

## XIV. Abschnitt.

### Gasmaschinen.

**217. Entwicklungsgeschichte der Gasmachine.** Der Erfinder der ersten praktisch brauchbaren Gasmachine, deren Arbeitsprinzip und konstruktive Durchführung auf gesunder und lebensfähiger Basis beruhte, war der Franzose Lenoir. Die Lenoirsehe Maschine kann daher auch als Ausgangspunkt des sich nunmehr rasch entwickelnden und in verhältnismäßig kurzer Zeit zu außerordentlicher Bedeutung gelangten Kraftmaschinensystems angesehen werden.

Nachdem es Lenoir geglückt war, seine Erfindung auch geschäftlich auszubeuten, so trat auch von diesem Zeitpunkte an die Gasmachine aus dem Gelehrtenzimmer auf den Markt, um hier fortan ihre Stellung zu behaupten und stetig mehr zu befestigen.

Das bezügliche Patent Lenoirs datiert vom 24. Januar 1860.

Die erste Lenoirsche Maschine wurde von dem Mechaniker Hypolit Marinoni in Paris 1860 gebaut und noch in demselben Jahre kamen zwei größere Maschinen von angeblich 6 beziehungsweise 20 Pferdestärken in Paris in Betrieb\*).

Lenoirs Erfindung erregte selbstverständlich außergewöhnliches Aufsehen. Die Berichte, welche über diese Erfindung in die Öffentlichkeit gelangten, waren zumeist übertrieben und mit der Wirklichkeit durchaus nicht im Einklange stehend; das allgemeine Interesse wendete sich daher in hohem Maße dieser Neuheit zu. In Frankreich wurde eine eigene Gesellschaft, die Société Lenoir, gegründet, welche sich nur mit der Ausbeutung des Lenoirschen Patentes befaßte. In England nahm die Reading Iron Works Company die fabriksmäßige Erzeugung dieser Maschine in die Hand und diesem Beispiele folgten andere Firmen Englands und

---

\*) Zeichnung und Beschreibung dieser Maschine siehe Knoke, *Die Kraftmaschinen des Kleingewerbes*, Berlin 1899, S. 195. Ferner Schöttler, *Die Gasmachine*, 3. Aufl., Braunschweig 1899, sowie Donkins *Text-book of Gas, Oil and Air-Engines* und Witz, *Traité des moteurs à Gaz et à Pétrole*.

des Kontinentes, sodaß innerhalb weniger Jahre hunderte von Lenoir-schinen, zumeist in Größen von  $\frac{1}{2}$  bis 3 PS zur Ausführung gelangten.

Da nun an ausgeführten Maschinen eingehende Versuche hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Gasverbrauch durchgeführt werden konnten, erwiesen sich die ursprünglichen Berichte über den Gasverbrauch der Lenoirschen Maschine, welche namentlich durch technische Zeitschriften in die Öffentlichkeit gebracht waren, als unwahr und übertrieben. Während man sich anfänglich mit einem angeblichen Gasverbrauche von  $\frac{1}{2}$  cbm pro PS-Stunde täuschte, ergaben die Versuche einen wirklichen Verbrauch von 3 cbm und darüber. Durch diese nun nicht mehr zu leugnende Tatsache wurde die anfängliche Begeisterung in kürzester Zeit sehr herabgemindert und nachdem sich der Betrieb nunmehr viel kostspieliger stellte, als erhofft war, so wurde derselbe von vielen Seiten wieder eingestellt. Die frühere Begeisterung schlug nun in das Gegenteil um; die Maschinen wurden nun, und zwar mit Unrecht, schlechter gemacht, als sie es verdienten.

