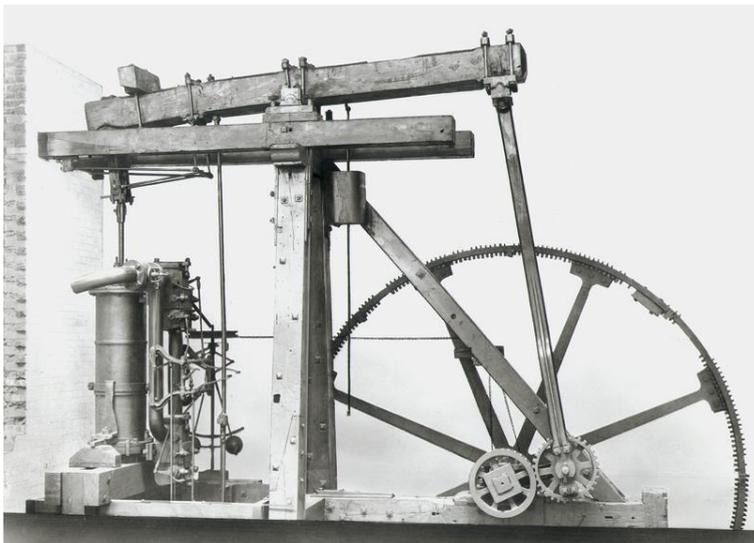


Bild 1.3 Eine Boulton & Watt-Dampfmaschine [99]

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.

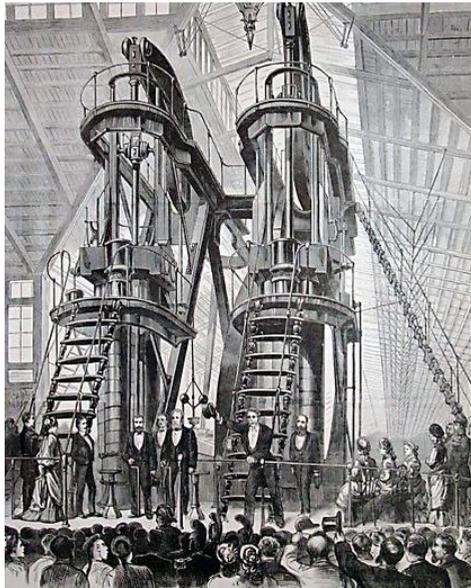


Bild 1.4 Eine Corliss-Dampfmaschine [100] mit 1400 PS bei 36 U/min. Der berühmte amerikanische Präsident ULYSSES S. GRANT und KAISER PEDRO II. VON BRASILIEN starteten die riesige Maschine auf der Weltausstellung 1876 in Philadelphia.

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].

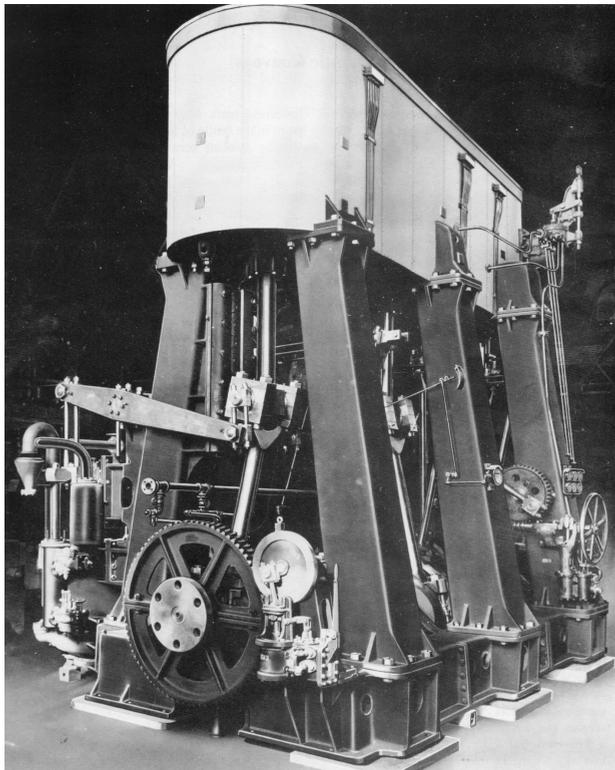


Bild 1.6 Die Dreifach-Verbund-Dampfmaschine eines Liberty-Schiffs, 140 t Gewicht, 2500 PS bei 76 U/min

