

**Funktion und Aufbau der**



**Motoren**



**für den Fahrzeugbau**

# **Fachbereichsarbeit**

## **aus Physik**

**vorgelegt bei**

**Dipl. Ing. Dr. Barbara Krätschmer**

**von**

**Nik Lerchbacher (Zweitaktmotor)**

**Roland Kellner (Geschichte, Boxermotor)**

**Florian Spreitzer (Dieselmotor, Abgasturbolader)**

**Daniel Müller (Wankelmotor, Gasturbine, Vorwort)**

**7c. Klasse**

**Februar 2004**

## **Vorwort**

Wir, eine Gruppe von Schülern, haben uns entschieden bei Frau Prof. Krätschmer in der Lernwerkstätte (welche 2 Tage dauerte) eine FBA zu schreiben. Frau Prof. Krätschmer war der Meinung, dass das Thema Motoren am Besten passen würde, da wir in den Physikstunden das Thema ausführlich mit Referaten behandelt haben. So konnten wir zugleich die "Handouts" von unseren Klassenkameraden als Grundstein verwenden. Unsere Aufgabe war es nur mehr die gegebenen Materialien zu verwenden, entsprechend zu bearbeiten und das Ganze neu zu formatieren.

Im Folgenden werden die Themen: Geschichte der Motoren, sowie die verschiedenen Motorentypen (Viertaktmotor, Boxermotor, Zweitaktmotor, Dieselmotor, Wankelmotor, Gasturbine) und ihre charakteristischen Merkmale behandelt. Dazu gehören Entwicklung und Aufbau der Motoren und auch, wie es sich im Fach Physik gehört, wie die physikalischen Abläufe funktionieren. Die FBA bietet nicht nur theoretische Informationen, sondern auch viele anschauliche Bilder die das Verstehen unterstützen sollen.

## Inhaltsverzeichnis

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Geschichte der Motoren .....                           | 6  |
| 2     | Physikalische Grundlagen des Motorenbaus .....         | 8  |
| 2.1   | Bedeutung der Wärmelehre im Maschinenbau .....         | 8  |
| 2.2   | Die Hauptsätze der Wärmelehre .....                    | 8  |
| 2.2.1 | Der erste Hauptsatz der Wärmelehre.....                | 8  |
| 2.2.2 | Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre .....              | 9  |
| 2.3   | Motoren und Zustandsänderungen bei Gasen .....         | 9  |
| 2.3.1 | Zustandsänderungen .....                               | 9  |
| 2.3.2 | Die isobare Zustandsänderung .....                     | 9  |
| 2.3.3 | Die isotherme Zustandsänderung .....                   | 10 |
| 2.3.4 | Die isochore Zustandsänderung .....                    | 10 |
| 2.3.5 | Die adiabatische Zustandsänderung.....                 | 11 |
| 2.4   | Wirtschaftlichkeit von Motoren .....                   | 11 |
| 2.4.1 | Energiefluss bei Motoren .....                         | 11 |
| 2.4.2 | Der Wirkungsgrad $\eta$ .....                          | 12 |
| 2.4.3 | Kenndaten von Motoren.....                             | 12 |
| 3     | Der Viertaktmotor .....                                | 12 |
| 3.1.1 | Funktionsweise .....                                   | 12 |
| 3.1.2 | Arbeitsdiagramm des 4-Takt Ottomotors .....            | 13 |
| 4     | Der Boxermotor .....                                   | 14 |
| 4.1   | Aufbau des Boxermotors.....                            | 14 |
| 4.2   | Arbeitsweise des Boxermotors.....                      | 14 |
| 4.3   | Vorteile .....   | 14 |
| 4.4   | Nachteile .....  | 15 |
| 5     | Der Zweitaktmotor .....                                | 15 |
| 5.1   | Aufbau des Zweitaktmotors.....                         | 15 |
| 5.2   | Arbeitsweise des Zweitaktmotors.....                   | 15 |
| 5.3   | Spülverfahren:.....                                    | 16 |
| 5.3.1 | Querstromspülung:.....                                 | 16 |
| 5.3.2 | Umkehrspülung:.....                                    | 16 |
| 5.4   | Vor- und Nachteile gegenüber dem Viertaktmotor .....   | 16 |
| 5.4.1 | Vorteile .....   | 16 |
| 5.4.2 | Nachteile .....  | 16 |
| 6     | Dieselmotor .....                                      | 17 |
| 6.1   | Aufbau.....  | 17 |
| 6.2   | Arbeitsweise.....                                      | 17 |
| 6.3   | Einsatzbereich.....                                    | 17 |
| 6.4   | Vorteile des Dieselmotors gegenüber dem Ottomotor..... | 17 |
| 7     | Abgasturbolader .....                                  | 17 |
| 7.1   | Prinzip einer Abgasturboaufladung .....                | 17 |
| 7.2   | Vorteile des Abgasturboladers .....                    | 17 |
| 8     | Der Wankelmotor .....                                  | 17 |
| 8.1   | Der Aufbau des Motors .....                            | 17 |
| 8.2   | Die Arbeitsweise.....                                  | 17 |
| 8.3   | Vorteile des Wankelmotors .....                        | 17 |
| 9     | Die Gasturbine .....                                   | 17 |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 9.1 | Brennkammer und Arbeitsweise.....            | 17 |
| 9.2 | Gasturbinenprozess mit Wärmerückwirkung..... | 17 |
| 9.3 | Vorteile: .....                              | 17 |
| 9.4 | Nachteile: .....                             | 17 |
| 10  | Zusammenfassung .....                        | 17 |
| 11  | Abbildungsverzeichnis .....                  | 17 |
| 12  | Literatur.....                               | 17 |

# 1 Geschichte der Motoren

Die Idee chemische Stoffe als Kraftquelle, bzw. die Verbrennung dieser als Kraftquelle zu nutzen gab es schon vor rund 200 Jahren. Zu dieser Zeit experimentierten Denis Papin und Christiaan Huygens mit Schießpulver. Später entdeckte man, dass es manche Gase gibt, die langsamer verbrennen. 1804 baute Isaac de Rivaz<sup>1</sup> einen von Wasserstoff angetriebenen Verbrennungsmotor. Diesen Motor setzte er auf ein Fahrgestell und zündete den Wasserstoff. Tatsächlich bewegte sich dieses Gestell einen Meter vorwärts.

56 Jahre später im Jahre 1860 entwickelte Jean Joseph Lenoir einen Leuchtgas-Motor. Das Gas wurde mit glühender Kohle gezündet. Er setzte seinen Motor auf ein Chassis (Fahrgestell, Rahmen) und fuhr damit in Paris spazieren.

**Abbildung 1: Marcus Wagen<sup>2</sup>**



Zur gleichen Zeit bastelte in Wien Siegfried Marcus am Vorläufer unseres heutigen Automobils. Seine Erfindung war ein wassergekühlter Einzylinder, welcher mit einem in Apotheken erhältlichen Erdölprodukt – Benzin – angetrieben wurde. Der Motor wog 280 kg; der Handwagen, auf den Marcus seine Konstruktion setzte, lief mit sechs Stundenkilometer. Zum Starten dieses Vehikels wurde es hinten aufgehoben und die Hinterachse angekurbelt.

Gleichzeitig baute in Köln Nikolaus August Otto ebenfalls einen mit Leuchtgas Verbrennungsmotor. Im Unterschied zu Lenoirs Maschine brauchte sie nur halb soviel Kraftstoff vor aber doppelt so schnell. Für

diesen Motor erhielt Otto auf der Pariser Weltausstellung 1867 eine Goldmedaille. Dieser Motor war aber zur Nutzung in Fahrzeugen zu schwer. Otto wollte aber anstatt von Leuchtgas flüssige Stoffe verwenden. Zu diesem Zweck erfand er den Vorläufer des heutigen Vergasers. 1873 gründete Otto und Langen die „Deutz-Maschinenwerke“, in denen Otto-Motoren gebaut und gut verkauft wurden.

Gottlieb Daimler, technischer Direktor dieser Fabrik war mit Ottos Konstruktion noch immer nicht zufrieden. So gab es oft Streit zwischen den beiden. Schließlich kündigte Daimler und machte sich mit dem Konstrukteur des Otto- Werkes, Wilhelm Maybach selbstständig. Wenig später hatten sie einen schönen kompakten und schnell drehenden Motor mit 750 Umdrehungen in der Minute und Glührohrzündung.