Die Arbeitsweise der Lenoirschen Maschine war folgende: Während des ersten Teiles des Kolbenhubes wurde Gas und Luft in richtigem Verhältnisse gemischt in den Cylinder gesaugt. Ungefähr in der Mitte des Hubes wurde das Einlaßorgan geschlossen und die Mischung durch einen elektrischen Funken entzündet; die Entzündung erfolgte explosionsartig unter plötzlicher Drucksteigerung. Die hochoerhitzten Verbrennungsprodukte verrichteten, während des restlichen Kolbenhubes expandierend, Arbeit, um während des darauffolgenden Kolbenrücklaufes ausgestoßen zu werden. Die Maschine war doppelwirkend; um der übermäßigen Erhitzung des Cylinders vorzubeugen, war derselbe mit einem Kühlmantel umgeben, durch welchen beständig Wasser zirkulierte. Dieser Kühlmantel hat sich auch bei allen späteren Gasmaschinen bis zum heutigen Tage als ein notwendiges Glied der Maschine erhalten.

In Lenoirs Maschine war jeder Hub aktiv; während einer Umdrehung fanden zwei Explosionen und zwar je eine zu jeder Kolbenseite statt.

Ein Indikatorgramm einer Lenoirschen Maschine ist in Fig. 248 dargestellt. Nach erfolgter Explosion fällt die Druckkurve ab, teils infolge der Expansion, teils infolge der Abkühlung durch die Cylinderwand; andererseits wird der Verlauf dieser Linie durch das sogenannte Nachbrennen, auf welches später zurückgekommen werden soll, beeinflusst. Da bei diesen

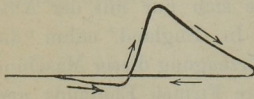


Fig. 248.

Maschinen die explosible Mischung vor der Entzündung nicht komprimiert wurde, war die vom Kühlmantel aufgenommene Wärme im Verhältnisse zur Gesamtwärme außerordentlich groß. Der Wirkungsgrad der Maschine

war aus diesem Grunde sowie in anbetracht der engen Temperaturgrenzen, innerhalb welcher die Expansion der erhitzten Verbrennungsprodukte stattfand, verhältnismäßig gering. Der Gasverbrauch betrug, wie bereits erwähnt, durchschnittlich 2,8 cbm pro PS<sub>1</sub>-Stunde, als ungefähr 4- bis 5-mal so viel, als eine gleich leistungsfähige Gasmaschine heutiger Bauart benötigt.

Die Lenoirsche Maschine arbeitete bei sorgfältiger Wartung im allgemeinen ruhig und ohne störendes Geräusch, in dieser Beziehung daher ebenso gut als eine Dampfmaschine, nur war der Betrieb im Vergleiche mit dieser viel zu teuer. In Fällen, wo die Ökonomie des Betriebes erst in zweiter Linie in Betracht kam oder die Aufstellung eines Kessels unstatthaft war, namentlich aber in Fällen aussetzenden Betriebes, fand die Lenoirsche Maschine häufige Verwendung, und selbst dann noch, als durch die viel ökonomischer, aber sehr geräuschvoll arbeitende atmosphärische Gaskraftmaschine eine wesentlich billigere Betriebskraft gefunden war. Erst gegen das Jahr 1880 wurde die Lenoirsche Maschine durch nach jeder Richtung bessere Konstruktionen gänzlich verdrängt und bietet daher heute nur mehr geschichtliches Interesse.

Obgleich Lenoir unbestritten das Verdienst gebührt, Erfinder der ersten praktisch brauchbaren Gasmaschine gewesen zu sein, so kann er doch nicht als der Erfinder der Gasmaschine überhaupt angesehen werden, indem bereits vor ihm zahlreiche Versuche, das Leuchtgas als Kraftquelle auszunützen, gemacht wurden.

Philipp Lebon, welcher von französischer Seite als Erfinder des Leuchtgases bezeichnet wird, nahm bereits 1801 zu seinem Patente auf Leuchtgaserzeugung vom Jahre 1799 ein Zusatzpatent auf eine eigentümliche Maschine, welche durch dieses Gas betrieben werden soll und der Wesenheit nach der heutigen Gasmaschine entsprach. Die Lebonsche Maschine bestand aus zwei Pumpen, welche Gas und Luft getrennt ansaugten und in einen gemeinschaftlichen Behälter drückten, von welchem das explosible Gemenge in einen doppeltwirkenden Arbeitscylinder überströmte und durch einen elektrischen Funken entzündet wurde. Zur Erzeugung dieser Funken diente ein elektrischer Apparat, der vom Motor selbst getrieben wurde.