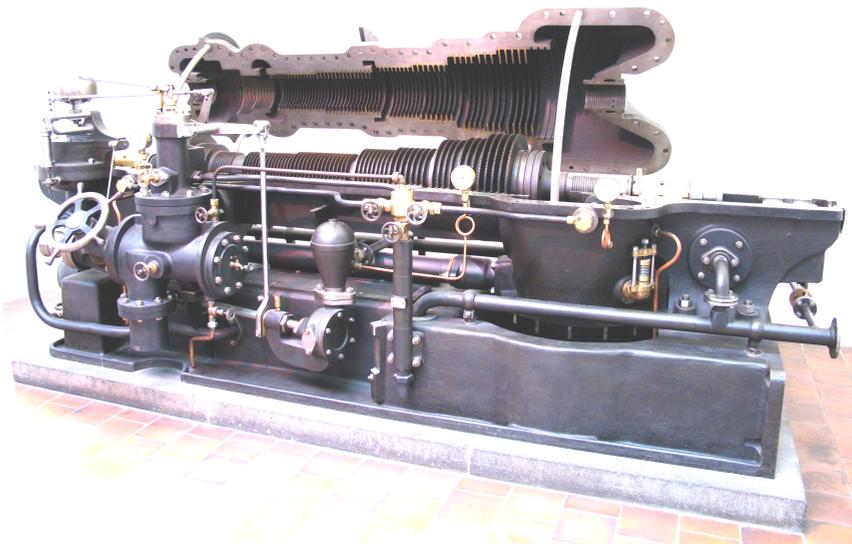


Bild 1.7 Eine frühe Parsons-Dampfturbine [101]

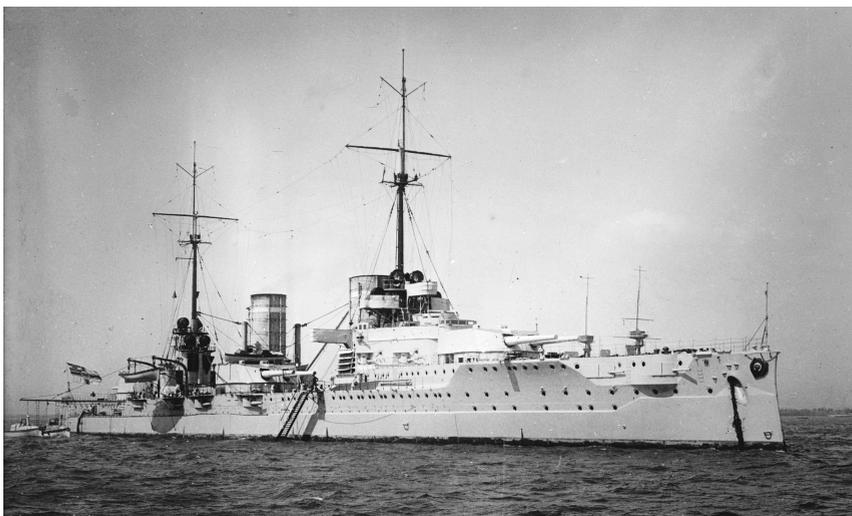


Bild 1.8 Der Schlachtkreuzer SMS VON DER TANN der Kaiserlichen Marine, 1911 in Dienst gestellt. Vier *Parsons-Dampfturbinen* mit zusammen 42.000 PS und 18 Dampfkesseln. 900 Mann Besatzung, Hauptbewaffnung acht Kanonen mit Kaliber 28 cm [105].

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.

