

jedoch durch Gasbetrieb ersetzt, dann stehen etwa 40%, also 1700000 cbm Gas pro Stunde, bezw. eine Leistung von rund 486 000 PS_e für andere Zwecke zur Verfügung. Was von dieser Kraftreserve im Walzwerkbetriebe, wenn solcher mit der Hohofenanlage vereint sein sollte, nicht verwendet wird, kann zu Beleuchtungszwecken verwendet oder für solche und andere Betriebszwecke an andere industrielle Anlagen abgegeben werden. Bisher hat man die Gichtgasmaschinen zumeist zum direkten Antrieb von Gebläsemaschinen und Pumpen, sowie an erster Stelle von Dynamomaschinen verwendet, da sich der Gasmotor speziell dem letzteren Betriebe vorzüglich anpaßt und hierdurch auch die Möglichkeit gegeben ist, überschüssige Energie auf weite Entfernungen wirtschaftlich vorteilhaft ausnützen zu können.

228. Die Arbeitsprozesse der Gasmaschinen. Obwohl derzeit hunderte verschiedener Gasmaschinenkonstruktionen bestehen, so sind doch die wesentlichen Unterschiede derselben nicht groß und lassen sich sämtliche Maschinen nach der Art ihres Arbeitsvorganges in wenige klar gekennzeichnete Guppen teilen und zwar in Maschinen, bei welchen die Entzündung

- I. ohne vorhergegangene Verdichtung bei konstantem Volumen,
- II. bei konstantem Volumen und vorhergegangener Verdichtung, und
- III. bei vorhergegangener Verdichtung und konstantem Drucke stattfindet.

Die wesentlichen Eigenschaftlichen sowie die Arbeitsprozesse dieser drei Gruppen, welche zum Teile bereits an früherer Stelle erörtert wurden lassen sich in Kürze wie folgt zusammenfassen bezw. darstellen.

Gruppe I. Der Kolben saugt Gas und Luft, explosionsfähig gemischt, unter atmosphärischem Drucke in den Cylinder; das Einlaßorgan schließt den Cylinder ab, die Ladung wird entzündet und der hierdurch entstehende Druck treibt den Kolben bis an das Ende des Hubes. Während des Kolbenrücklaufes werden die Verbrennungsprodukte genau so ausgestoßen wie der Abdampf einer Dampfmaschine. Durch Wiederholung desselben Arbeitsprozesses auf der anderen Seite des Kolbens erhält man eine doppeltwirkende Maschine; dieselbe ist allerdings nicht doppelt wirkend im Sinne einer Dampfmaschine, nachdem sich der Arbeitsimpuls nicht auf den ganzen Kolbenhub erstreckt.

Der Arbeitsprozeß dieser Maschinen setzt sich somit aus folgenden vier Operationen zusammen:

1. Ladung des Cylinders mit der explosiblen Mischung.
2. Entzündung und Explosion der Ladung.
3. Expansion nach erfolgter Explosion, und
4. Ausstoßen der verbrannten Gase.

Um diesen Arbeitsprozeß durch eine Maschine vollständig durchführen zu können, müßten nachstehende Bedingungen erfüllt werden. Die Spannung der in den Cylinder eintretenden Gase müßte gleich sein dem atmosphärischen Druck; es hätte daher jede Drosselung zu entfallen. Die Explosion müßte im Momente des Cylinderabschlusses augenblicklich erfolgen, damit die Wärmeentwicklung ohne Änderung des Volumens erfolge und der höchste Druck erreicht werde, welcher vermöge des Mischungsverhältnisses erreicht werden kann. Die Expansion müßte soweit getrieben werden, daß der Explosionsdruck auf den Druck der Atmosphäre sinkt und die Ausströmung müßte ohne jeden Gegendruck erfolgen. Außerdem dürfte die Ladung keine Wärme von den Cylinderwandungen aufnehmen, müßte vielmehr bis zum Momente der Entzündung die Temperatur der Atmosphäre besitzen; auch der Cylinder dürfte keine abkühlende Wirkung auf die Gase nach der Explosion ausüben, wie überhaupt die ganze Verbrennungswärme nur durch die Expansion in Arbeit umgesetzt werden dürfte.

Ogleich alle diese Bedingungen für die Erreichung eines vollkommenen Kreisprozesses erfüllt werden müßten, so ist andererseits klar, daß dieselben in Wirklichkeit nur angenähert erfüllt werden können. Drosselung während des Anfangens der Ladung, sowie ein, wenn auch geringer Rückdruck während der Ausströmung, sind unvermeidlich; der Schluß des Einlaßorganes kann mit dem Momente der Explosion nicht zusammenfallen; ebenso wenig wird die Explosion momentan erfolgen, sondern eine gewisse, wenn auch noch so kleine Zeitdauer beanspruchen. Außerdem werden die Gase bei ihrem Eintritte in den Cylinder Wärme von diesem aufnehmen und während der Explosion und Expansion Wärme an denselben abgeben.

Das wirkliche Indikatordiagramm wird daher unter allen Umständen mehr oder weniger von dem theoretischen Diagramm verschieden sein.

Die wichtigsten Vertreter dieser Gruppe sind bekanntlich die beiden Maschinen von Lenoir und Hugon.

Bezeichne W_1 die von der Maschine aufgenommene und W_2 jene Wärmemenge, welche dieselbe nach erfolgter Arbeitsleistung wieder abgibt, dann ist $W_1 - W_2$ die in Arbeit umgesetzte Wärmemenge, vorausgesetzt, daß während des Arbeitsprozesses keine Wärme durch Strahlung, Leitung und andere Ursachen verloren ging.

Der Wirkungsgrad der Maschine, d. i. das Verhältnis der in mechanische Arbeit umgesetzten Wärme zu jener Wärmemenge, welche der Maschine zugeführt wurde, ist daher

$$\eta = \frac{W_1 - W_2}{W_1}.$$

Das Indikatordiagramm einer vollkommenen Maschine dieser Art ist durch Fig. 278 dargestellt.

Die Linie abd ist die atmosphärische Linie und stellt zugleich das vom Kolben zurückgelegte Volumen dar. Der Kolben bewegt sich von a bis b , die Ladung bei atmosphärischem Druck p_0 und der Temperatur der Aussenluft t_0 einnehmend; in b wird die Verbindung mit der Gas- und Luftleitung plötzlich geschlossen und momentan Wärme zugeführt, wodurch Temperatur und Druck, bevor der Kolben Zeit findet das Volumen zu ändern, auf t_1 beziehungsweise p_1 erhöht werden.

Von c , dem Punkte der höchsten Temperatur und Spannung, expandieren die Gase ohne Wärmeaufnahme oder Abgabe, sodaß die Temperatur nur nach Maßgabe der in Arbeit umgesetzten Wärme fällt, bis die Spannung in d wieder jene der Atmosphäre erreicht hat. Die Kurve cd ist daher eine Adiabate.