**Abbildung 2: Daimler Motorrad<sup>3</sup>**



Im Gegensatz zu Otto, der sein Gas- Luft- Gemisch bei offener Flamme zündete, benutzte Daimler eine kleine Platinröhre, die wie die Zündkerze heute seitlich in den Verbrennungsraum hineinragte. Das Gemisch gelangte unter Druck in das Röhrchen und entzündete sich.

1883 erhielt Daimler für seine Erfindung, welche inzwischen schon mit Benzin gelaufen ist, ein Patent. Danach stellte sich Daimler selbst die große Aufgabe sein Patent mit einem Fahrzeug zu verbinden.

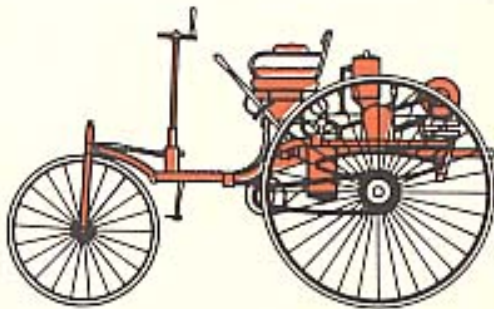
1885 baute er seine Erfindung in ein Zweirad eigener Konstruktion primitiver Art ein.

„Daimlers Petroleum- Wagen“ – so hieß dieses Gefährt offiziell - hat funktioniert. Im November 1885 fuhr Daimlers Sohn Paul drei Kilometer mit diesem Vehikel. Das gilt heute als die Weltpremiere des Motorrades.

Den Übergang vom Zwei- zum Dreirad also vom Motorrad zum Auto vollzog nicht Daimler sondern Karl Benz. Benz gründete nach dem Studium an der TH Karlsruhe eine „Mechanische Werkstatt“ in Mannheim.

Benz' erster Eigenbau war dazu bestimmt Wasserpumpen, Drehbänken oder Bohrmaschinen anzutreiben. Die Zündung der Motoren ist vergleichbar mit der heutigen, mit Batterie, Verteiler und Zündkerze.

Abbildung 3: Benz Patent- Motorwagen<sup>4</sup>



Benz Patent-Motorwagen, 1886  
1 Zylinder, Bohrung 91,4 mm  
Hub 150 mm, 0,99 l  
0,66 kW bei 400 1/min, 15 km/h

Auch er wollte gleich wie Daimler ein Fahrzeug für seinen Motor bauen. Dieses Fahrzeug hatte drei Räder war auch noch sehr primitiv gehalten.

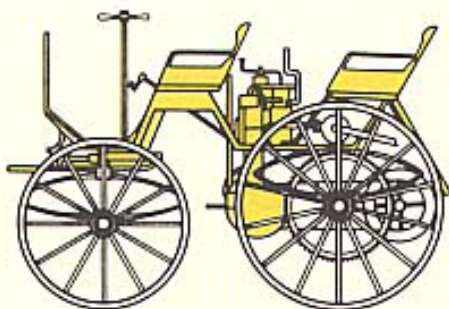
Benz war mit seiner Erfindung aber noch nicht zufrieden und bastelte und probierte immer wieder Neues. Mit seinem 15- Jahre alten Sohn bestand dieses Fahrzeug mit Bravour die erste Fern- und Zuverlässigkeitsfahrt. Es führte sogar soweit, dass das Großherzoglich-Badische Bezirksamt Benz einen Führerschein ausstellte. Das war der absolut erste Führerschein der Welt.

Im den folgenden Jahren wurden die

Fahrzeuge von Benz und Daimler immer ähnlicher, obwohl keiner der beiden irgendeinen Bezug zum anderen hatte. Daimler und Benz gingen zum Vierradwagen über.

Inzwischen hatten Bosch die Zündkerze, Maybach den Vergaser in seiner heutigen Form und Dunlop den Luftreifen erfunden. Alle drei Erfindungen wurden von Daimler und Benz in ihren Fahrzeugen verwendet.

Abbildung 4: Daimler Motorwagen<sup>5</sup>



Daimler Motorwagen, 1886  
1 Zylinder, Bohrung 70 mm  
Hub 120 mm, 0,46 l  
0,8 kW bei 600 1/min, 18 km/h

Den richtigen Aufschwung erlebte das benzingetriebene Fahrzeug erst mit den Franzosen. Emile Levassor, Mitbesitzer einer Bandsägefabrik in Paris, hatte das Daimler-Modell auf der Weltausstellung gesehen. Er erwarb die Nachbaulizenz und baute einen eigenen Wagen. Dieser wiederum wurde der Prototyp für fast alle Fahrzeuge die je auf der Welt gebaut wurden.

Schließlich fingen die Amerikaner an die modernen Fahrzeuge in ihr Land zu importieren. 1908 führte Henry Ford die Fließbandproduktion für Autos ein. Es war die Geburtsstunde von „Tinny Lizzy“, zu Deutsch Blechlieschen. Dieses Modell wurde fast 19

Jahre lang gebaut. 1927 wurde die Produktion eingestellt, zu dieser Zeit wurden genau 15 007 033 Ford T's verkauft. Ein Rekord welcher erst mit 17.2.1972 von VW-Käfer in Wolfsburg überboten wurde. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts setzte sich die industrielle Autoherstellung durch. Es wurden viele Auto- Werke gegründet,



z.B. 1926 der Zusammenschluss der Firmen Daimler und Benz, 1932 die Gründung der Auto – Union, 1938 die VW-Werke, 1898 baut Opel Kraftfahrzeuge, 1899 Gründung der Fiat-Werke, 1900 die Gründung der Firma Horch und 1916 die Gründung der Bayrischen Motorwerke (BMW). Das Auto wurde endgültig zu dem Massenartikel, den wir heute kennen.

## 2 Physikalische Grundlagen des Motorenbaus

### 2.1 Bedeutung der Wärmelehre im Maschinenbau

Verbrennungsmotoren sind Wärmekraftmaschinen, die Wärme teilweise in mechanische Arbeit umwandeln. Die chemische Energie des Kraftstoffs (Benzin, Diesel, Gas, etc.) liefert bei Verbrennung mit Luft Wärme. Dabei kommt es zu einer Expansion des erhitzten Verbrennungsgases. Das expandierende Gas verrichtet an einem Kolben oder einer Turbine mechanische Arbeit. Die Wärmelehre liefert Modelle und Gleichungen, mit denen diese Vorgänge mathematisch erfasst werden können.

### 2.2 Die Hauptsätze der Wärmelehre

Sind die Grundlage für die mathematische Beschreibung der Wärmekraftmaschinen.

#### 2.2.1 Der erste Hauptsatz der Wärmelehre

Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik ist eine besondere Form des Energieerhaltungssatzes. Wenn man einem abgeschlossenen System eine bestimmte Menge Wärmeenergie zuführt, so wird gleichzeitig an diesem System eine äußere Arbeit verrichtet. Bei diesem Prozess nimmt die innere Energie dieses Systems um die Summe aus zugeführter Wärmeenergie und verrichteter äußerer Arbeit zu. Die innere Energie umfasst alle Energiearten, die in einem abgeschlossenen System auftreten. Mit anderen Worten ausgedrückt, bleibt die Summe der Energie in einem abgeschlossenen System konstant.

In jeder Maschine wird eine bestimmte Energiemenge in Arbeit umgewandelt. Eine hypothetische Maschine, die keine Energie für die Verrichtung von Arbeit benötigt, wird als ein Perpetuum mobile der 1. Art bezeichnet. Nach dem Energieerhaltungsgesetz kann es eine solche Maschine nicht geben.

Beobachtungen zeigen, dass sich die innere Energie eines Systems durch Zufuhr von Wärme oder Arbeit verändern lässt. Betrachtet man ein ideales Gas (besteht aus einatomigen Teilchen, die einander nicht beeinflussen), das in einem Zylinder eingeschlossen ist, so kann sein Zustand mathematisch beschrieben werden durch die so genannten Zustandsgrößen  $p$  (bar),  $V$  ( $m^3$ ),  $T$  (K) und  $U$  (J). Es gilt die allgemeine Gasgleichung:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

mit der Gaskonstanten  $R = 8,3 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$ , der Stoffmenge  $n$  (mol), dem Druck  $p = F/A$  (bar), dem Gasvolumen  $V$  und der absoluten Temperatur  $T$  (K)

Weiters gilt der erste Hauptsatz der Wärmelehre:

$$\Delta U = W + Q$$



Mit  $u$  = innere Energie,  $W$  = Volumenarbeit (Kompressionsarbeit) und  $Q$  = Wärmemenge

### 2.2.2 Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre

Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik beinhaltet eine genaue Definition einer Eigenschaft, die als Entropie bezeichnet wird. Die Entropie ist ein Maß für die Unordnung eines Systems. Wenn ein abgeschlossenes System den Zustand der maximalen Entropie angenommen hat, kann es sich nicht mehr ändern: Es hat den Gleichgewichtszustand erreicht. Der Zustand größter Entropie ist also der wahrscheinlichste Zustand. Die Natur scheint also Unordnung oder Chaos vorzuziehen. Eine Maschine, die unter Verletzung des 2. Hauptsatzes Arbeit verrichten würde, wird als Perpetuum mobile der 2. Art bezeichnet, da sie z. B. ständig Wärme aus einer kalten Umgebung entnehmen könnte, um in einer warmen Umgebung Arbeit zu verrichten. Zur mathematischen Beschreibung dieser Tatsache definiert man den Begriff Entropie  $\Delta S$  folgendermaßen:

$$\Delta S = Q / T$$

Dies ist die mathematische Formulierung des 2. Hauptsatzes der Wärmelehre.