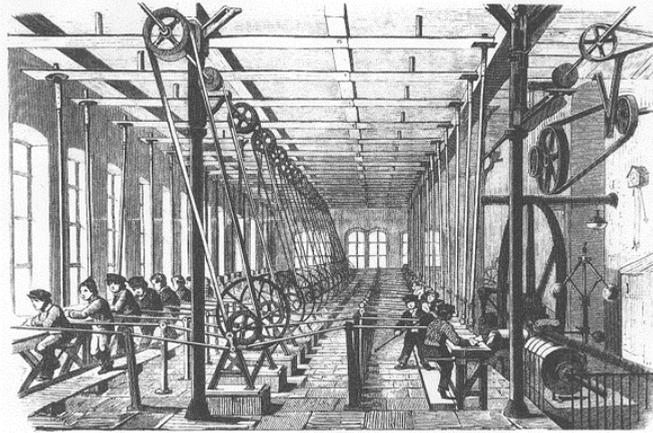


Bild 1.11 Kinderarbeit in einer Fabrik in Aschaffenburg 1858. Zentrale Transmissionswellen unter der Decke treiben über Lederriemen die an den Arbeitsplätzen befindlichen Maschinen an.

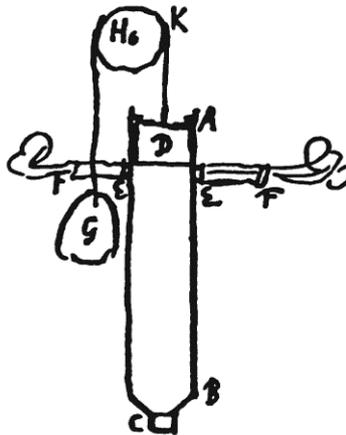


Bild 1.12 Der Schießpulvermotor von CHRISTIAAN HUYGENS 1673

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 ...

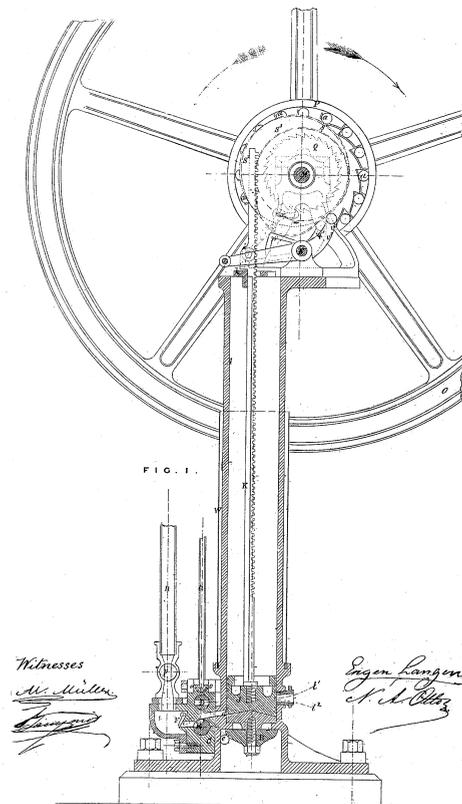


Bild 1.14 Die atmosphärische Gasmaschine von OTTO und LANGEN [106]

■ 1.2 Die Funktion eines Viertaktmotors

Wie bei allen großen Entdeckungen, spielte der Zufall die entscheidende Rolle; OTTO sagte [7]: „Ich saugte auf ein Halb eventuell drei Viertel Explosionsgemisch an, versuchte den Kolben durch umgedrehtes Drehen am Schwungrad so weit wie möglich zurückzupressen, zündete alsdann, und siehe da, das Schwungrad machte mit großer Kraft mehrere Umdrehungen“.

Jeder, der bei der Armee war, Jäger oder Sportschütze ist, kennt diese Demonstration: Wenn Sie eine Gewehrpatrone öffnen, das Schießpulver ausschütten und dieses Pulverhäufchen mit einem Streichholz anzünden, dann passiert – fast nichts! Das Pulver explodiert nicht, sondern brennt relativ langsam ab; erst wenn es in einer Patrone eingeschlossen ist und durch die Kugel und den Lauf darin gehindert wird (man nennt das *verdämmen*), langsam abzubrennen, baut es einen Druck von 2000 bis 5000 bar auf. Das ist sinngemäß beim Verbrennungsmotor genauso; früher sprach man übrigens vom *Explosionsmotor*, was aber Blödsinn ist: Die Verbrennungsgeschwindigkeit des Benzin-Luft-Gemischs im Ottomotor liegt bei etwa 30 m/s, während Schwarzpulver mit 300–600 m/s verbrennt und moderne Sprengstoffe wie *Hexogen* ca. 8500 m/s erreichen. Selbst das gute, alte *Nitroglycerin* kann Detonationsgeschwindigkeiten bis zu 9000 m/s erzielen.