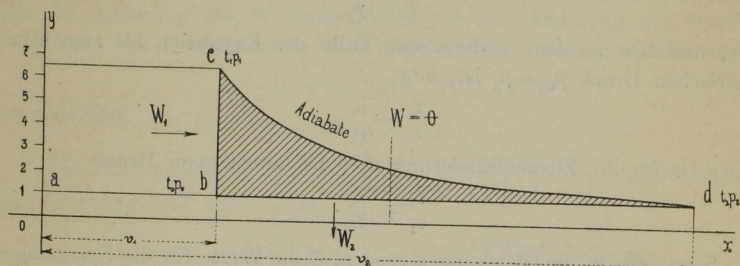


Fig. 278.

Sei ferner T_0 , T_1 und T_2 die absolute Temperatur in den Punkten a bis b , c und d (gleich den Temperaturen t_0 , t_1 und t_2 in $^{\circ}\text{C}$ vermehrt um 273°C).

Bezeichne c_v die spezifische Wärme der Luft bei konstantem Volumen, c_p die spezifische Wärme derselben bei konstantem Druck, dann ist die der Maschine zugeführte Wärme

$$W_1 = c_v (T_1 - T_0);$$

die abgeführte Wärme

$$W_2 = c_p (T_2 - T_0);$$

daher der Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{c_v (T_1 - T_0) - c_p (T_2 - T_0)}{c_v (T_1 - T_0)}.$$

Unter Einführung der bekannten Bezeichnung

$$\frac{c_p}{c_v} = x$$

wird

$$\eta = 1 - x \left(\frac{T_2 - T_0}{T_1 - T_0} \right).$$

Es ist klar, daß für jeden Wert von T_1 auch T_2 einen bestimmten Wert annimmt, welcher mit T_1 entsprechend zu- oder abnimmt. Bei gegebener Beziehung von T_1 zu T_2 ist daher die Berechnung des Wirkungsgrades sehr einfach, da derselbe bei allen Maschinen, welche obigen Kreisprozeß vollkommen erfüllen, nur von der höchsten Temperatur der Explosion abhängig ist.

Für die adiabatische Expansion ist

$$p_1 v_1^x = p_2 v_2^x,$$

wenn allgemein die Endspannung der Expansion mit p_2 bezeichnet wird. Für die Zustandsänderung $b-c$ bei konstantem Volumen besteht die Beziehung

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{p_1}{p_0}$$

oder, nachdem in dem vorliegenden Falle der Expansion bis zum atmosphärischen Druck $p_0 = p_2$ ist, folgt

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{p_1}{p_2};$$

ferner ist für die Zustandsänderung $d-b$ bei konstantem Druck

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_0}.$$

Setzt man in die Gleichung $p_1 v_1^x = p_2 v_2^x$ die Werte für die Spannungen und Volumen ausgedrückt durch die Temperaturen ein, dann erhält man

$$T_1 T_0^x = T_0 T_2^x$$

und daraus die Endtemperatur der adiabatischen Expansion

$$T_2 = T_0 \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^{\frac{1}{x}}$$

ausgedrückt durch die Temperatur der Atmosphäre (Anfangstemperatur) und die höchste Temperatur der Explosion. Führt man diesen Wert in die Gleichung für den Wirkungsgrad η ein, dann ergibt sich

$$\eta = 1 - x \cdot \frac{\left(\frac{T_1}{T_0} \right)^{\frac{1}{x}} - 1}{\left(\frac{T_1}{T_0} \right) - 1}.$$

Für atmosphärische Luft als Arbeitsflüssigkeit ist bekanntlich

$$\frac{c_p}{c_v} = x = 1,408.$$

Die in einer Gasmaschine zur Verbrennung gelangende Mischung aus Gas und Luft unterscheidet sich wesentlich von reiner Luft, daher auch das Verhältnis der spezifischen Wärme bei konstantem Druck zur spezi-

fischen Wärme bei konstantem Volumen ein anderes ist; nachdem jedoch in Wirklichkeit der theoretische Wirkungsgrad durch so viele Umstände beeinflusst wird, welche sich einer genauen rechnerischen Verfolgung entziehen, so erscheint es für das Studium zweckmäßiger, bei dem einfacheren Fall, der Luft als Arbeitsflüssigkeit, zu bleiben.

Für diese und die folgenden Berechnungen des theoretischen Wirkungsgrades sei die Temperatur der Aussenluft mit

$$t_0 = 17^\circ \text{ C, somit } T_0 = 290^\circ$$

und die größte Temperatur der Explosion mit

$$t_1 = 1600^\circ \text{ C, oder } T_1 = 1873^\circ$$

angenommen, eine Temperatur welche in Gasmaschinen häufig vorkommt. Um die Änderung des Wirkungsgrades mit der Änderung der Maximaltemperatur des Kreisprozesses zu zeigen, sei auch die Berechnung für

$$t_1 = 1000^\circ \text{ C, bzw. } T_1 = 1273^\circ$$

durchgeführt.

Die Endtemperatur $T_2 = T_0 \left(\frac{T_1}{T_0}\right)^{\frac{1}{\alpha}} = 290 \left(\frac{1873}{290}\right)^{\frac{1}{1,408}} = 1090^\circ$ absolut. Der Wirkungsgrad wird daher

$$\eta = 1 - \alpha \left(\frac{T_2 - T_0}{T_1 - T_0}\right) = 1 - 1,408 \frac{1090 - 290}{1873 - 290} = 0,29.$$

Der Maximaltemperatur $t_1 = 1600^\circ \text{ C}$ entspricht somit ein Wirkungsgrad

$$\eta = 0,29.$$

Für $t_1 = 1000^\circ \text{ C}$ ergibt sich auf gleiche Weise

$$T_2 = 829^\circ$$

und

$$\eta = 1 - 1,408 \frac{829 - 290}{1273 - 290} = 0,23.$$

In diesem Kreisprozesse nimmt daher der Wirkungsgrad mit zunehmender Explosionstemperatur gleichfalls zu, jedoch nicht in dem Verhältnisse der Temperatursteigerung, indem eine Erhöhung der Maximaltemperatur von 1000° auf 1600° C nur eine Erhöhung des theoretischen Wirkungsgrades von 0,23 auf 0,29 zur Folge hat; es werden daher im ersteren Falle von je 100 W.E. 23, im letzteren Falle trotz der bedeutenden Temperaturerhöhung nur 29 W.E. in Arbeit umgesetzt.

In Wirklichkeit wird jedoch aus rein praktischen Gründen die Expansion nie so weit getrieben, daß die Spannung bis auf jene der Atmosphäre sinkt, bevor sich das Auslaßorgan öffnet. Die Maschinen dieser

Type waren zumeist so angeordnet, daß die Aufnahme der Ladung während der ersten Hubhälfte erfolgte, die Expansion sich daher nur auf den Rest des Hubes erstreckte; die Gase dehnten sich daher während der Expansion nur ungefähr auf das zweifache Anfangsvolumen aus. Bei diesem in Fig. 279 dargestellten Prozesse werden daher die vorhin erörterten besten Bedingungen nicht erfüllt.

Unter Beibehaltung der Bezeichnungen der früheren Figur und Einführung der Temperatur t_3 im Punkt e ergeben sich folgende Gleichungen. Zuführte Wärme $W_1 = c_v (T_1 - T_0)$.