Nachdem die Bestrebungen Lebons mit dem Zeitpunkte der Entdeckung des Leuchtgases zusammenfallen (es wird sogar behauptet, daß der leitende Gedanke der Erfindung Lebons in der Anwendung des von ihm erzeugten Gases als Kraftgas gelegen und somit die Verwendung desselben als Leuchtgas nicht der Hauptzweck seiner Erfindung gewesen sei), so kann strenge genommen die geschichtliche Entwicklung der Gasmaschine erst vom Jahre 1800 an gerechnet werden.

Die Nachfolger Lebons (Lebon wurde 1804 ermordet) entfernten sich eigentümlicherweise anfänglich wieder von dem, was er erreicht hatte und trachteten das Leuchtgas durch andere explosible Stoffe zu ersetzen; doch blieben all diese Versuche ohne Erfolg.

Wie weit die Versuche, explosible Stoffe überhaupt als motorische Kraftquelle auszunützen, zurückdatieren, läßt sich nicht genau bestimmen. Nach einzelnen Quellen soll Abbé Hautefeuille bereits 1678 die erste Idee einer Pulvermaschine gefaßt haben, um damit Wasser anheben zu können. Die Maschine bestand nach den beiden Schriften Hautefeulles vom Jahre 1678 und 1682 aus einem rechteckigen, mit Klappen oder Ventilen versehenen Gefäße, welches durch ein Rohr mit dem zu entleerenden Wasserbehälter in Verbindung stand. Das Pulver in dem Gefäße explodierte, die Gase schlugen durch die Ventile hinaus und die nun entstehende Luftleere saugte das Wasser an. In einer zweiten Maschine soll Hautefeuille die durch die Ausdehnung der Pulvergase erzeugte Arbeit unmittelbar zur Wasserförderung benützt haben. Zu einer Ausführung seiner Ideen ist der Genannte nie gelangt, doch liegt in seinen Erfindungen bereits der Grundgedanke der späteren Gasmachine.

Die erste Idee Hautefeulles wurde erst durch Huyghens 1680 in einem Versuchsmodelle verkörpert, später von Papin verbessert und 1688 als dessen Erfindung beschrieben. Die Maschine Huyghens war bereits mit Cylinder und Kolben ausgerüstet; die nach der Explosion des Pulvers im Cylinder entstandene Leere ermöglichte der äußeren Luft den Kolben arbeitverrichtend wieder in seine Anfangstellung zurückzuführen. Diese Experimente blieben jedoch ohne Erfolg, da man namentlich in der Herstellung auf unüberwindbare Hindernisse stieß, da ja zu jener Zeit die Bearbeitung der Metalle noch in den Kinderschuhen ruhte. Papin gab daher diese Gedanken auf und wandte sich wieder der Verwendung des Wasserdampfes zu.

Mehr als hundert Jahre ruhte nun der Gedanke der Explosionsmaschine; die allgemeine Aufmerksamkeit wendete sich den Fortschritten der Dampfmaschine zu und erst mit Ende des achtzehnten Jahrhunderts wurde neuerdings der Gedanke aufgegriffen, an Stelle des Dampfes permanente Gase zum Betriebe von Kraftmaschinen zu verwenden.

John Barber nahm 1791 ein Patent auf eine Vorrichtung, durch Vergasung von Holz, Kohle oder anderen Brennstoffen Kohlenwasserstoffe zu erzeugen, diese in einem Gefäße, „exploder“ genannt, mit Luft zu mischen und beim Austritte aus demselben zu entzünden; der austretende Feuerstrahl sollte dann gegen ein Schaufelrad wirken und dieses umtreiben.