Diesen Verdichtungstakt haben übrigens schon vor OTTO der Uhrmacher CHRISTIAN REITHMANN und der Eisenbahningenieur ALPHONSE BEAU DE ROCHAS unabhängig voneinander vorgeschlagen, und in Wikipedia und anderen Medien werden beide Männer als „Erfinder des Viertaktprinzips“ bezeichnet. Das mag ja durchaus sein, aber sie haben der Idee niemals zum Durchbruch verholfen; REITHMANN klagte später gegen das Otto-Patent, aber man einigte sich.

Und wie funktioniert das *Viertaktprinzip*? Betrachten Sie dazu [Bild 1.15](#). Hier sind die vier Takte mit jeweils zwei bis drei Zwischenschritten weiter aufgelöst. Ich beschreibe es erst einmal unpräzise, wie es in allen möglichen Quellen sinngemäß nachzulesen ist:

- **1. Takt:** Der Kolben geht nach unten und saugt durch das nun offene Einlassventil ein Benzin-Luft-Gemisch an.
- **2. Takt:** Beide Ventile sind geschlossen. Der Kolben geht wieder hoch und verdichtet das Benzin-Luft-Gemisch.
- **3. Takt:** Der Kolben ist oben angekommen, ein Zündfunke entzündet das Benzin-Luft-Gemisch, das verbrennt, sich damit ausdehnt und den Kolben nach unten schiebt.
- **4. Takt:** Der Kolben ist unten angekommen. Das Auslassventil öffnet und der Kolben schiebt beim Hinaufgehen die verbrannten Gase aus.

Jetzt betrachten wir das einmal etwas genauer. Die deutsche Bezeichnung „Takte“ ist irreführend, „Hübe“ wären viel besser, und in der Tat heißt der Viertaktmotor im Englischen „four-stroke engine“. Also:

1. Hub „Ansaugen“ – Kolben geht nach unten (Kurbelwellenstellung 0°): Der Kolben geht nach unten. Das macht er aber nicht einfach so, dafür muss entweder der Anlasser oder Kickstarter beim Starten sorgen (daher läuft kein Verbrennungsmotor von selbst an – im Gegensatz zur Dampfmaschine) oder während des Laufs beim Einzylinder das Schwungrad oder beim Mehrzylinder ein anderer, gerade arbeitender Kolben. Das Einlassventil wurde schon vor Ende des vorangegangenen Auslasstakts – bei ca. 30° Kurbelwinkel, bevor der