Denkt man sich die Gase mit Ende der Expansion von der Spannung p_2 und der Temperatur t_2 bei konstantem Volumen abgekühlt, bis sie die Spannung p_0 der Atmosphäre erreicht haben, dann ist ihre Temperatur (absolut)

$$T_3 = T_2 \frac{p_0}{p_2}$$

oder

$$T_3 = T_0 \frac{v_2}{v_1}$$

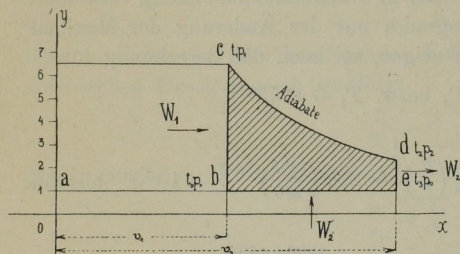


Fig. 279.

und die bei dieser Abkühlung verlorene Wärme $c_v (T_2 - T_3)$.

Während die Temperatur von t_3 bei konstanter Spannung p_0 auf t_0 abnimmt, wird die weitere Wärmemenge

$$c_p (T_3 - T_0)$$

abgegeben. Die gesamte Wärmemenge, welche durch die Ausströmung verloren geht, beträgt daher

$$W_2 = c_v (T_2 - T_3) + c_p (T_3 - T_0);$$

somit ist der Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{c_v (T_1 - T_0) - [c_v (T_2 - T_3) + c_p (T_3 - T_0)]}{c_v (T_1 - T_0)}$$

oder

$$\eta = 1 - \frac{(T_2 - T_3) + x(T_3 - T_0)}{(T_1 - T_0)}$$

In diesem Kreisprozesse ist die Beziehung der Explosionstemperatur T_1 zur Temperatur mit Ende der Expansion T_2 nicht bestimmt, nachdem T_2 von dem Grade der Expansion der Gase, d. h. von dem Volumsverhältnisse abhängig ist, bis zu welchem die Expansion getrieben wird. In keinem Falle kann jedoch der Wirkungsgrad so groß sein, wie in dem

vorher erörterten Kreisprozesse vollkommener Expansion, wie auch nachstehendes Beispiel ergibt.

T_2 ergibt sich aus der Gleichung der Adiabate

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{x-1}, \quad T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{x-1}.$$

Die Werte $T_1 = 1873^\circ$, $x = 1,408$ und $\frac{v_1}{v_2} = \frac{1}{2}$ eingeführt, ergibt

$$T_2 = 1873 \left(\frac{1}{2}\right)^{0,408} = 1411^\circ \text{ absolut};$$

ferner wird

$$T_3 = \frac{v_2}{v_1} T_0 = 2 \cdot 290 = 580^\circ \text{ absolut.}$$

Der Wirkungsgrad berechnet sich somit aus obiger Gleichung unter Einführung der Werte von T_2 und T_3

$$\eta = 1 - \frac{(1411 - 580) + 1,408(508 - 290)}{1873 - 290} = 0,22.$$

Für die kleinere Maximaltemperatur $t_1 = 1000^\circ \text{ C}$ wird

$$T_2 = 959^\circ \text{ absolut und } T_3 = 580^\circ \text{ absolut}$$

wie früher; somit

$$\eta = 0,20.$$

Während somit bei vollkommener Expansion und der Maximaltemperatur von 1600° beziehungsweise 1000° C der theoretische Wirkungsgrad 0,29 beziehungsweise 0,23 beträgt, nimmt derselbe bei der in Rede stehenden unvollkommenen Expansion und dem Volumsverhältnisse 1:2 auf 0,22 beziehungsweise 0,20 ab. Man erkennt daraus, daß bei den Maschinen von Lenoir und Hugon der Wirkungsgrad bei Erhöhung der Temperatur nicht wesentlich zunimmt, und daß selbst eine so bedeutende Temperaturerhöhung, wie die dem Beispiele zugrunde liegende, nur eine Vergrößerung des Wirkungsgrades von 2 Prozent zur Folge hat.

Anfangs- und Enddruck der Expansion rechnen sich nach den Gleichungen für die Zustandsänderung bei konstantem Volumen

$$p_1 = p_0 \frac{T_1}{T_0} = 6,46 \text{ kg/qcm}$$

und

$$p_2 = p_0 \frac{T_2}{T_3} = 2,43 \text{ kg/qcm,}$$

wenn p_0 als Druck der Außenluft mit 1 kg/qcm angenommen wird.

Für die kleinere Anfangstemperatur der Expansion

$$t_1 = 1000^\circ \text{ C}$$

wird

$$p_1 = 4,4 \text{ kg/qcm}$$

und

$$p_2 = 1,65 \text{ kg/qcm.}$$

Berechnet man das Hubvolumen v_2 , welches vom Kolben durchlaufen werden mußte, um vollkommene Expansion zu erreichen, dann ergibt sich für die obere Temperaturgrenze $t_1 = 1600^\circ \text{C}$

$$v_2 = 3,76 v_1.$$

Die 7-prozentige Erhöhung des Wirkungsgrades (22 auf 29 Prozent) müßte daher durch eine fast doppelte Vergrößerung des Hubvolumens erkauft werden und dies sind in erster Linie die erwähnten praktischen Gründe, welche dafür sprechen, die heißen expandierenden Gase noch mit einer Spannung höher wie jene der Atmosphäre entweichen zu lassen.

In diese Gruppe von Explosionsmotoren gehört auch die atmosphärische Gasmaschine, deren allgemeine Anordnung und Wirkungsweise bereits an anderer Stelle erörtert wurde.

Das theoretische Druckdiagramm dieser Maschine ist durch Fig. 280 dargestellt.

Die Expansionslinie ist auch hier eine Adiabate; während der Kompression muß theoretisch die ganze Wärme wieder abgegeben werden;

die Verdichtungsline ist daher eine Isotherme. Die ganze verfügbare Wärme wird der Ladung zufolge der Explosion bei konstantem Volumen v_1 zugeführt, Spannung und Temperatur steigen von der Spannung der Atmosphäre p_0 und deren Temperatur t_0 auf die Maximalspannung p_1 und die höchste Temperatur t_1 . Die Expansion erfolgt adiabatisch in einem solchen Ausmaße,

daß die Temperatur t_1 wieder auf die Temperatur der Atmosphäre t_0 vermindert wird.

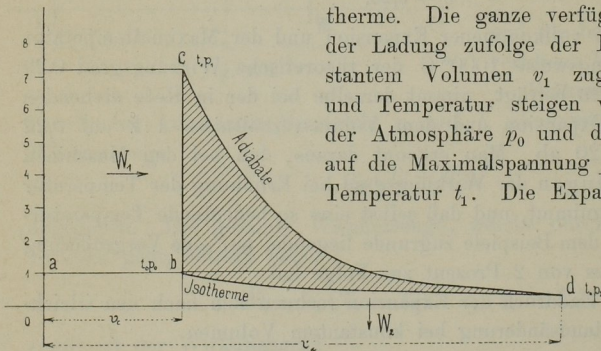


Fig. 280.

Der rücklaufende Kolben verdichtet die Gase bei gleichbleibender Temperatur t_0 , bis das ursprüngliche Volumen v_1 und die Spannung p_0 wieder erreicht ist.