## 2.3 Motoren und Zustandsänderungen bei Gasen

### 2.3.1 Zustandsänderungen

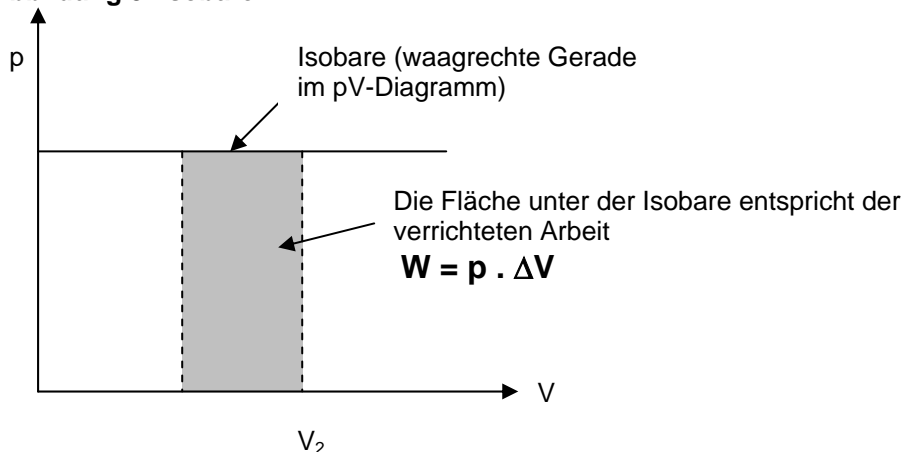
Ausgehend von der allgemeinen Gasgleichung und den Hauptsätzen der Wärmelehre kann man alle Änderungen der Zustandsgrößen  $p$ ,  $V$ , und  $T$  in so genannten Zustandsdiagrammen (=  $pV$ -Diagrammen) darstellen. Wendet man diese Darstellung auf die Vorgänge im Motor an, so spricht man von Arbeitsdiagrammen.

### 2.3.2 Die isobare Zustandsänderung

Ist ein Vorgang, der bei konstantem Druck abläuft. Mathematisch ausgedrückt:

$$p = \text{const.} \\ \Rightarrow V = \text{const.} \cdot T$$

Abbildung 5: Isobare



Der Energieaustausch erfolgt durch Arbeit und Wärme:

$$\Delta U = W + Q$$

Die isobare Zustandsänderung heißt auch Gesetz von Charles.

### 2.3.3 Die isotherme Zustandsänderung

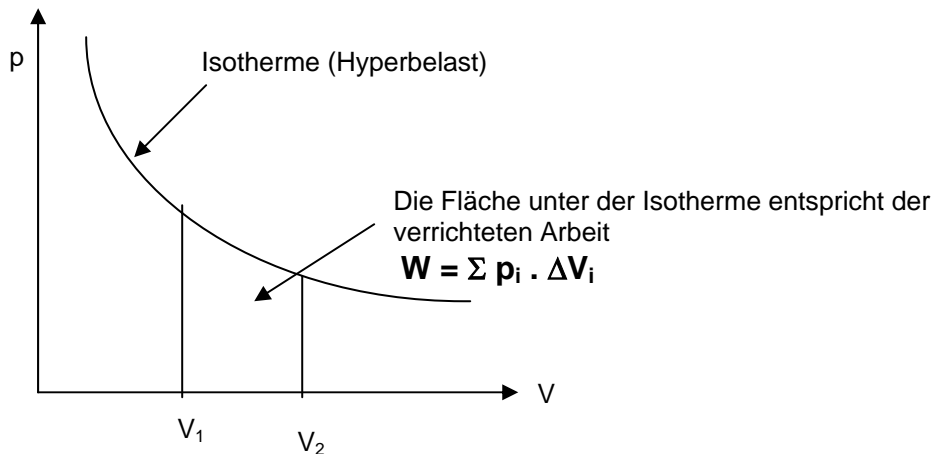
Ist ein Vorgang, der bei konstanter Temperatur abläuft. Mathematisch ausgedrückt:

$$T = \text{const.}$$

$$\Delta T = 0$$

$$p \cdot V = \text{const.}$$

Abbildung 6: Isotherme Zustandsänderung



Da sich die Temperatur des Gases nicht ändert, erfolgt kein Energieaustausch durch Arbeit und Wärme:

$$\Delta U = W + Q = 0$$

Die isotherme Zustandsänderung heißt auch Gesetz von Boyle-Mariotte.

### 2.3.4 Die isochore Zustandsänderung

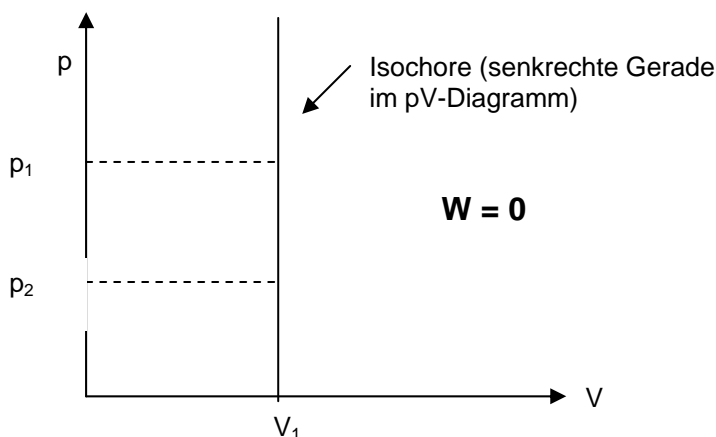
Ist ein Vorgang, der bei konstantem Volumen abläuft. Mathematisch ausgedrückt:

$$V = \text{const.}$$

$$\Delta V = 0$$

$$p = \text{const. } T$$

Abbildung 7: Isochore Zustandsänderung



Es wird keine Arbeit verrichtet. Änderungen der inneren Energie kommen daher nur durch Austausch von Wärme zustande.

$$\Delta U = Q$$

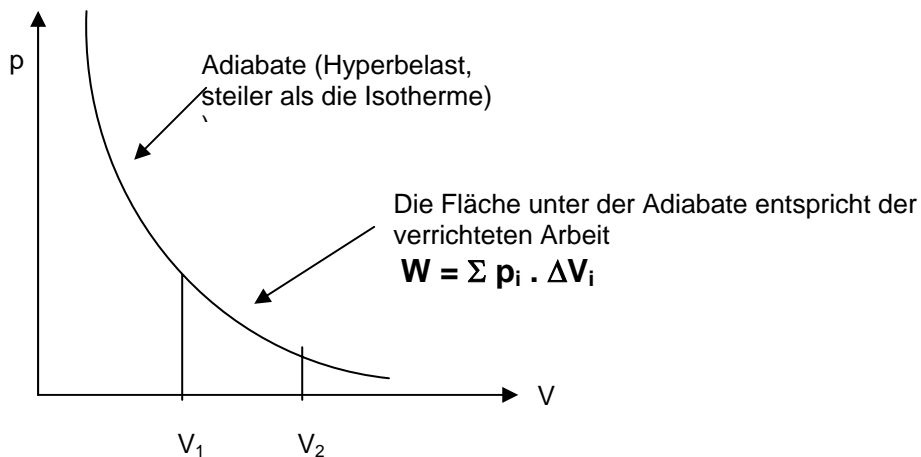
Die isochore Zustandsänderung heißt auch Gesetz von Gay-Lussac.