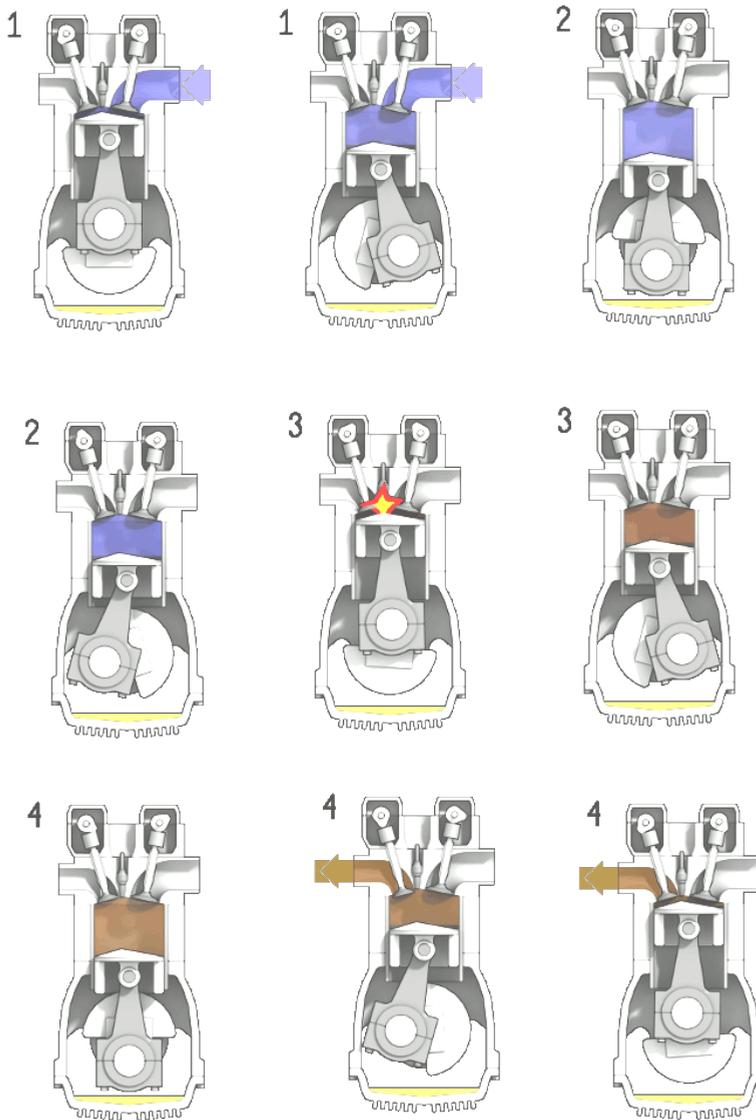


Bild 1.15 Die vier Takte eines Viertaktmotors [108], in mehreren Bildern aufgelöst: Die Ziffern 1 bis 4 zeigen die jeweiligen Takte.

Kolben ganz oben ist – geöffnet und steht weit offen; es wird ein Benzin-Luft-Gemisch angesaugt. Wenn der Kolben sich weiter bewegt hat und im unteren Totpunkt (UT im Deutschen genannt, BDC – *bottom dead center* im Englischen) steht, steht die Kurbelwelle auf 180°. Die Kurbelwelle hat nun eine halbe Umdrehung gemacht, und in den Motor wurde Arbeit hineingesteckt – oder glauben Sie, dass dieses Ansaugen, Kolbenbewegen und Kurbelwellendrehen einfach so ohne Kraftaufwand geht? Das Einlassventil ist im UT noch offen. Erst bei einer Kurbelwellenstellung von 250°, d. h. 70° nach UT, beginnt das Einlassventil wieder zu schließen. Warum das? Weil die sich beim Ansaugen mit ca. 80 m/s bewegende Gassäule eine gewisse Trägheit hat und nicht einfach in Nullzeit beschleunigt oder gestoppt werden kann.

2. Hub „Verdichten“ – Kolben geht nach oben (Kurbelwellenstellung 180°): Das Auslassventil ist nach wie vor geschlossen, aber das Einlassventil ist noch offen und schließt erst ca. 70° nach UT, wie wir gerade gesehen haben. Der Kolben geht nach oben und verdichtet das eingeschlossene Benzin-Luft-Gemisch. Das macht er aber nicht einfach so, dafür muss entweder der Anlasser oder Kickstarter beim Starten sorgen oder während des Laufs beim Einzylinder das Schwungrad oder beim Mehrzylinder ein anderer, gerade arbeitender Kolben. Die zu investierende Verdichtungsarbeit ist sehr erheblich, das merken Sie sehr schön bei Ein- oder Zweizylindermotoren von Motorrädern beim Treten auf den Kickstarter: Meine frühere BMW R90/6 verlangte echten Körpereinsatz, wenn Sie diesen 900-ccm-Zweizylinder-Boxermotor mit dem Kickstarter anwerfen wollten. Wenn die Kurbelwelle etwa 25° vor dem oberen Totpunkt 360° steht, der Kolben also noch einige Millimeter vor der oberen Stellung, dem oberen Totpunkt (OT im Deutschen genannt, TDC – *top dead center* im Englischen), angekommen ist, zündet die Zündkerze. Warum so früh? Weil das Gemisch eine gewisse Zeit braucht, um durchzubrennen und den höchsten Druck aufzubauen. Man nennt das *Frühzündung*. Sie beträgt im Leerlauf etwa 5° vor OT, bei normalen Motoren ab ca. 2500 U/min 25° und bei Wettbewerbsmotoren bis zu 45° vor OT! Die Kurbelwelle hat nun eine ganze Umdrehung gemacht, und in den Motor wurde bisher nur jede Menge Arbeit 'reingesteckt! Immerhin beträgt der Verdichtungsdruck 10–20 bar und das Kraftstoff-Luftgemisch hat sich auf rund 500 °C erwärmt. Warum das? Es handelt sich um eine *adiabatische Verdichtung*, die so schnell erfolgt, dass keine Wärme abgegeben wird. Sie können das mit einer Fahrradluftpumpe ausprobieren, wenn Sie schnell pumpen: Die Pumpe wird warm, und zwar nicht durch das bisschen Reibung zwischen Pumpenkolben und -zylinder, sondern durch besagte adiabatische Verdichtung.