Für zwei beliebige Temperaturen t_0 und t_1 besteht eine bestimmte Beziehung zwischen der verfügbaren Arbeit und jener Arbeit, welche der abgegebenen Wärme entspricht. Während der Expansion von der höchsten zur niedrigsten Temperatur fällt dieselbe von t_1 auf t_0 ; die Fläche, welche von der Adiabate $t_1 t_0$, den beiden Grenzordinaten und der Volumsline

umschrieben ist, stellt daher die während des Prozesses zugeführte Wärme dar.

Die abgeführte Wärme wird bei konstanter Temperatur t_0 abgegeben und ist äquivalent der von der Volumlinie, den Grenzordinaten und der Isotherme gebildeten Fläche.

Die der zugeführten Wärme äquivalente Fläche ist

$$\frac{1}{x-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2);$$

die der abgeführten Wärme äquivalente Fläche hingegen

$$p_0 v_1 \log_n \frac{v_2}{v_1}.$$

Der Wirkungsgrad beträgt daher

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\frac{1}{x-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) - p_0 v_1 \log_n \frac{v_2}{v_1}}{\frac{1}{x-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)} \\ &= 1 - \frac{(x-1) \left(p_0 v_1 \log_n \frac{v_2}{v_1} \right)}{p_1 v_1 - p_2 v_2}. \end{aligned}$$

Ferner ist für die isothermische Verdichtungslinie

$$p_0 v_1 = p_2 v_2;$$

die Gleichung für den Wirkungsgrad kann somit auch geschrieben werden:

$$\eta = 1 - \frac{(x-1) \left(p_0 v_1 \log_n \frac{v_2}{v_1} \right)}{p_1 v_1 - p_0 v_1} = 1 - \frac{(x-1) p_0 \log_n \frac{v_2}{v_1}}{p_1 - p_0}.$$

Nachdem andererseits

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{p_1}{p_0} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{x-1} \text{ oder } \left(\frac{v_2}{v_1} \right) = \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^{\frac{1}{x-1}},$$

so ergibt sich für den Wirkungsgrad die endgiltige Gleichung

$$\eta = 1 - \frac{(x-1) T_0 \log_n \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^{\frac{1}{x-1}}}{T_1 - T_0}.$$

Diese Gleichung ergibt einen verhältnismäßig sehr hohen Wert für den Wirkungsgrad der atmosphärischen Gaskraftmaschine. Setzt man darin $T_1 = 1873^\circ$ beziehungsweise 1273° absolut und $T_0 = 290^\circ$, entsprechend $t_1 = 1600^\circ$ beziehungsweise 1000° und $t_0 = 17^\circ \text{ C}$, dann ergibt sich

$$\eta = 0,66 \text{ beziehungsweise } 0,56.$$

Dieser äußerst günstige theoretische Wirkungsgrad wird jedoch nur dadurch erreicht, daß die Expansion bis zur Temperatur t_0 der Außenluft

getrieben wird, die Erfüllung dieser Bedingung erfordert jedoch ein Expansionsverhältnis

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{T_1}{T_0}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} = 96,7 \text{ beziehungsweise } 37,5.$$

Das Volumen, welches der Kolben durchlaufen müßte, wäre somit im ersteren Falle etwa 100 mal so groß als das Ladevolumen; andererseits müßten die Gase bei der Kompression auf das Anfangsvolumen durch den kühlenden Einfluß der Cylinderwandung stets auf derselben Temperatur erhalten bleiben. Eine solche Maschine wäre einfach praktisch unausführbar; ihre Größe und ihr Gewicht stünde gänzlich außer Verhältnis zur wirklichen Leistung der Maschine. Aus diesem Grunde bleibt, wie an früherer Stelle bereits erwähnt, der Wirkungsgrad dieser Maschinen weit hinter jenem des idealen Kreisprozesses zurück.

Gruppe II. Explosionsmotoren mit Verdichtung der Ladung. Das theoretische Indikatordiagramm einer Maschine dieser Type, den vollkommenen Kreisprozeß derselben darstellend, zeigt Fig. 281. Der ganze Arbeitsprozeß ist im Cylinder vereint gedacht; die schraffierte Fläche stellt daher die verfügbare Arbeit dar.

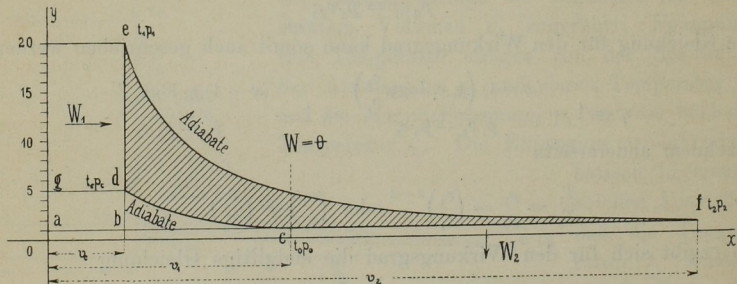


Fig. 281.

abf ist die atmosphärische Linie, *ac* entspricht dem Volumen der Pumpe, *af* jenem des Arbeitszylinders.

Die Pumpe nimmt das Volumen *ac* bei atmosphärischem Drucke ein, verdichtet dasselbe adiabatisch nach der Linie *cd* und drückt diese Ladung in einen Receiver. Die verdichteten Gase treten längs der Linie *gd* aus dem Receiver in den Cylinder, nehmen momentan Wärme auf, wodurch der Druck plötzlich von *d* nach *e* steigt. In *e* wird der Wärmezufuß abgesperrt und die erhitzten Gase expandieren adiabatisch von *e* nach *f*.

Das totale Diagramm des Arbeitszylinders ist *agdef*; die Fläche *agdc*

gehört sowohl dem Motor als auch der Pumpe an; die verfügbare Arbeit entspricht somit der schraffierten Fläche $cdef$.

Das totale Luftvolumen, welches die Pumpe passiert, ist v_1 ; das Volumen nach der adiabatischen Verdichtung v_c , wobei die Luft von dem Drucke der Atmosphäre p_0 und der Temperatur derselben t_0 auf den Druck p_c und die Temperatur t_c verdichtet wurde. Wärme wird bei konstantem Volumen v_c aufgenommen, bis die höchste Temperatur t_1 erreicht ist. Die heißen Gase expandieren sodann adiabatisch von der Temperatur t_1 auf t_2 , wobei die Pressung von p_1 auf p_2 abnimmt; in dem vorliegenden Falle ist $p_2 = p_0$, dem Atmosphärendruck.

Wärme wird abgegeben während der Volumsabnahme von v_2 auf v_1 bei konstantem Druck.

Unter Einführung der absoluten Temperatur ist die während des Kreisprozesses zugeführte Wärme

$$W_1 = c_v (T_1 - T_c),$$

die abgeführte Wärme hingegen

$$W_2 = c_p (T_2 - T_0).$$

Der Wirkungsgrad ist somit

$$\eta = \frac{c_v (T_1 - T_c) - c_p (T_2 - T_0)}{c_v (T_1 - T_c)} = 1 - x \frac{(T_2 - T_0)}{(T_1 - T_c)}.$$

Es ist klar, daß für irgend eine höchste Temperatur T_1 und eine Verdichtungstemperatur T_c die adiabatische Expansion den atmosphärischen Druck bei einer für diesen Fall bestimmten Temperatur T_2 erreicht.