Einen weiteren Fortschritt bedeutet das Patent Robert Street vom Jahre 1794. Auf den durch Feuer erhitzten Boden des Arbeitcylinders

einer Kolbenmaschine wurde Terpentin oder Teeröl gespritzt und hierdurch vergast; bei der Bewegung des Kolbens wurde das so gebildete Gas mit Luft gemengt und durch eine außen brennende Flamme entzündet. Die Explosionswirkung trieb den Kolben in die Höhe; durch ein Hebelwerk wurde Kraft und Bewegung auf die Arbeitsmaschine übertragen. Auch mit dieser Maschine wurde ihrer Unvollkommenheit wegen kein Erfolg erzielt. Als nun kurze Zeit darauf Lebon durch die Entdeckung des Leuchtgases ein brennbares Gas schuf, wendete sich die Aufmerksamkeit neuerdings in erhöhtem Maße diesem Gegenstande zu und es entstand eine Reihe neuer Anordnungen, so die atmosphärische Gasmaschine mit Flammenzündung von Samuel Brown (1823); die doppeltwirkende, einer Hochdruckdampfmaschine ähnlich angeordnete Gasmaschine von W. Wright (1833); ferner drei einfach- bzw. doppeltwirkende Maschinen von William Barnett (1838), welcher in seinen Patentschriften die Grundlagen, auf welchen die heutige Gasmaschine der Wesenheit nach beruht, bereits ziemlich klar bespricht. Barnett war darnach der erste, welcher den Laderaum bereits als Verlängerung des Arbeitssylinders ausbildete, die angesaugte Gasmischung durch die im Laderaume zurückgebliebenen Verbrennungsprodukte verdünnte, die Zündung in den Totpunkt verlegte und Kompression der Mischung behufs besserer Entzündung derselben verwendete\*).

In den beiden darauffolgenden Jahrzehnten wurde eine Reihe weiterer Patente genommen, von welchen speziell die Maschine von Barsanti und Matteucci (1857) Erwähnung verdient, weil der freie Flug des Arbeitskolbens infolge der Explosionswirkung des unter dem Kolben gesaugten Gemisches zum erstenmale in Anwendung kam. In diese Zeit fallen die Patente von Hugon 1858, Reithmann 1858 und W. Siemens 1860. Von diesen Konstruktionen hat nur jene des Uhrmachers Reithmann in München (*Zeitschrift der Vereins d. Ing.* 1884 und *Bayr. Kunst- und Gewerbeblatt* 1860) insofern Bedeutung erlangt, weil sie später als Unterlage zur Herabminderung der Verdienste Ottos ausgenützt wurde.

Der größte Teil dieser Erfindungen blieb jedoch der Allgemeinheit der Techniker jener Zeit fremd; keine derselben kam über das Stadium des Versuches hinaus, nachdem einerseits die praktischen Schwierigkeiten, welche zu jener Zeit der Verkörperung solcher Ideen im Wege standen, nicht überwunden werden konnten, andererseits der Ehrgeiz der meisten Erfinder sich nicht mit dem bescheideneren Erfolge, eine Kleinkraftmaschine zu schaffen, begnügen wollte, sondern von dem Bestreben geleitet

\*) Zeichnungen und Beschreibung der Maschinen von Brown, Wright und Barnett siehe: D. Clerk, *The Gas- and Oil-Engine*, 6. Aufl., London 1896.

war, in der Gasmaschine schon einen Ersatz der Dampfmaschine überhaupt zu sehen; dieses Bestreben kam in vielen Patentschriften deutlich zum Ausdrucke.