3. Hub „Arbeiten“ – Kolben geht nach unten (Kurbelwellenstellung 360°): Der volle Arbeitsdruck – 30 bis über 100 bar bei einem Benzin-Viertaktmotor¹¹ – im Zylinder ist erreicht. Der Kolben wird nach unten geschoben, und nun wird zum ersten Mal mehr Arbeit geleistet als vorher hineingesteckt wurde. Blöderweise ist der Arbeitsdruck im Zylinder nach 450° Kurbelwellenstellung, wenn also der Kolben auf der Mitte zwischen OT und UT steht und damit der Kurbelradius maximal ist, schon auf die Hälfte abgesunken – auch damit erklärt sich der an sich schlechte Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren.¹² Aber bereits bei ca. 470°, also 70° vor UT, beginnt das Auslassventil zu öffnen und die Abgase be-

¹¹ Bei einem modernen Dieselmotor treten Spitzendrücke bis zu 200 bar auf!

¹² Es hat nicht an vielen „Erfindungen“ gefehlt, um diesem Missstand abzuhelpfen, aber eine praktikable Lösung des Dilemmas steht seit 150 Jahren aus.

fürlich in Abschnitt 6.2 reden. Daher sind eigenhändige Manipulationen und Wunder-Auspuffanlagen fast immer kontraproduktiv: Außer mehr Krach, mehr Benzinverbrauch, schlechteren Abgaswerten und fast immer schlechterer Leistung bringen sie nichts; die Motorhersteller wissen schon ganz gut, warum sie ihre Ansaug- und Abgasanlagen so und nicht anders auslegen. Für Otto-Zweitaktmotoren gilt das noch viel mehr, wie wir gleich sehen werden. Natürlich gibt es Ausnahmen wie z. B. die Auspuffanlagen eines renommierten slowenischen Herstellers, die sogar offiziell von Herstellern wie Yamaha oder KTM als Zubehör angeboten werden.

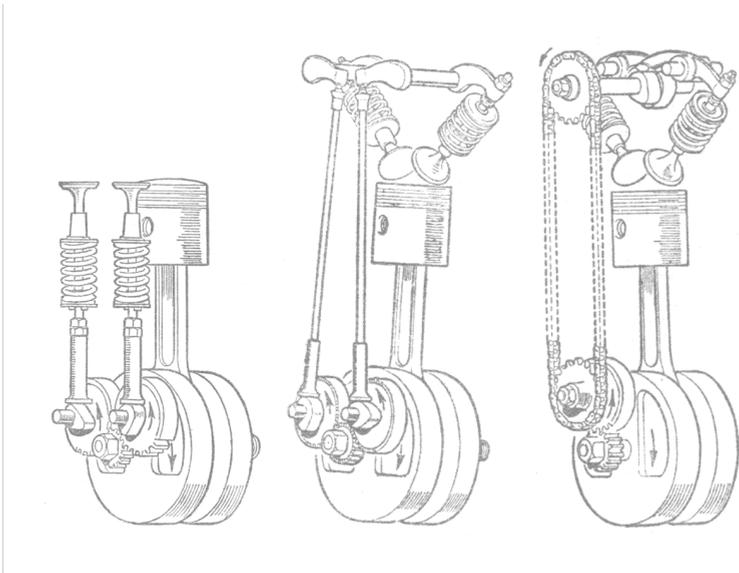


Bild 1.17 Die drei heute noch üblichen Grundtypen der Ventilanordnung (von links nach rechts: SV – side valves, OHV – over head valves, OHC – over head camshaft) [24]