### 2.3.5 Die adiabatische Zustandsänderung

Ist ein Vorgang, der bei dem keine Energie in Form von Wärme fließt. Mathematisch ausgedrückt:

$$Q = 0$$

Abbildung 8: Adiabatische Zustandsänderung



Die innere Energie ändert sich nur durch die verrichtete Volumsarbeit:

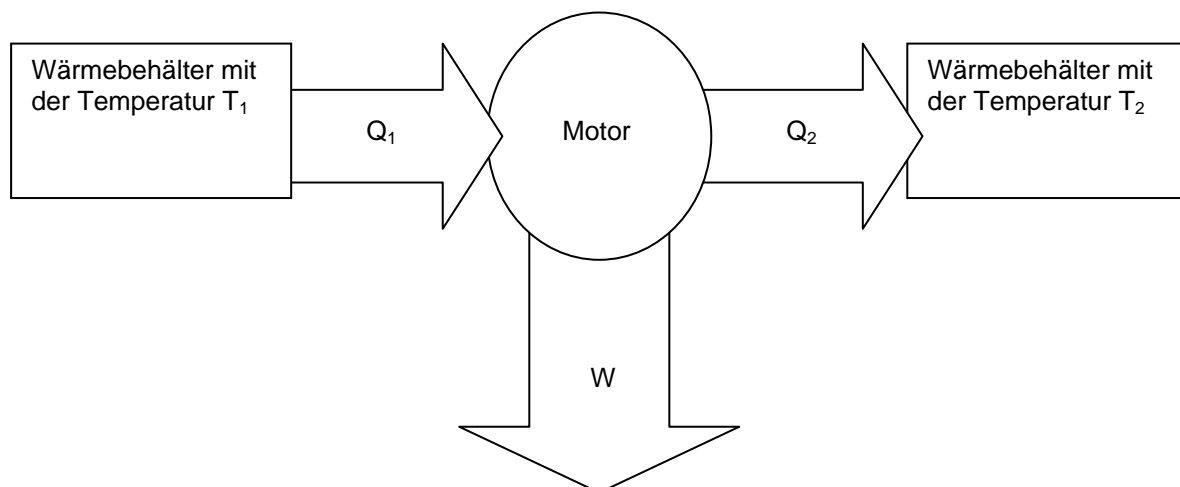
$$\Delta U = W$$

## 2.4 Wirtschaftlichkeit von Motoren

### 2.4.1 Energiefluss bei Motoren

Den Energiefluss in einem Motor kann man graphisch folgendermaßen darstellen:

Abbildung 9: Energieflussdiagramm



Aus der Abbildung kann man folgendes herauslesen:

$$W = Q_1 - Q_2 \text{ (Energieerhaltung)}$$

## 2.4.2 Der Wirkungsgrad $\eta$

ist das Verhältnis von Nutzenergie  $W$  zu hineingesteckter Primärenergie (Wärme  $Q_1$ ).

$$\eta = W / Q_1$$

Da sich Wärme nie vollständig in Arbeit umwandeln lässt, ist der Wirkungsgrad  $\eta$  stets kleiner als 1 (100%). Setzt man für  $W = Q_1 - Q_2$  ein, so folgt:

$$\eta = Q_1 - Q_2 / Q_1 = 1 - Q_2 / Q_1$$

Da sich die umgesetzten Wärmemengen verhalten wie die zugehörigen Temperaturen, gilt  $Q_2 / Q_1 = T_2 / T_1$ . Daraus folgt:

$$\eta = 1 - Q_2 / Q_1 = 1 - T_2 / T_1$$

Der maximale Wirkungsgrad ist daher:

$$\eta = 1 - T_2 / T_1$$

Für den 4-Takt Ottomotor liegt der maximale Wirkungsgrad zwischen 25% und 30%.

## 2.4.3 Kenndaten von Motoren

Beschreiben die Charakteristik (Wesensart) eines Motors<sup>6</sup>. Die meisten Kenndaten geben Auskunft über Leistung und Elastizität (Belastbarkeit) eines Motors. Man unterscheidet:

### Hubraumleistung

Die Hubraumleistung (Literleistung) vergleicht die Leistung von Motoren mit verschiedenen großen Hubräumen. Die effektive Leistung wird auf einen Liter Gesamthubraum<sup>7</sup> bezogen.

### Drehzahl

Ist die Zahl der Umdrehungen der Kurbelwelle = Zahl der Auf- und Abbewegungen des Kolbens

### Verdichtungsverhältnis

Das Verdichtungsverhältnis ist das Verhältnis des gesamten Zylinderraumes vor der Verdichtung zum verbliebenen Raum nach der Verdichtung<sup>8</sup>.

### Drehmoment des Motors

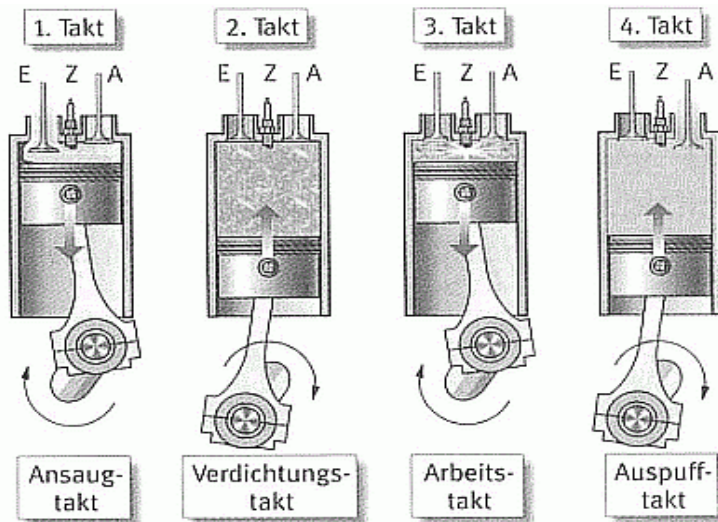
Ist das Vermögen gegen einen Widerstand zu beschleunigen. Das Drehmoment bestimmt die Elastizität des Motors

# 3 Der Viertaktmotor

## 3.1.1 Funktionsweise

Ein Viertaktmotor besteht aus 4 Zylindern, die der Reihe nach 4 Takte durchlaufen. Im 1. Takt wird durch das offene Einlassventil E das Benzin/Luftgemisch (Gasgemisch) aus dem Vergaser angesaugt. Im 2. Takt sind beide Ventile geschlossen und das Gemisch wird verdichtet (komprimiert). Im 3. Takt sind beide Ventile geschlossen und das Gemisch wird durch den Funken der Zündkerze gezündet. Das Gemisch expandiert und verrichtet am Kolben Arbeit. Im 4. Takt werden die verbrannten Gase durch das offene Auslassventil entfernt und der Prozess (=Kreisprozess) beginnt von vorne (s. a. Brockhaus-Film Verbrennungsmotoren).

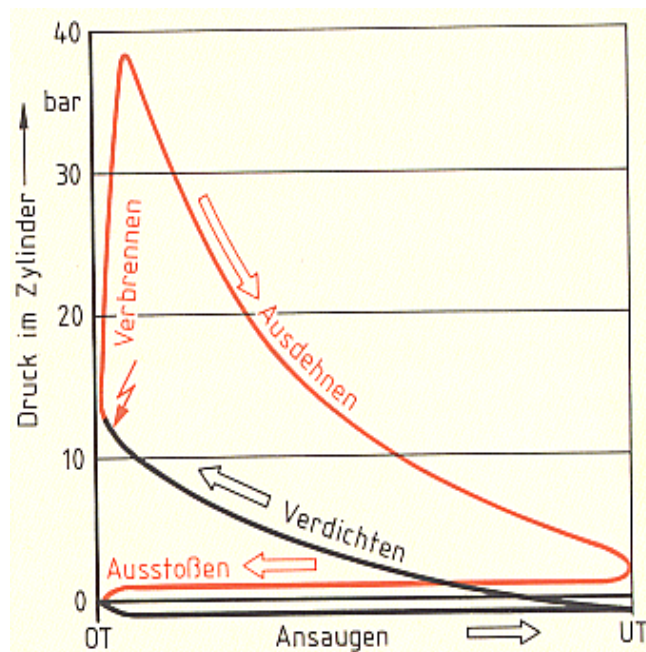
Abbildung 10: Viertaktottomotor



### 3.1.2 Arbeitsdiagramm des 4-Takt Ottomotors

Beim Ottomotor kommt es im 2. Takt zu einer adiabatischen Kompression, d.h. es fließt keine Wärmeenergie:  $Q=0$ ,  $\Delta U = W$ , d.h. die innere Energie des Gases ändert sich nur auf Grund von Volumsarbeit. Bei der Explosion des Treibstoffes kommt es zu einer isochoren Wärmezufuhr, d. h.  $V=\text{konst.}$ , d.h. Die innere Energie ändert sich nur durch Wärmeaustausch (Wärmezufuhr  $p, T$ , Wärmeabgabe  $p, t$ ). Es wird keine Arbeit verrichtet. Anschließend kommt es zur adiabatischen Expansion ( $Q=0$ ,  $\Delta U = W$ ) und zum Schluss erfolgt eine isochore Wärmeabgabe ( $V=\text{konst.}$ , Auspuff- und Ansaugtakt).