Lenoir war es endlich 1860 gegönnt, jene praktischen Schwierigkeiten zu überwinden und mit seiner Maschine Erfolge zu erzielen, die so vielen vor ihm versagt waren. Prof. Tresca hat eingehende Versuche mit den Lenoirschen Maschinen durchgeführt. Der Gasverbrauch betrug, wie bereits früher erwähnt, durchschnittlich 2,8 cbm Pariser Gas pro PS<sub>i</sub>-Stunde. Eine Maschine von 210 mm Durchmesser und 410 mm Hub lief mit 50 Umdrehungen pro Minute; der maximale Druck im Cylinder erreichte ungefähr 3½ kg/qcm, der mittlere Druck 0,58 kg/qcm; die Maschine leistete daher 2 PS<sub>i</sub>; ein Resultat, welches in anbetracht der Größe der Maschine als ein sehr minderwertiges bezeichnet werden muß. Der indizierte Wirkungsgrad erreichte als Durchschnittswert  $\eta = 0,054$ ; es wurden daher nur etwa 5½% des Wärmewertes des verbrauchten Gases in indizierte Arbeit umgesetzt.

Die Priorität Lenoirs wurde, nachdem derselbe mit seiner Maschine sichtbare Erfolge erzielt hatte, von dem Direktor der Pariser Gasanstalt Hugon, sowie von dem Uhrmacher Reithmann, welche sich auf ihre Patente vom Jahre 1858 stützten, bestritten. Reithmann kann übergangen werden, während Hugon später insofern eine Verbesserung der Lenoirschen Maschine erzielte, daß er die elektrische Zündung, die nur zu oft versagte und infolge dessen zu Minderleistungen Veranlassung gab, durch Flammzündung ersetzte. Diese Verbesserung war jedoch auch nicht neu, da bereits früher Street und Brown, wie schon erwähnt, die Flammzündung in Vorschlag gebracht hatten. Eine weitere Neuerung Hugons bestand darin, daß er Wasser in den Cylinder einspritzte, wodurch ein Teil der Explosionswärme, welcher sonst nutzlos durch die Wandungen abgeführt wurde, zur Verdampfung des Einspritzwassers, somit zur Erhöhung des mittleren Betriebsdruckes verwertet werden konnte. Der gleiche Gedanke wurde später wiederholt aufgegriffen, ohne daß damit ein besonderes Resultat erzielt worden wäre. Auch in neuester Zeit hat Bánki bei seinem Petroleummotor die Wasserinjektion wieder angewendet, um den Kompressionsenddruck, ohne vorzeitige Selbstzündung der Ladung befürchten zu müssen, hinauftreiben und dadurch den Wirkungsgrad der Maschine erhöhen zu können.

Durch diese Verbesserungen der Lenoirschen Maschine erreichte Hugon einen etwas ökonomischeren Betrieb, indem seine Maschinen durchschnittlich 2,4 bis 2,5 cbm Gas pro PS<sub>i</sub>-Stunde verbrauchten; sie arbeiteten ebenso ruhig wie Lenoirs Maschine.

Der große Gasverbrauch dieser Maschinen verhinderte ihre aus-

gedehntere Verwendung und führte zu neuen Konstruktionen, in der Erwartung, mit diesen bessere Resultate zu erzielen. Die großen Wärmeverluste waren den Erfindern bekannt; die Versuche, durch Wassereinspritzung und Dampfzufuhr die Leistung zu erhöhen, führten zu keinem Resultate und so vergingen einige Jahre fieberhafter, aber erfolgloser Tätigkeit.