Ein äußerst umfangreiches Thema ist die Anordnung der Ventile: Die allerersten Motoren hatten ein automatisches Einlassventil, „Schnüffelventil“ genannt, das ähnlich dem eines Kompressors gegen leichten Federdruck von selbst durch den Unterdruck im 1. Takt öffnete. Das Auslassventil muss aber immer gesteuert werden. DAIMLER löste das mit seiner an sich genialen *Kurvennutsteuerung*, Bild 1.18; später verwendete man nur noch Nocken zusammen mit stehenden Auslassventilen. Mit Schnüffelventilen kann man aber kaum Drehzahlen über vielleicht 1500 U/min erreichen, und sehr bald wurde auch das Einlassventil gesteuert, was zu einem hängenden Einlassventil und einem stehenden Auslassventil führte. Das nennt man IOE (*inlet over exhaust*) oder *wechselgesteuert*, Bild 1.21. Rolls Royce baute derartige IOE-Motoren bis in die 1960-er-Jahre. Mechanisch ist das umständlich, und es ist leichter, einfach beide Ventile stehend neben dem Zylinder anzuordnen, Bild 1.17. Das nennt man SV (*side valves*) oder *seitengesteuert*, Bild 1.21. Sehr nachteilig ist jedoch bei SV- und IOE-Motoren der wie eine Mütze seitlich überhängende Brennraum, der thermodynamisch schlecht ist und keine hohen Verdichtungsverhältnisse erlaubt. SV-Motoren werden heute nur noch sehr selten gebaut, z. B. für Rasenmäher und Notstromaggregate, wo keine hohen Drehzahlen gebraucht werden. Eine Abwandlung von SV-Motoren sind die thermodynamisch noch schlechteren und vollkommen veralteten T-Köpfe, Bild 1.22.

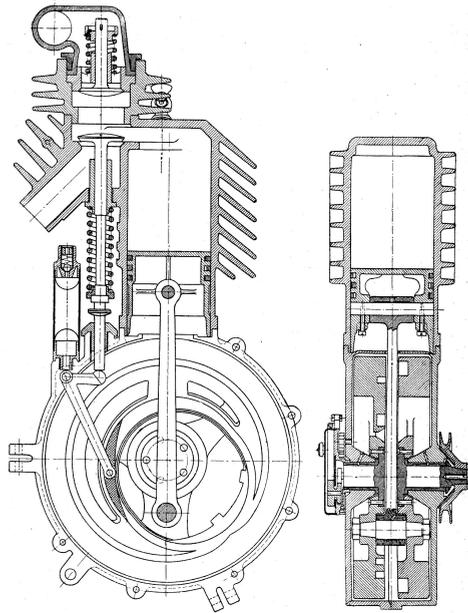


Bild 1.18 Ein Motor um 1900: Der Einlass erfolgt per Schnüffelventil und das Auslassventil wird über die Daimler'sche Kurvennutsteuerung betätigt (mit freundlicher Genehmigung des Johann Kleine Vennekate Verlags [20]).

Thermodynamisch am besten ist ein Brennraum in Form einer Halbkugel, weil der das günstigste Verhältnis Oberfläche zu Volumen hat. Verwirklichen kann man das mit OHV-Motoren (*over head valves*) oder *hängende Ventile*, Bild 1.21. Die Ventile hängen im Zylinderkopf, und werden von der unten liegenden oder auch halbhoch angeordneten Nockenwelle über *Stößel* oder *Schlepphebel*, *Stoßstangen* und *Kipphebel* betätigt. Das ist natürlich mechanisch wesentlich aufwendiger und teurer als ein SV-Ventiltrieb, aber es sind viel höhere Drehzahlen und Leistungen möglich, weshalb man OHV-Motoren bereits vor dem 2. Weltkrieg in Sportmotorrädern eingebaut hat. Bei modernen Autos und Motorrädern kommen OHV-Ventiltriebe kaum noch vor, aber das ist, ehrlich gesagt, eher Modetrends geschuldet als technischen Notwendigkeiten: Die Honda CX 500 hatte einen OHV-Ventiltrieb für ihren Zweizylinder-V-Motor, der problemlos und dauerhaft für 10.000 U/min gut war. Bei LKW-Motoren werden nach wie vor gerne OHV-Motoren genutzt.