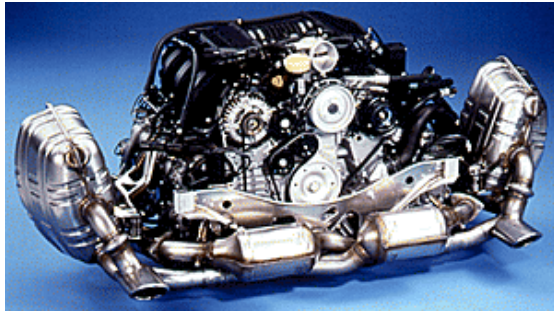
Abbildung 11: Arbeitsdiagramm des Viertaktotomotors



Eine gute Simulation<sup>9</sup> dieser Vorgänge findet man im Internet.

## 4 Der Boxermotor

Abbildung 12: Boxermotor



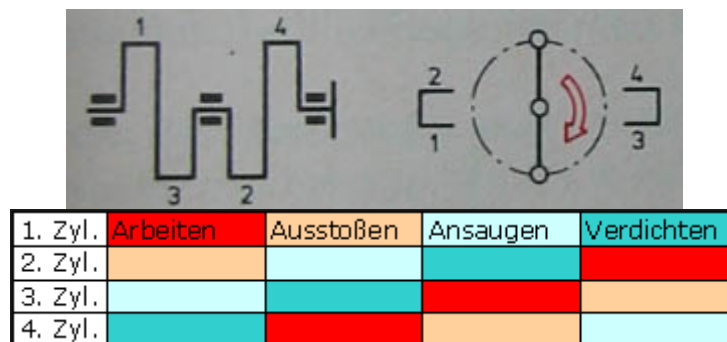
### 4.1 Aufbau des Boxermotors

Ein Boxermotor ist ein Viertaktmotor, bei dem sich die Zylinder flach zu beiden Seiten der Kurbelwelle in einer Ebene leicht versetzt gegenüber liegen. (Zylinderbankwinkel 180°) Jeder Zylinder besitzt eine eigene Kröpfung an der Kurbelwelle. Daher genügen beim Vierzylinder-Boxermotor beispielsweise drei Kurbelwellenlager. Diese Bauweise erlaubt eine kürzere Ausführung der Kurbelwelle als beim Reihenmotor. Dadurch verfügt der Boxermotor über eine hervorragende Laufruhe, höchste Zuverlässigkeit und einen niedrigen Schwerpunkt (Unterflurmotor).

### 4.2 Arbeitsweise des Boxermotors

Die Bezeichnung der Zylinder an Mehrzylinder-Motoren beginnt stets an der der Kraftabgabe gegenüberliegenden Seite des Motors. Bei einem Boxermotor liegt der erste Zylinder in der linken Zylinderreihe und der Kraft abgebenden Seite gegenüber. Die Zylinder werden in der Reihe fortlaufend gezählt. In der im Uhrzeigersinn folgenden Reihe wird weitergezählt. Die folgende Abbildung zeigt den Ablauf der Arbeitstakte des Vierzylinder-Boxermotors.

Abbildung 13: Vierzylinder Boxermotor



Zündabstand: 180° Zündfolge: 1-4-3-2 oder 1-2-3-4  
1 Arbeitstakt je halber Kurbelwellenumdrehung

### 4.3 Vorteile

Der Motor erzeugt kaum Vibrationen, da durch die gegenüberliegende Anordnung der Zylinder die bei der Bewegung der Kolben entstehenden Kräfte wechselseitig

aufgehoben werden. (Massenkräfte 1. und 2. Ordnung werden vermieden.) Das Ergebnis ist ein seidenweicher, runder Lauf des Motors.

Ein weiterer Vorteil ist, dass durch die horizontale Anordnung der Ein- und Auslasskanäle der Boxermotor sehr niedrig gebaut werden kann und durch seine beiden gleichschweren Zylinderreihen sehr gut ausbalanciert ist. Daraus resultiert ein tiefer Schwerpunkt und es lässt sich ein symmetrisches Fahrwerkskonzept realisieren.

#### 4.4 Nachteile

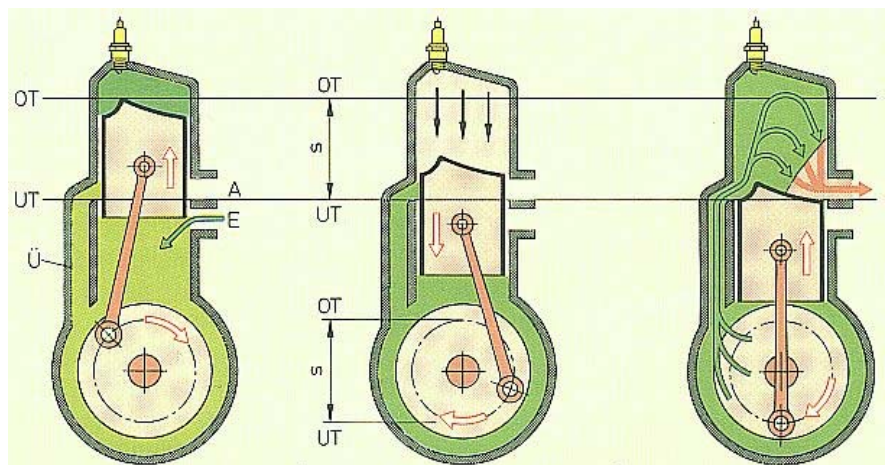
Ein Nachteil ist der hohe Bauaufwand durch zwei Zylinderköpfe.

Der Motor ist wegen seiner großen Baubreite ungeeignet für einen Quereinbau.

## 5 Der Zweitaktmotor

### 5.1 Aufbau des Zweitaktmotors

Abbildung 14: Aufbau eines Zweitaktmotors



Zeichenerklärung:

E = Einlasskanal  
A = Auslasskanal  
Ü = Überstromkanal  
OT = oberer Totpunkt  
UT = unterer Totpunkt

| Ablauf der Vorgänge                       | OT → UT                 | UT → OT            | Gaswechsel               |
|---|-------------------------|--------------------|--------------------------|
| Oberhalb des Kolbens im Zylinder          | verdichten              | Zünden<br>Arbeiten | Spülen<br>Ausstoßen      |
| Unterhalb des Kolbens in der Kurbelkammer | Voransaugen<br>Ansaugen | Vorverdichten      | Überströmen zum Zylinder |

### 5.2 Arbeitsweise des Zweitaktmotors

1.

**Takt**

Das komprimierte Benzin-Luft-Gemisch wird gezündet und dadurch der Kolben nach unten gedrückt. Dabei verschließt der Kolben den Einlasskanal E. Jetzt wird das Gemisch im Kurbelgehäuse vorverdichtet (leicht komprimiert). Kurz vor dem unteren Totpunkt werden der Überströmkanal und der Auslasskanal A freigegeben. Da das



Gemisch im Kurbelgehäuse unter Druck steht, werden die Verbrennungsgase aus dem Zylinder gedrückt und entweichen - der Zylinder wird mit dem Gemisch gefüllt.

## **2. Takt**

Der Kolben bewegt sich wieder nach oben. Der Überströmkanal und der Auslasskanal A werden wieder verschlossen, das Gemisch im Zylinder wird komprimiert. Gleichzeitig wird im Kurbelgehäuse frisches Benzin-Luft-Gemisch angesaugt.

Durch eine Kurbelwelle wird die Auf- und Abbewegung in eine Drehbewegung umgesetzt.

## **5.3 Spülverfahren:**

### **5.3.1 Querstromspülung:**

Bei der Querstromspülung strömen die Frisch- und Altgase quer durch den Zylinder, weil Überstrom- und Auslassschlitz einander gegenüber liegen. Dieses älteste Spülverfahren erfordert einen Nasenkolben, der die Frischgase nach oben ablenkt. Die Strömung verläuft anfangs entlang der Zylinderwand, dann durch die Zylindermitte, schließlich kann sie durch den Auslassschlitz entweichen.