Durch Feststellung der Beziehungen zwischen diesen Temperaturen und jener der Atmosphäre T_0 wird die Rechnung wesentlich vereinfacht. Diese Beziehungen ergeben sich wie folgt: Für die adiabatische Expansion und Kompression wird

$$p_1 v_c^x = p_2 v_2^x \text{ und } p_c v_c^x = p_0 v_1^x.$$

Nachdem jedoch $p_2 = p_0$, wird

$$\frac{p_1}{p_c} = \frac{v_2^x}{v_1^x}.$$

Für die Zustandsänderung $c-f$ bei konstantem Drucke ist

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_0}, \text{ somit } \frac{p_1}{p_c} = \frac{T_2^x}{T_0^x}.$$

Ferner ist für die Zustandsänderung bei konstantem Volumen $d-e$

$$\frac{p_1}{p_c} = \frac{T_1}{T_c}, \text{ somit } \frac{T_1}{T_c} = \left(\frac{T_2}{T_0}\right)^x,$$

woraus sich ergibt

$$T_2 = T_0 \left(\frac{T_1}{T_c}\right)^{\frac{1}{x}}.$$

Obleich dieser Kreisprozeß für Maschinen der in Rede stehenden Gruppe die beste Wärmeausnützung ergibt, findet er doch in der Praxis im allgemeinen keine Anwendung, da man aus anderen Gründen, welche bereits früher erwähnt wurden, die Expansion der Gase nicht so weit treibt, daß die Spannung bis auf den Atmosphärendruck sinkt.

Die Durchführung dieses Kreisprozesses würde bei einfachwirkenden Viertaktmaschinen fordern, daß die Ladung nur während eines Teiles des Kolbenhubes angesaugt, während des übrigen Teiles desselben expandiert, beim Rücklauf zunächst wieder auf den Atmosphärendruck verdichtet und dann erst wirklich komprimiert werde. Dieser Arbeitsprozeß ist für normalen Betrieb unrationell, da der nicht bedeutende Gewinn an Arbeit durch unverhältnismäßig langgebaute Maschinen und vermehrte Leergangsarbeit erkauft werden müßte. Günstiger gestalten sich die Verhältnisse bei doppeltwirkend gebauten Maschinen, wie aus nachstehender Beschreibung der Arbeitsweise einer Maschine dieser Art, welche von der Compagnie „Duplex“ in Paris gebaut wird, hervorgeht*). Der Motor ist nach Art einer doppeltwirkenden Dampfmaschine mit Deckeln an beiden Cylinderenden und Kreuzkopfführung gebaut. An jedem Cylinderende sitzen in besonderen Gehäusen je ein Auspuffventil und ein Absperrventil für das in den Cylinder tretende Ladungsgemisch.

Beim ersten Aushube des Kolbens saugt derselbe in den hinteren Cylinderraum frisches Gasgemisch; dasselbe strömt beim Rücklaufe des Kolbens durch einen Verbindungskanal so lange in den vorderen Cylinderraum über, bis der Kolben die Mitte seines Hubes erreicht hat. In diesem Momente schneidet das Absperrventil die weitere Gemischzufuhr nach der vorderen Cylinderseite ab. Das im hinteren Cylinderraume eingeschlossene Gasgemisch wird nun bis Ende des Hubes verdichtet, während dasjenige im vorderen Cylinderraume und im Verbindungskanal eine Ausdehnung und damit Spannungsabnahme erfährt. Die Größe der letzteren ist von den Abmessungen des Verbindungskanals abhängig. Mit Ende des Hubes findet Entzündung der verdichteten Ladung im hinteren Cylinderraume statt, während zugleich der vordere Cylinderraum durch ein zweites Absperrventil gegen den Verbindungskanal abgeschlossen wird; das hier eingeschlossene Gemenge wird nun zunächst auf den Atmosphärendruck und dann weiter verdichtet, bis auch hier mit Ende des Hubes Zündung eintritt. Während des Kolbenrücklaufes spielt sich vorne die Arbeitsperiode ab, während rückwärts die Verbrennungsprodukte ausgestoßen werden, worauf sich der beschriebene Vorgang wiederholt.

*) Zeichnung und Beschreibung dieser Maschine siehe: *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, 1901, S. 325.

Durch die Verteilung des im Cylinder eingesaugten Gemisches auf beide Kolbenseiten wird eine vollkommenerer Ausdehnung als in Motoren mit gleichem Verdichtungs- und Ausdehnungsvolumen erzielt; die während eines Kolbenhubes stattfindende Ausdehnung ermöglicht, nahezu die ganze Ausdehnungswärme in Arbeit umzuwandeln; die Gase strömen daher mit einer Spannung nahezu gleich jener der Außenluft aus dem Cylinder.

Hierdurch wird die Leistungsfähigkeit dieses Motors gegenüber einem einfachwirkenden Viertaktmotor gleicher Abmessungen etwas erhöht und infolge der doppelten Wirkung die Gleichförmigkeit des Ganges vergrößert. Ob diese Vorteile die Nachteile der wesentlich komplizierteren und teureren Maschine überwiegen, bleibt in Frage gestellt.

Aus der vorhin aufgestellten Gleichung für den Wirkungsgrad erkennt man, daß derselbe bis zu einem gewissen Grade von der Kompressions- und Explosionsendtemperatur abhängig ist; diese Veränderlichkeit wird durch ein Zahlenbeispiel am besten ersichtlich.

Nimmt man wieder $t_1 = 1600^\circ$ beziehungsweise 1000° C und die Temperatur der Außenluft mit $t_0 = 17^\circ$ C, somit $T_1 = 1873^\circ$ beziehungsweise 1273° und $T_0 = 290^\circ$ an, dann handelt es sich zunächst um die Annahme einer bestimmten Verdichtungs- und Explosionsendtemperatur und deren Einfluß auf den Wirkungsgrad bestimmen zu können.

Angenommen werde $p_c = 4$ und 8 kg/qcm Überdruck. Daraus ergibt sich bei adiabatischer Kompression reiner Luft

$$T_c = 462^\circ \text{ und } 548^\circ \text{ absolut}$$

und das Volumsverhältnis

$$\frac{v_c}{v_1} = \frac{1}{3,131} \quad \text{und} \quad \frac{1}{4,751}.$$

Die Endtemperatur der adiabatischen Expansion berechnet sich nach der vorhin aufgestellten Gleichung

$$T_2 = T_0 \left(\frac{T_1}{T_c} \right)^{\frac{1}{x}},$$

wenn man zunächst für $T_1 = 1873$ und für T_c obige zwei Werte einsetzt, mit

$$T_2 = 783^\circ \text{ beziehungsweise } 670^\circ.$$

Daraus bestimmt sich der Wirkungsgrad

$$\eta = 0,51 \text{ beziehungsweise } 0,707.$$

Für $T_1 = 1273^\circ$ wird

$$T_2 = 595^\circ \text{ beziehungsweise } 528^\circ \text{ absolut;}$$

somit der Wirkungsgrad

$$\eta = 0,47 \text{ beziehungsweise } 0,538.$$

Bei der heute fast ausschließlich gebräuchlichen Arbeitsweise der Explosionsmaschinen wird die Expansion nicht bis auf den Atmosphärendruck getrieben, sondern bei einem Volumen beendet, welches ebenso groß ist, wie das Volumen zu Beginn der Kompression. Es wird daher $v_2 = v_1$, und die heißen Gase entweichen mit einem gewissen Überdruck p_2 in die Atmosphäre. Das theoretische Arbeitsdiagramm dieser im Viertakt beziehungsweise Zweitakt arbeitenden Maschinen ist durch Fig. 282 dargestellt.