Wenn höhere Drehzahlen gefragt sind, dann werden die Ventile hängend wie bei einem OHV-Motor angeordnet, aber von einer Nockenwelle im Zylinderkopf betätigt. Die Nockenwelle steuert die Ventile entweder über *Kipphebel*, *Schlepphebel* oder direkt über *Tassenstößel*. Diese Bauart nennt man OHC (*over head camshaft*), mitunter auch SOHC (*single over head camshaft*)¹⁴, Bild 1.23. Besonders bei Tassenstößeln hat man die geringsten bewegten Massen im Ventiltrieb, sodass dies die Bauweise für sehr hoch drehende Moto-

¹⁴ Insofern ist die Bezeichnung OHV (*over head valves*) unglücklich, da bei OHC die Ventile ja ebenfalls im Zylinderkopf hängen.

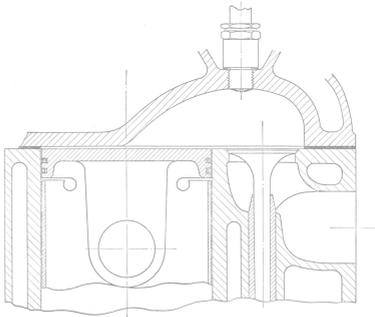


Bild 1.19 SV-Zylinderkopf nach RICARDO von 1919 [26]. Dieser „mützenförmige“ Brennraum ist thermodynamisch sehr schlecht und erlaubt auch keine hohen Verdichtungsverhältnisse. Der große Vorteil von SV-Motoren ist deren mechanische Einfachheit und der äußerst simple Zylinderkopf verglichen mit dem nebenstehenden DOHC-Zylinderkopf.

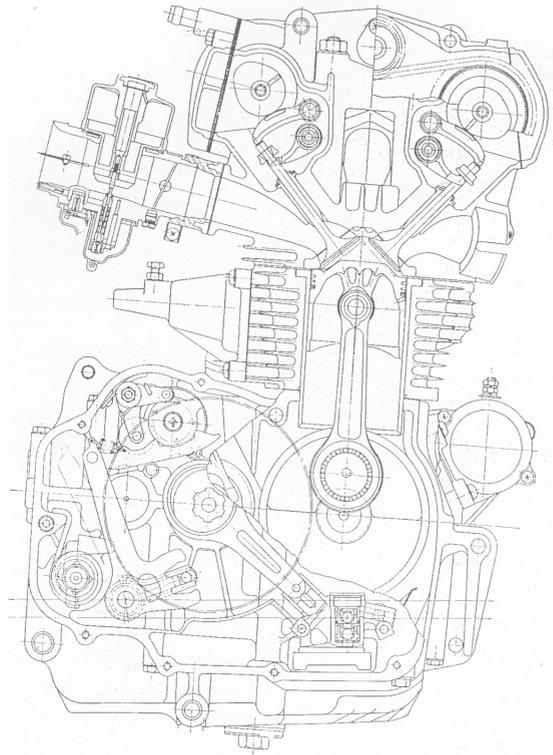


Bild 1.20 Der berühmte DOHC-Zweizylindermotor der Honda CB 450 mit Halbkugel-Brennraum aus den 1960er-Jahren (Werkbild)

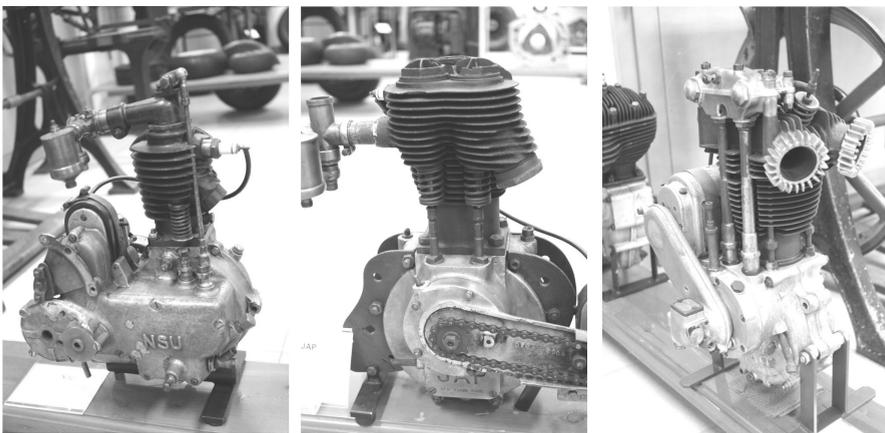


Bild 1.21 Von links: IOE (*inlet over exhaust*), SV (*side valves*), OHV (*over head valves*) [2]