### **5.3.2 Umkehrspülung:**

Bei der Umkehrspülung liegt je ein Überstromschlitz rechts und links des Auslassschlitzes.

## **5.4 Vor- und Nachteile gegenüber dem Viertaktmotor**

### **5.4.1 Vorteile**

- Der Zweitaktmotor benötigt keine besondere Steuerungs- und Schmiereinrichtung. Dadurch ergeben sich niedrig Herstellkosten und ein geringes Leistungsgewicht.
- Durch Mischungsschmierung ist das Startvermögen auch bei großer Kälte gut.
- Der Zweitaktmotor hat nur wenige, bewegliche Hauptteile (Kolben, Pleuelstange und Kurbelwelle) und verursacht damit geringere Reparaturkosten.
- Zweitaktmotoren sind durch den Fortfall einer besonderen Steuerungs- und Schmiereinrichtung auch in der Wartung anspruchsloser.
- Der Zweitaktmotor hat ein gleichförmiges Drehmoment, das sich durch die doppelte Arbeitstaktzahl ergibt. Besonders bei Einzylindermotoren äußert sich dies in einem besseren Durchzugsvermögen.

### **5.4.2 Nachteile**

- Der Zweitaktmotor hat einen höheren spezifischen Kraftstoff- und Schmierölverbrauch. Die Spülzeit hängt von der Drehzahl ab. Wenn die Drehzahl zu niedrig ist, strömen Frischgase in den Auspuff. Ist sie zu hoch, so bleiben mehr Altgase im Zylinder und die Leistung verschlechtert sich. In beiden Fällen erhöht sich der spezifische Kraftstoffverbrauch. Der Mehrverbrauch an Kraftstoff und damit auch an Schmieröl hängt außerdem stark vom Spülverfahren ab.
- Der Zweitaktmotor hat eine schlechtere Füllung. Bei gleichem Hubraum wird trotz der doppelten Arbeitstaktzahl gegenüber dem Viertakter wegen der schlechteren Füllung infolge des offenen Gaswechsels oft nur die gleiche Leistung, bestenfalls

eine Mehrleistung von etwas 30% erzielt. Je größer der Hub und damit auch der Hubraum, desto schlechter wird die Füllung.

- Der Zweitaktmotor wird höher beansprucht. Durch die doppelte Arbeitstaktzahl wird der Motor heißer und auch mechanisch höher beansprucht. Zündkerzen müssen häufiger gewechselt werden, da größerer Zündkerzenverschleiß auftritt.

## 6 Dieselmotor

### 6.1 Aufbau

Der Dieselmotor ist im Prinzip gleich aufgebaut wie der Ottomotor und besteht aus 4 Baugruppen und zusätzlichen Hilfseinrichtungen:

**Motorgehäuse:** Es besteht aus Zylinderkopphaube, Zylinderkopf, Zylinder, Kurbelgehäuse und Ölwanne

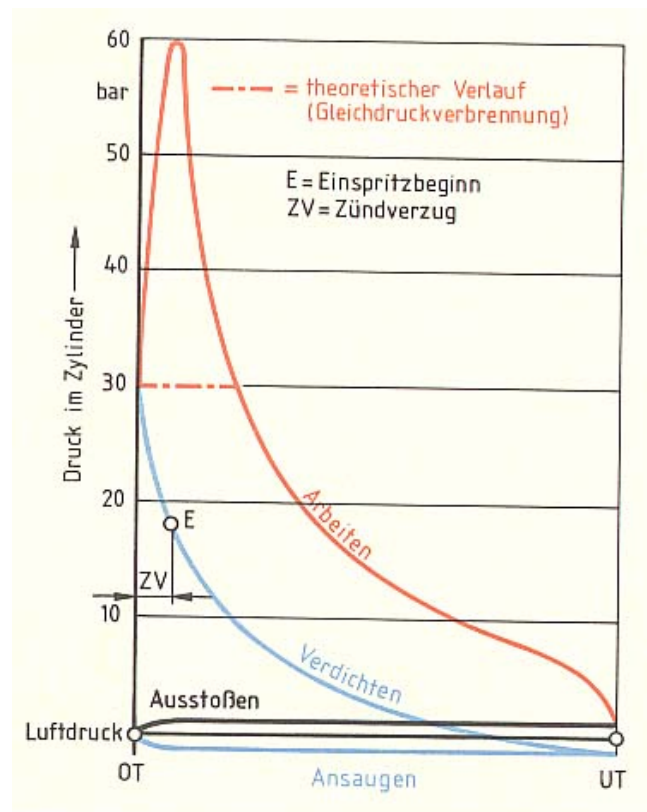
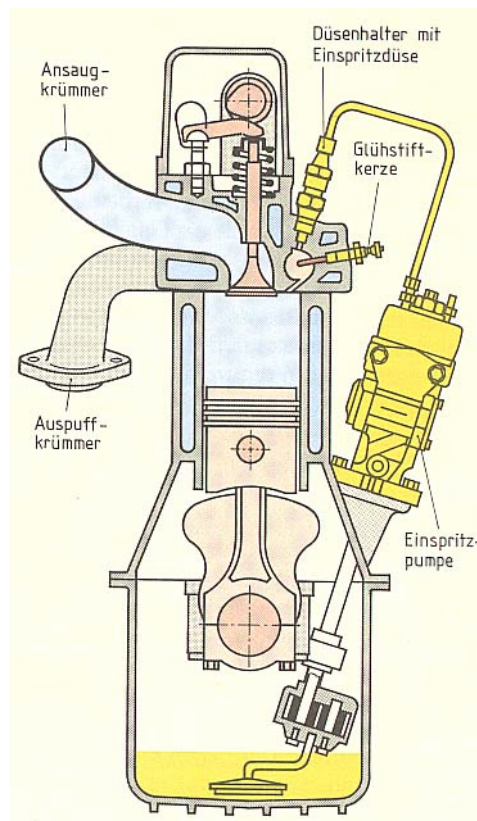
**Kurbeltrieb:** Er besteht aus Koben, Pleuelstange und Kurbelwelle.

**Motorsteuerung:** Sie besteht aus Ventilen, Ventildedern, Schlepp- oder Kipphebeln, oder Tassenstößeln, Nockenwelle, Nockenwellenrad, Steuerkette oder Zahnriemen und Antrieb der Einspritzpumpe

**Einspritzrüstung:** Sie besteht aus Einspritzpumpe mit Regler und Spritzversteller, Kraftstoffpumpe, Kraftstofffilter, Düsenhalter mit Einspritzdüsen

**Hilfseinrichtungen:** Sie bestehen aus Motorschmierung, Motorkühlung, Auspuffanlage und Kaltstarteinrichtung

Abbildung 15: Aufbau und Arbeitsdiagramm des Dieselmotors



## **6.2 Arbeitsweise**

Das Verbrennungsverfahren beim Dieselmotor unterscheidet sich wesentlich von dem beim Otto-Motor:

Beim Dieselmotor wird **nur** Luft angesaugt und hoch verdichtet.

Der Dieselmotor arbeitet stets mit Luftüberschuss.

In die hochverdichtete Luft wird **Kraftstoff** eingespritzt.

Im Dieselmotor werden meist schwersiedende Kraftstoffe mit großer Zündwilligkeit verwendet.

Das **Kraftstoff-Luft-Gemisch** wird erst im Verbrennungsraum gebildet; der Dieselmotor arbeitet also mit innerer Gemischbildung.

Die hochverdichtete Luft ist so heiß, dass sich der eingespritzte Kraftstoff an ihr von selbst entzündet; der Dieselmotor arbeitet also mit Selbstzündung.

Der Dieselmotor hat ein größeres Druckgefälle und ein größeres Temperaturgefälle, daher einen höheren Nutzungsgrad und eine niedrigere Abgastemperatur.

Der Dieselmotor braucht zumindest eine Regelung der Leerlauf- und besonders der Enddrehzahl, da er im Gegensatz zum Benzinmotor auch bei Höchstdrehzahl noch mit mind. 40% Luftüberschuss arbeitet. Sowohl die kleinsten Pkw-Dieselmotoren als auch Schiffsdiesel erreichen einen thermischen Wirkungsgrad von max. 45%.