Die durch die Explosion einer Gasmischung hervorgerufene Kraft ist von außerordentlich kurzer Dauer; die anfängliche hohe Pressung verschwindet in der kürzesten Zeit; wenn daher Arbeit geleistet werden soll, bevor durch die Abkühlung die ganze Wärme aufgezehrt wird, dann muß dieser Umsetzungsprozeß sich sehr rasch vollziehen. An diesem Übelstande krankten die Maschinen von Lenoir und Hugon und der geringe Nutzeffekt derselben war in erster Linie eine Folge der geringen Kolbengeschwindigkeit nach erfolgter Explosion. Jede Arbeitsmethode, welche sich mit größerer Kolbengeschwindigkeit vereinen läßt, wird daher auch einen ökonomischeren Betrieb ergeben und es ist bereits durch die Erfahrung hinlänglich bestätigt, daß der Wirkungsgrad einer Maschine wächst mit der Kürze der Zeit, während welcher die Ladung nach erfolgter Explosion mit den umgebenden Wandungen in Berührung steht. Erfolgt die Expansion jedoch zu rasch, bevor die Explosion noch vollendet ist, dann findet natürlich statt Arbeitsgewinn Arbeitsverlust statt; die Expansion soll nicht früher beginnen, als die Explosion vollendet bezw. das Maximum des Druckes erreicht ist, weil dieselbe sonst einen Spannungsverlust zur Folge hätte. Bei Maschinen nach Lenoirs System kann, nachdem die Entzündung ungefähr in der Mitte des Hubes stattfindet, bei hoher Kolbengeschwindigkeit leicht der Fall gedacht werden, daß die Expansion im Verhältnisse zur Explosion so rasch verläuft, daß keine wesentliche Druckzunahme stattfindet, in welchem Falle die geleistete Arbeit gleich oder nahezu gleich Null werden könnte. Der erzielbare Arbeitsgewinn resultiert daher durch rasch verlaufende Expansion nach vollständig erfolgter Explosion. Dieser Weg wurde von verschiedenen Erfindern durch die Methode des freifliegenden Kolbens eingeschlagen; statt die durch die Explosion hervorgerufene Kraft auf einen mit der Kurbel zwangläufig verbundenen Kolben zu übertragen, wurde der Kolben freifliegend angeordnet. Durch die Explosionswirkung erhält der Kolben hohe Geschwindigkeit, welche zur Kompression der Außenluft ausgegeben wird, ein Vakuum unter dem Kolben im Cylinder erzeugend. Sobald die ganze Bewegungsenergie aufgezehrt ist, kommt der Kolben in seiner höchsten Lage zur Ruhe und kehrt unter dem Überdruck der Atmosphäre in seine ursprüngliche Lage zurück. In dem Momente als der Rücklauf beginnt, wird durch eine Kuppelung die Bewegung der Kolbenstange auf die Kurbelwelle übertragen.

Diese Gruppe von Maschinen, welche man mit dem Ausdrucke atmosphärische Gaskraftmaschinen bezeichnet, ist daher durch folgende Arbeitsweise charakterisiert: Benützung einer explosiblen gasförmigen Arbeitsflüssigkeit bei atmosphärischer Pressung vor der Explosion; die Explosion wirkt auf einen außer Verbindung mit der Kurbelwelle stehenden, freifliegenden Kolben, dessen Geschwindigkeit zur Erzeugung eines Vakuums aufgezehrt wird; der Arbeitsdruck wird auf den im Momente der Bewegungsumkehr mit der Maschinenwelle gekuppelten Kolben durch den Druck der Atmosphäre übertragen.

Wie bereits früher erwähnt, waren die ersten, welche diese Arbeitsmethode in Vorschlag brachten, Barsanti und Matteucci (1857); allein die konstruktiven und baulichen Schwierigkeiten wurden erst im Jahre 1866 durch die Erfindung Otto und Langens überwunden.

**218. Die atmosphärische Gaskraftmaschine von Otto und Langen** wurde im Jahre 1867 durch die Pariser Weltausstellung bekannt. Obwohl dem Prinzipie nach identisch mit der zehn Jahre vorher von Barsanti und Matteucci ersonnenen Maschine, war sie jedoch von den Erfindern mit großer Sorgfalt bis auf das kleinste Detail durchdacht und konstruktiv durchgearbeitet, sodaß selbst im Laufe der Zeit keine wesentlichen Verbesserungen erforderlich waren. Die Maschine war hinsichtlich der Ökonomie des Betriebes allen vor ihr bekannt gewordenen Maschinen weit überlegen; sie hatte jedoch den Fehler, daß ihre räumliche Größe und somit auch das Gewicht der Maschine, durch das Arbeitsprinzip bedingt, außer Verhältnis zu der Leistung stand und daß andererseits ihr Gang infolge des Schaltwerkes mit einem lärmenden Geräusch verbunden war, welches sich für die Umgebung um so unangenehmer fühlbar machte, da es nicht in regelmäßigen Intervallen erfolgte. Dieses Geräusch war vielfach ein Hindernis für die Anwendung der Maschine, und selbst dort, wo solche Maschinen aufgestellt waren, mußten sie in vielen Fällen zufolge Klage der Anrainer entfernt und durch einen anderen Motor ersetzt werden. Nachdem die ganze Energie der Explosion dazu verbraucht wurde, den Kolben in die Höhe zu schleudern, so war der Rückstoß so bedeutend, daß nur ganz kleine Maschinen in höheren Stockwerken, ohne spezielle Verstärkung des Bodens bzw. der Deckenkonstruktion, verwendet werden konnten. Aus diesem Grunde fanden auch Maschinen über 3 PS Leistung selten Verwendung.