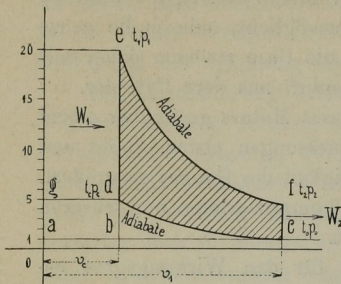


Fig. 282.

Nachdem die zugeführte Wärme $W_1 = c_v(T_1 - T_c)$, die abgeführte Wärme $W_2 = c_v(T_2 - T_0)$, ergibt sich der Wirkungsgrad dieses Arbeitsprozesses

$$\eta = \frac{c_v(T_1 - T_c) - c_v(T_2 - T_0)}{c_v(T_1 - T_c)}$$

oder

$$\eta = 1 - \frac{T_2 - T_0}{T_1 - T_c}$$

Nachdem beide Kurven Adiabaten sind und sich auf die gleiche Volumsänderung erstrecken, ist

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_0}{T_c}$$

und daher

$$\frac{T_2 - T_0}{T_1 - T_c} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_0}{T_c}$$

Der Wirkungsgrad wird daher

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_0}{T_c} = 1 - \left(\frac{v_c}{v_1}\right)^{\gamma-1}$$

Aus dieser Gleichung ergibt sich, daß der Wirkungsgrad nur von dem Verhältnisse der Anfangstemperatur und der Endtemperatur der adiabatischen Kompression abhängig ist; die Explosionstemperatur kann beliebig höher sein, als die Kompressionstemperatur, ohne daß hierdurch der Wirkungsgrad erhöht oder erniedrigt wird.

Für die Anfangstemperatur $t_0 = 17^\circ$ beziehungsweise $T_0 = 290^\circ$ absolut und die Kompressionsendspannung $p_c = 4$ beziehungsweise 8 kg/qcm wird der Wirkungsgrad

$$\eta = 0,37 \text{ beziehungsweise } 0,47.$$

Sobald das Kolbenhubvolumen und das Volumen des Kompressionsraumes bekannt sind, ist der Wirkungsgrad vollkommen bestimmt.

Der Vorteil der Verdichtung der Ladung vor Explosion oder Verbrennung ist teils mechanischer, teils thermodynamischer Natur, nachdem nicht nur der Wirkungsgrad der Maschine, sondern auch die Leistungsfähigkeit derselben im Verhältnisse zu den Dimensionen der Maschine erhöht wird, indem eine größere Gasmenge verbrannt, somit auch eine größere Wärmemenge bei jeder Explosion entwickelt, daher auch ein höherer mittlerer Druck während des Arbeitshubes erzeugt wird.

Zu Beginn der achtziger Jahre betrug die Verdichtungsspannung des Ottoschen Viertaktmotors durchschnittlich 2 bis 2,2 kg/qcm; die Explosionsspannung erreichte ungefähr 8,5 und der mittlere Druck während der Arbeitsperiode im Mittel 3,8 bis 3,9 kg/qcm. Eine Maschine vom Jahre 1892, deren Indikator-diagramm durch Fig. 283 dargestellt ist, arbeitete bereits mit einer Kompressionsspannung von 3,4 kg, einer Explosionsspannung von 14 kg und einem mittleren Arbeitsdrucke von 5,7 kg/qcm.

Im Jahre 1894 ging man mit der Kompressionsspannung bereits auf 5 bis 5,2 kg; die Explosionsspannung betrug im Mittel 22 kg, der mittlere Arbeitsdruck stieg somit auf 7,0 bis

7,5 kg/qcm Überdruck. Über diese Spannungen ist man bei Leuchtgasmaschinen nicht hinausgegangen, um sich nicht jener Grenze des Kompressionsenddruckes zu nähern, bei welcher die Stabilität des Betriebes durch eintretende Vorzündungen unvorteilhaft beeinflusst werden könnte.

Ein Leuchtgasdiagramm der letzten Periode zeigt Fig. 284.

Vergleicht man den mittleren Arbeitsdruck dieser letzten Periode mit

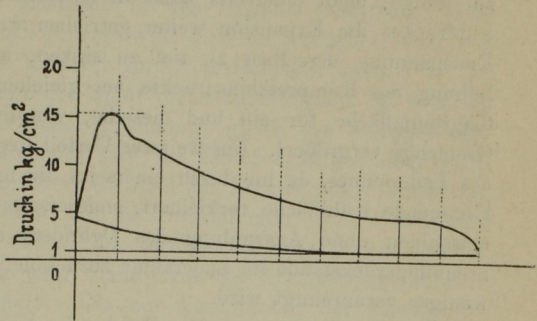


Fig. 283.

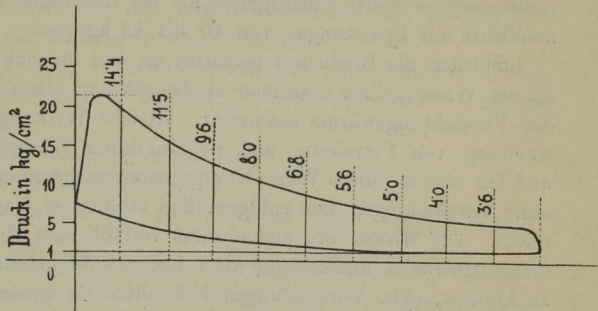


Fig. 284.

jenem der Maschinen von den Jahren 1881 und 1882, dann ersieht man, daß durch die Steigerung des Kompressionsdruckes die Leistung der Maschine pro Kubikmeter Kolbenhubvolumen auf das Zweifache erhöht wurde.

Abgesehen von dieser wesentlichen Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Maschine hat die Kompression auch eine Erhöhung des Wirkungsgrades zur Folge, denn einerseits kann in Anbetracht des höheren Explosionsenddruckes die Expansion weiter getrieben werden, ohne Gefahr mit der Endspannung derselben zu tief zu sinken, andererseits wird durch Erhöhung des Kompressionsdruckes bei gleichem Enddrucke die Indikatorgrammfläche für ein und dieselbe, von der Maschine aufgenommene Gasmenge vergrößert. Ein weiterer Vorteil liegt in dem kleineren Volumen des Laderaumes, da hierdurch einerseits die mit den Gasen in Berührung kommende Kühlfläche verkleinert, andererseits bei gewöhnlichen Viertaktmaschinen ohne Ausspülung des Cylinders eine geringere Menge Verbrennungsrückstände im Laderaume zurückbleibt, die frische Ladung daher weniger verunreinigt wird.