## **6.3 Einsatzbereich**

Anwendungsbereiche des Dieselmotors liegen im Bereich von Nutzkraftwagen, wo Motoren mit direkter Einspritzung und Turboaufladung verwendet werden. Im Bereich der Personenkraftwagen hat der Anteil an Autos mit Dieselmotor deutlich zugenommen. Hier kommen schnell laufende Dieselmotoren mit Turboaufladung zum Einsatz, die eine Hubraumleistung von ca. 42 kW/l haben. Die Leistung eines Verbrennungsmotors hängt von Hubraum, Drehzahl und mittlerem Gasdruck ab. Die einfachste Leistungssteigerung erhält man durch eine bessere Füllung. Zu diesem Zweck kann man Lader verwenden. Es wird durch die Aufladung des Motors die Füllung erheblich verbessert und damit die Motorleistung gesteigert. Bauarten von Ladern sind zum Beispiel: Abgasturbolader, Druckwellenlader oder Mechanische Lader.

## **6.4 Vorteile des Dieselmotors gegenüber dem Ottomotor**

Abgabe hoher Drehmomente über einen weiteren Drehzahlbereich durch die gleichmäßig gute Füllung und die hohen Verbrennungsstücke

Niedrigere CO- und HC-Emissionen wegen des Luftüberschusses

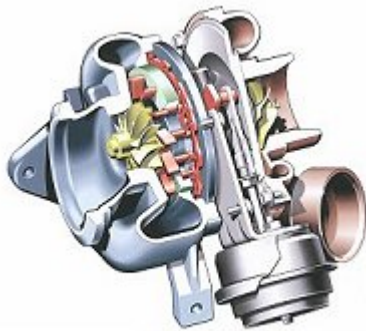
Geringere CO<sub>2</sub>-Ausstoß

Geringerer Kraftstoffverbrauch im Teillastverbrauch

Höherer Nutzwirkungsgrad wegen besserer Energieausnutzung

Niedrigere Abgastemperaturen

## 7 Abgasturbolader



**Abbildung 16: Abgasturbolader**

Turbolader ermöglichen bei Diesel- und Ottomotoren eine Steigerung der Hubraumleistung durch Vergrößerung der Füllung. Bei einem Motor mit Abgasturbolader treiben die Abgase die Turbine und diese den Verdichter an. Der Verdichter übernimmt das Ansaugen und liefert dem Motor eine vorverdichtete Frischgasladung. Ein Ladeluftkühler in der Ladeleitung führt die Verdichtungswärme an die Umgebungsluft ab. Dadurch wird die Zylinderfüllung weiter verbessert.

Der Abgasturbolader besteht aus 4 Hauptteilen: Laufzeug, Lagergehäuse, Turbinen- und Verdichtergehäuse.

Das Laufzeug besteht aus dem Turbinenrad und dem Verdichterrad. Es erreicht je nach Ausführung des Laders Dauerdrehzahlen von 50.000 bis 180.000 1/min.

Die Schmierung und Kühlung der Lader erfolgt über den Motorölkreislauf.

### **7.1 Prinzip einer Abgasturboaufladung**

Der Motor saugt Frischluft über den Luftfilter, den Gemischregler und die Saugleitung an. Durch den Verdichter wird die Frischluft über Druckleitung, Drosselklappengehäuse und Luftverteiler dem Motor zugeführt. Der Abgasstrom des Motors wird über die Sammelleitung zur Turbine und zum Schalldämpfer geleitet. Um den Abgasturbolader den Erfordernissen des Motors anzupassen, wird der Ladedruck der zugeführten Frischluft geregelt. Das in der Abgasleitung eingebaute Ladedruckventil (Bypassventil) regelt den Ladedruck des Verdichters. Dadurch gelangt ein Teil des Abgasstromes über eine Umgehungsleitung (Bypass) direkt zum Schalldämpfer unter Umgehung der Turbine.

Beim Schiebebetrieb ist die Drosselklappe geschlossen, wodurch das Verdichterrad gegen die geschlossene Druckleitung arbeiten würde. Um Beschädigungen des Laders zu vermeiden, ist zwischen Saug- und Druckleitung ein Abblaseventil eingebaut. Öffnet das Abblaseventil durch den bei geschlossener Drosselklappe entstandenen hohen Unterdruck in der Steuerleitung, kann das Verdichterrad Ladeluft in die Saugleitung abblasen. Es entsteht ein Kreislauf um den Verdichter.

### **7.2 Vorteile des Abgasturboladers**

- Die Energie zum Antrieb des Laders wird aus der Restenergie der Abgase gewonnen.
- Durch die bessere Füllung wird eine Leistungssteigerung erreicht. Außerdem beträgt die Leistungsabnahme in größeren Höhenlagen nur 1-2 % pro 1000m

Höhenzunahme gegenüber etwa 10 % beim normalen Saugmotor. Weiters wird auch der Drehmomentverlauf des Motors günstiger.

- Da die größere Leistung bei gleichbleibenden Motorabmessungen und gleicher Motordrehzahl erreicht wird, hat der aufgeladene Motor ein geringeres Leistungsgewicht
- Der spezifische Kraftstoffverbrauch wird im mittleren und oberen Drehzahlbereich kleiner.
- Durch die bessere Verwirbelung der Füllung nimmt auch die Klopfneigung ab.
- Die Schadstoffemission wird verringert
- Abgasturbolader wirken als zusätzliche Schalldämpfer.

## 8 Der Wankelmotor

Wird auch Rotationskolbenmotor, Kreiskolbenmotor, Wankelmotor oder NSU – Motor genannt. Der Wankelmotor wurde vom gleichnamigen Erfinder Felix Wankel (1902 – 1988) in den fünfziger Jahren entwickelt.

Abbildung 17 Felix Wankel<sup>10</sup>



Nach dem ersten Testlauf 1957 war man begeistert, denn der Wankelmotor konnte bis zu einem Drittel leichter als herkömmliche Fahrzeugmotoren sein, da er weniger Zündkerzen, Kolbenringe und andere Maschinenteile benötigte. Im Wankelmotor verwendet man anstatt eines senkrechten Kolbens einen Rotationskolben. 1967 wurde einer der ersten Wankelmotoren gebaut, der NSU RO 80.

Im Vergleich (im Anhang sollte wohl eine Übersichtstabelle mit Kenndaten aller Motoren stehen auf die hier verwiesen wird zu anderen Motoren hat der RO 80 einen Zweischeiben- Kreiskolbenmotor mit einem Kammervolumen  $2 * 497.5 \text{ cm}^3$  und eine Motorleistung von 85 kW bei einer Drehzahl von 5500 Umdrehungen pro Minute. Das maximale Motordrehmoment beträgt 157 Nm bei 4000 Umdrehungen pro Minute. Das Verdichtungsverhältnis ist 9, das Leistungsgewicht beträgt 15.2 kg/kW.

### 8.1 Der Aufbau des Motors

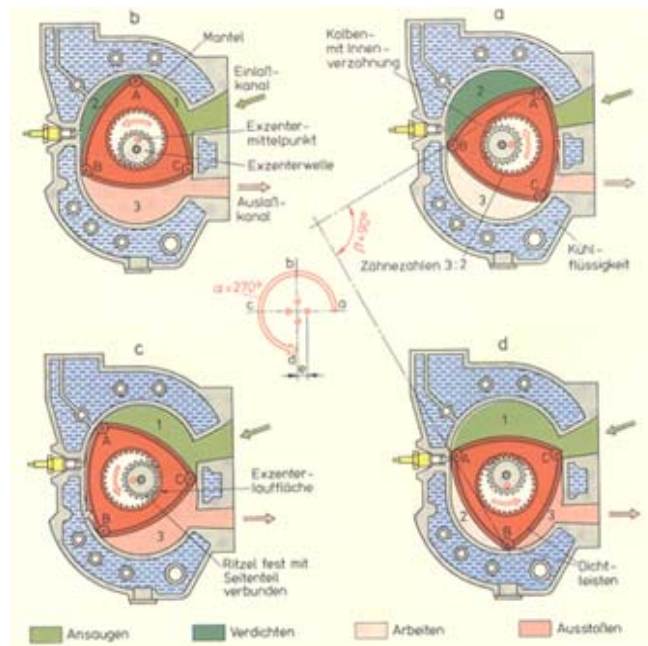
Der Wankelmotor (s.a. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) ist aus 3 Hauptteilen aufgebaut: Gehäuse, Mittelteil mit Läufer bzw. Mantel, Excenterwelle und Läufer mit Dichtelementen.

Der Mantel des Wankelmotors ist wassergekühlt und hat eine Querschnittsform, die einer Acht ähnlich ist (Epitrochoidenkurve). Er hat auf einer Seite einen Einlasskanal und auf der anderen Seite einen Auslasskanal, dem die Zündkerze gegenüber liegt. Der Mantel besteht aus Leichtmetall und konzentrisch zur Mantelmitte befindet sich das Ritzel.

Die Excenterwelle geht durch die Mitte des Mantels, die in den Seitenteilen gelagert ist. Der Kolben, der auch Scheibe genannt wird gleicht einem Bogendreieck und dreht sich auf dem mit der Excenterwelle fest verbundenen Excenter.



Abbildung 18: Der Wankelmotor



Durch die Dichtelemente ist der Kolben zum Mantel vollständig abgedichtet. Die Innenverzahnung des Kolbens arbeitet mit der Excenterwelle zusammen. Damit wird der Kolben gesteuert und nimmt die richtige Bewegungsphase an. Dies erreicht man durch ein Verhältnis der Zähnezahlen des feststehenden Ritzels zu denen des Kolbens von 2:3.

## 8.2 Die Arbeitsweise

Der Wankelmotor ist eine Dreikammermaschine deren Kammern während der Kolbenbewegung immer vergrößert oder verkleinert werden. Ein Arbeitsspiel hat aber vier Takte: Ansaugen, Verdichten, Arbeiten und Ausstoßen.

In Kammer 1 findet das Ansaugen des Luftgemischs statt. In Kammer 2 wird gleichzeitig verdichtet und die Entzündung erfolgt. Nun bewegt sich der Kolben und stützt sich mit seiner Innenverzahnung am Ritzel ab und übt eine Drehkraft auf die Excenterwelle aus. Gleichzeitig wird in Kammer 3 das Arbeiten und das Ausstoßen vollzogen. Die Aufgabe der Excenterwelle kann damit mit derjenigen der Pleuellwelle gleich gesetzt werden.

## 8.3 Vorteile des Wankelmotors

- Nur 2 rotierende Hauptteile (Kolben u. Excenterwelle)
- Große Laufruhe, da der Kolben ausgewuchtet ist
- Weniger Bauteile und geringere Baugröße als bei Hubkolbenmotoren vergleichbarer Leistung und dementsprechend weniger Gewicht
- Niedriges Leistungsgewicht
- Kraftstoffunempfindlichkeit (Oktanzahlbedarf), Betrieb mit Normalbenzin
- Unverengte Gasquerschnitte gegenüber Motoren mit Ventilsteuerung
- Keine Bauteile für Motorsteuerung, da der Gaswechsel vom Kolben über Schlitze gesteuert wird

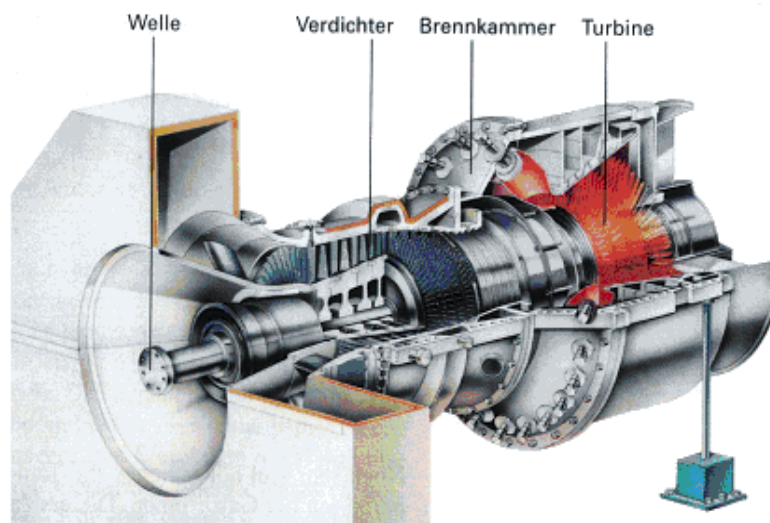
## 9 Die Gasturbine

Die Gasturbine ist eine Wärmekraftmaschine, in der die Strömungsenergie heißer Gase ausgenutzt wird. Die Abgasturbine dagegen ist nur eine Hilfsmaschine, die zur Ausnutzung der Abgasenergie von Kolbenmotoren dient. Sie besteht aus Verdichter

### 9.1 Brennkammer und Arbeitsweise

Aus der Umgebung angesaugte Luft wird im Verdichter komprimiert und anschließend der Brennkammer zugeführt, wo unter der Zugabe von Brennstoff (Gas, Öl oder vergaste Kohle) eine Verbrennungsreaktion stattfindet. Das durch die Verbrennung entstehende Rauchgas wird in einer Turbine entspannt. Die Turbine treibt einerseits den Verdichter und andererseits den für die Stromerzeugung notwendigen Generator an. Das Abgas verlässt mit einer Temperatur von ungefähr 400-600 °C die Turbine und tritt beim einfachen Gasturbinenprozess ohne weitere Nutzung ins Freie. Will man diese Wärme noch zusätzlich nutzen, so benötigt man im allgemeinen einen Wärmetauscher, welcher die Wärmeenergie auf ein anderes Turbine. Medium (meist Wasser) überträgt. Es gibt dafür eine Möglichkeit, die im Folgenden näher beschrieben werden.

Abbildung 19: Gasturbine<sup>11</sup>



### 9.2 Gasturbinenprozess mit Wärmerückwirkung

Bei diesem Prozess wird der Wärmeinhalt der Turbinenabgase vollständig zur Bereitstellung von Wärme verwendet. Diese Wärme steht nun für Heizzwecke, Trocknungsprozesse oder sonstige Prozesse (z.B. Absorptionskälteanlagen), bei denen Wärme benötigt wird, zur Verfügung, vor allem bei der Erzeugung elektrischer Leistung und Wärme ab ~ 30 kW.





## 11 Abbildungsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Abbildung 1: Marcus Wagen.....</i>                                 | <i>6</i>  |
| <i>Abbildung 2: Daimler Motorrad.....</i>                             | <i>6</i>  |
| <i>Abbildung 3: Benz Patent- Motorwagen .....</i>                     | <i>7</i>  |
| <i>Abbildung 4: Daimler Motorwagen.....</i>                           | <i>7</i>  |
| <i>Abbildung 6: Isotherme Zustandsänderung.....</i>                   | <i>10</i> |
| <i>Abbildung 7: Isochore Zustandsänderung .....</i>                   | <i>10</i> |
| <i>Abbildung 8: Adiabatische Zustandsänderung .....</i>               | <i>11</i> |
| <i>Abbildung 9: Energieflussdiagramm .....</i>                        | <i>11</i> |
| <i>Abbildung 10: Viertaktmotor .....</i>                              | <i>12</i> |
| <i>Abbildung 11: Arbeitsdiagramm des Viertaktmotors.....</i>          | <i>13</i> |
| <i>Abbildung 12: Boxermotor .....</i>                                 | <i>14</i> |
| <i>Abbildung 13: Vierzylinder Boxermotor .....</i>                    | <i>14</i> |
| <i>Abbildung 14: Aufbau eines Zweitaktmotors.....</i>                 | <i>15</i> |
| <i>Abbildung 15: Aufbau und Arbeitsdiagramm des Dieselmotors.....</i> | <i>17</i> |
| <i>Abbildung 16: Abgasturbolader .....</i>                            | <i>17</i> |
| <i>Abbildung 17 Felix Wankel.....</i>                                 | <i>17</i> |
| <i>Abbildung 18: Der Wankelmotor.....</i>                             | <i>17</i> |
| <i>Abbildung 19: Gasturbine .....</i>                                 | <i>17</i> |
| <i>Abbildung 20: Prinzip mit Wärmerückwirkung<sup>9</sup> .....</i>   | <i>17</i> |

## 12 Literatur

---

- <sup>1</sup> **Hans Reichardt:** Das Auto, Hamburg 1974 , 14
- <sup>2</sup> **Rolf Gscheidle, et. al.:** Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik, Wien 1994, 204
- <sup>3</sup> **Rolf Gscheidle, et. al.:** Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik, Wien 1994, 204
- <sup>4</sup> **Rolf Gscheidle, et. al.:** Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik, Wien 1994, 204
- <sup>5</sup> **Rolf Gscheidle, et. al.:** Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik, Wien 1994, 204
- <sup>6</sup> **Rolf Gscheidle, et. al.:** Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik, Wien 1994
- <sup>7</sup> <http://www.kfz-tech.de/Formelsammlung/Hubraumleistung.htm>
- <sup>8</sup> <http://www.kfz-tech.de/Formelsammlung/Verdichtungsverhaeltnis.htm>
- <sup>9</sup> <http://techni.tachemie.uni-leipzig.de/otto/index.html> .
  
- <sup>10</sup> Microsoft Encarta Professional 2000
- <sup>11</sup> [www.energytech.at](http://www.energytech.at)