Es wäre daher, wenn die Gefahr der Vorzündung nicht bestünde, in jeder Beziehung vorteilhaft, mit der Verdichtungsspannung so hoch als möglich hinaufzugehen.

Bei Gasen von geringerem Heizwerte (Mischgas, Gichtgas etc.) kann man, wie bereits an früherer Stelle erwähnt, mit der Verdichtungsspannung ohne weiteres höher hinaufgehen als bei Leuchtgas und arbeitet man anstandslos mit Spannungen von 10 bis 12 kg/qcm.

Spiritus als Brennstoff gestattet an und für sich höhere Kompression, da der Wassergehalt desselben verdampft und einen Teil der frei werden den Verdichtungswärme aufnimmt. Gleiche Wirkung sucht man bei Verwendung von Petroleum und Benzin durch Wasserinjektion zu erzielen und hat man auf diese Weise Kompressionsendspannungen bis zu 20 kg/qcm ohne Vorzündungen bei ruhigem und stoßfreiem Gange der Maschine erreicht. Die wirksamste und absolut verlässlichste Methode, mit dem Verdichtungsdrucke unabhängig vom Brennstoffe beliebig hoch hinaufgehen zu können, ohne Vorzündungen befürchten zu müssen, ist die von Diesel zuerst mit Erfolg angewendete Methode der Verdichtung reiner atmosphärischer Luft auf die Entzündungstemperatur des verwendeten Brennstoffes und Einführung desselben mit Beginn des Arbeitshubes. Diese Methode erfordert allerdings, daß der Brennstoff mit bedeutendem Überdruck in den Cylinder eingeblasen werde, also die Anhängung einer eigenen, diesem Zwecke dienenden Kompressionspumpe. Die Dieselmachine arbeitet bei Verwendung von Mineralölen mit einer Verdichtungsspannung von durchschnittlich 32 und einem Einblasedrucke von im Mittel 45 kg/qcm.

Gruppe III. Maschinen dieser Gruppe besitzen zwei Cylinder von ungleichem Hubvolumen; der kleinere dient als Pumpe zur Einnahme und Verdichtung der Ladung; der größere dient als Arbeitcylinder, in welchem die Ladung während und nach der Verbrennung expandiert.

Der Kolben der Pumpe saugt die Ladung von atmosphärischer Spannung und preßt dieselbe, rücklaufend, in einen Receiver, von welchem dieselbe im komprimierten Zustande in den Cylinder übertritt. Beim Übertritt der Ladung in den Cylinder wird dieselbe entzündet, ohne daß sich die Entzündung in den Receiver zurück fortpflanzen kann.

Der Arbeitcylinder empfängt somit die Arbeitssubstanz im brennenden Zustande von gleichbleibender Spannung, gleich der Kompressionsspannung. Im geeigneten Momente wird das Einlaßorgan geschlossen, die Verbrennungsprodukte expandieren, während der Arbeitskolben seinen Hub vollendet; mit Ende des Hubes wird das Auslaßorgan eröffnet und während des Kolbenrücklaufes werden die verbrannten Gase hinausgedrückt.

Durch die Verbrennung wird somit nicht der Arbeitsdruck, sondern das Arbeitsvolumen vergrößert. Die zur Verdichtung der Ladung im Kompressor aufgewendete Arbeit wird daher infolge der Verbrennung im Cylinder der Maschine entsprechend vergrößert abgegeben, bei gleichbleibendem Drucke somit ein bestimmter Arbeitsüberschuß erzeugt.

Der Arbeitsprozeß dieser Maschinen setzt sich aus folgenden fünf Operationen zusammen:

- 1) Beschickung der Pumpe mit dem Gemenge aus Gas und Luft.
- 2) Kompression der Ladung in den Receiver.
- 3) Übertritt der Ladung in den Arbeitcylinder und Entzündung derselben bei ihrem Eintritte in den Cylinder; Verbrennung unter konstantem Druck.
- 4) Expansion nach beendeter Admission.
- 5) Ausstoßen der verbrannten Gase.

Um diesen Prozeß vollständig durchführen zu können, müssen folgende Bedingungen erfüllt werden:

Die Aufnahme der Ladung seitens der Pumpe, sowie der Übertritt derselben vom Receiver in den Cylinder müßte ohne Drosselung erfolgen; desgleichen müßte jeder Verlust an Kompressionswärme, sowie an Wärme während der Verbrennung durch Wärmeabgabe an die Cylinderwandungen und den Kolben vermieden werden. Ferner dürfte während der Ausströmperiode kein Rückdruck auf den Kolben erfolgen und die Verbrennungsrückstände müßten vollkommen aus dem Cylinder geschafft werden, also der schädliche Raum gleich Null sein.

Obwohl diese Bedingungen in ihrer Gänze von keiner der bestehenden Maschinen erfüllt werden, so sind dieselben doch nicht so widersprechend,

pressionslinie als Adiabate ist bc , die Receiverdrucklinie cg . Aus dem Receiver strömt die Ladung unter gleich bleibendem Drucke p_c längs der Linie ged in den Cylinder; im Punkte d ist die Admission, somit auch die Wärmezufuhr beendet. Nun folgt adiabatische Expansion von d nach e ; der Druck sinkt von p_c auf $p_2 = p_0$, also auf den Druck der Atmosphäre. Von e bis a werden während des Kolbenrücklaufes die Verbrennungsprodukte hinausgedrückt. Die Fläche $aedg$ stellt die Arbeit des Motoreylinders, $abcg$ jene der Pumpe, $bcde$ somit die verfügbare Arbeit dar. Alle übrigen Bezeichnungen sind aus der Figur zu entnehmen.

Nachdem die gesamte Wärme unter konstantem Drucke p_c aufgenommen wird, ist die zugeführte Wärme

$$W_1 = c_p(T_1 - T_c);$$

nachdem andererseits die Wärmeabfuhr gleichfalls unter dem konstanten Drucke p_0 stattfindet, ist die abgeführte Wärme

$$W_2 = c_p(T_2 - T_0).$$

Der Wirkungsgrad ist daher

$$\eta = \frac{c_p(T_1 - T_c) - c_p(T_2 - T_0)}{c_p(T_1 - T_c)} = 1 - \frac{T_2 - T_0}{T_1 - T_c}.$$

Für die Kompressionslinie als Adiabate ist

$$p_c v_c^x = p_0 v_0^x,$$

und für die Expansionslinie

$$p_c v_1^x = p_2 v_2^x.$$

Daraus ergibt sich

$$\frac{v_c^x}{v_1^x} = \frac{p_0 v_0^x}{p_2 v_2^x},$$

nachdem jedoch $p_2 = p_0$ ist, wird

$$\frac{v_c^x}{v_1^x} = \frac{v_0^x}{v_2^x},$$

und da andererseits

$$\frac{v_c}{v_1} = \frac{T_c}{T_1} \quad \text{und} \quad \frac{v_0}{v_2} = \frac{T_0}{T_2},$$

wird

$$\frac{T_c}{T_1} = \frac{T_0}{T_2},$$

und somit

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_0}{T_c}.$$

Setzt man diese Werte in die Gleichung für den Wirkungsgrad ein, dann wird

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad \text{oder} \quad = 1 - \frac{T_0}{T_c}.$$

Wird die Expansion, wie in dem vorliegenden Falle, so weit getrieben, daß der Enddruck derselben so groß ist, wie der Anfangsdruck der Kompression, dann hängt der Wirkungsgrad nur von der Kompression allein ab.

Je höher daher die Temperatur T_c mit Ende der Kompression ist, desto kleiner wird der Bruch $\frac{T_0}{T_c}$ bei gegebener Anfangstemperatur T_0 , desto mehr nähert sich somit η der Einheit. Der Wirkungsgrad ist daher theoretisch unabhängig von der nach beendeter Kompression hinzutretenden Wärme; es ist daher gleichgültig, ob die Verbrennungstemperatur T_1 groß oder klein ist, ob dieselbe 1600^0 oder 1000^0 C beträgt, insofern der Kompressionsgrad ungeändert bleibt.

Nimmt man wieder die Temperatur der Atmosphäre $t_0 = 17^0$ C, somit $T_0 = 290^0$ absolut und den Atmosphärendruck mit $p_0 = 1$ kg/qcm an, ferner

$$x = \frac{c_p}{c_v} = 1,408,$$

dann berechnet sich bei adiabatischer Kompression und Expansion die Kompressionsendtemperatur T_c aus der Gleichung

$$\frac{T_c}{T_0} = \left(\frac{p_c}{p_0}\right)^{\frac{x-1}{x}} = \left(\frac{p_c}{p_0}\right)^{0,29}.$$

Für einen Kompressionsdruck $p_c = 5$ kg/qcm wird somit

$$T_c = 290 \cdot 5^{0,29} = 462,5^0 \text{ absolut.}$$

Damit berechnet sich der Wirkungsgrad

$$\eta = 1 - \frac{290}{462,5} = 0,37.$$

Für einen Kompressionsdruck $p_c = 30$ kg/qcm wird

$$T_c = 290 \cdot 30^{0,29} = 777,5$$

$$\eta = 1 - \frac{290}{777,5} = 0,63.$$

In Wirklichkeit wird jedoch zumeist die Expansion nicht so weit getrieben, daß die Spannung auf den Druck der Atmosphäre sinkt; infolgedessen wird auch eine größere Wärmemenge mit den Abgasen abgeführt und der Wirkungsgrad unter jenen Werten bleiben, welche für vollkommene Expansion gefunden wurden.

Das Diagramm dieser Type zeigt Fig. 286.

Es wird auch hier wie im vorhergehenden Falle

$$T_c = T_0 \left(\frac{p_c}{p_0}\right)^{\frac{x-1}{x}};$$

ferner

$$T_3 = T_2 \frac{p_0}{p_2}.$$

entsprechende Steigerung. Mit Schluß der Brennstoffeinfuhr erfolgt Expansion bis Ende des Hubes. Während des zweiten Kolbenrücklaufes werden die Verbrennungsprodukte ausgestoßen und das Spiel beginnt von neuem.

Das theoretische Druckdiagramm ist in Fig. 286 a dargestellt.

Maßgebend für die Höhe der Kompression ist das Volumsverhältnis $\left(\frac{v_0}{v_c}\right)$. Für die adiabatische Verdichtung von b nach c ist

$$p_c v_c^x = p_0 v_0^x,$$

wobei

$$x = \frac{c_p}{c_v} = \frac{0,2375}{0,1684} = 1,408 \text{ (reine atmosphärische Luft).}$$

Daraus wird

$$p_c = p_0 \left(\frac{v_0}{v_c}\right)^x$$

und

$$T_c = T_0 \left(\frac{v_0}{v_c}\right)^{x-1}.$$

Die zugeführte Wärmemenge (bei konstantem Druck)

$$W_1 = c_p (T_1 - T_c).$$

Für die adiabatische Expansion von d nach e wird

$$p_c v_1^x = p_1 v_0^x$$

oder

$$p_0 \left(\frac{v_0}{v_c}\right)^x v_1^x = p_1 v_0^x$$

und daraus die Endspannung

$$p_1 = p_0 \left(\frac{v_1}{v_c}\right)^x$$

und die Endtemperatur

$$T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_0}\right)^{x-1}.$$

Die bei konstantem Volumen (v_0) abgeführte Wärmemenge

$$W_2 = c_v (T_2 - T_0).$$

Die in Arbeit umgesetzte Wärmemenge ist daher theoretisch

$$W = W_1 - W_2 = c_p (T_1 - T_c) - c_v (T_2 - T_0).$$

Daraus ergibt sich der Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{W}{W_1} = \frac{c_p (T_1 - T_c) - c_v (T_2 - T_0)}{c_p (T_1 - T_c)} = 1 - \frac{1}{x} \frac{(T_2 - T_0)}{(T_1 - T_c)}.$$

Da die Zündungstemperatur des Leuchtgases ungefähr 550° bis 600° , jene der flüssigen Brennstoffe (Petroleum, Benzin) 500° bis 550° C be-

trägt und die Kompressionsendtemperatur, sicher eintretender Zündungen wegen, entsprechend höher liegen muß, so ist auch die Verdichtung so hoch zu treiben, daß diese Temperatur erreicht wird. Die Indikator-diagramme der Dieselmotoren ergeben einen mittleren Kompressionsenddruck $p_c = 32$ kg/qcm und einen Expansionsenddruck $p_1 = 3,5$ bis 4 kg/qcm. Nimmt man ferner wie in den früheren Beispielen $t_0 = 17^\circ \text{C}$ (mittlere Temperatur der Außenluft), somit $T_0 = 290^\circ$ absolut an, dann berechnet sich unter Zugrundelegung des bestehenden theoretischen Druckdiagrammes der kalorische Wirkungsgrad mit $\eta = 0,52$ bis $0,54$.

Da die Dieselmotoren durchschnittlich bei Vollbelastung $0,21$ bis $0,22$ kg Petroleum pro PS_e-Stunde benötigt, der Heizwert desselben mit 10200 W.E./kg und der mechanische Wirkungsgrad mit $0,75$ angenommen werden kann, so ergibt sich daraus der wirkliche thermische Wirkungsgrad der Maschine mit durchschnittlich $0,38$.

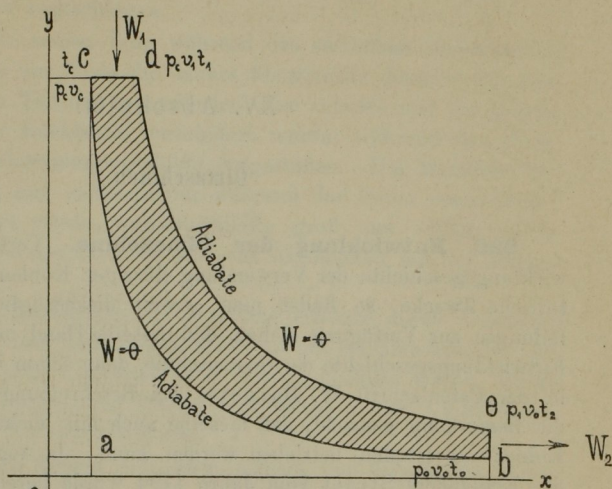


Fig. 286 a.