Der Erfolg der atmosphärischen Gasmachine war nicht so durchschlagend wie jener der Lenoirschen, aber viel nachhaltiger, indem dieselbe durch volle zehn Jahre (als Kleinmotor) fast ausschließlich



Verwendung fand und trotz ihrer prinzipiellen Mängel in Stärken von  $\frac{1}{4}$  bis 4 PS in mehr als 5000 Exemplaren ausgeführt wurde.

Der Hauptvorteil dieser Maschine, welcher ihre unangenehmen Eigenschaften in vielen Fällen vergessen ließ, war der verhältnismäßig geringe Gasverbrauch von im Mittel 1,2 cbm pro PS<sub>e</sub>-Stunde, welcher infolge einiger Verbesserungen später auf 1, ja sogar auf 0,8 cbm vermindert wurde.

Eine von dem Verfasser seinerzeit untersuchte Maschine von 320 mm Cylinderdurchmesser und dem größten beobachteten Hub von 1050 mm arbeitete mit 29 Explosionen pro Minute und ergab eine Leistung von 2,9 PS<sub>i</sub>, bzw. 2,0 PS<sub>e</sub>. Der Gasverbrauch betrug 0,7 cbm pro PS<sub>i</sub>-Stunde, somit 1 cbm pro PS<sub>e</sub>-Stunde. In dieser Verbrauchsziffer war jedoch die

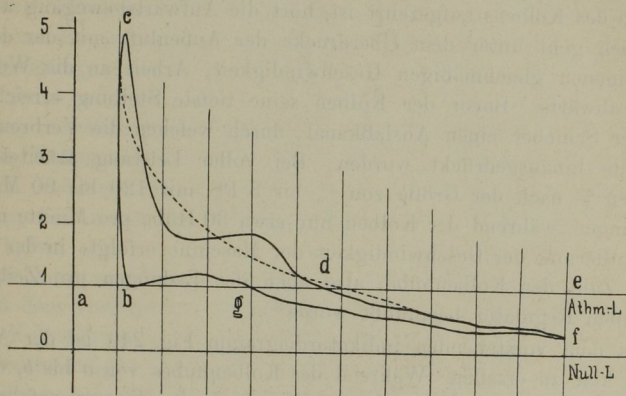


Fig. 249.

für die Entzündungsflamme erforderliche Gasmenge nicht inbegriffen; dieselbe betrug durchschnittlich  $\frac{1}{3}$  cbm pro Stunde. Fig. 249 zeigt das Diagramm der vollbelasteten Maschine.

Die vollgezogene Linie ist die wirkliche Indikatorkurve, während die strichlierte Linie die tatsächliche Spannungskurve darstellt, welche vom Indikator infolge der Schwingungen der Feder nur umschrieben wurde.

Die Maschine von Otto und Langen, welche heute nur mehr geschichtliches Interesse bietet, besteht aus einem langen stehenden, von einem Wassermantel umgebenen Cylinder, welcher nach oben für die Außenluft offen ist; in demselben bewegt sich ein Kolben, welcher statt einer gewöhnlichen Kolbenstange eine Zahnstange trägt. Quer über dem Cylinder liegt die Schwungradwelle (nachdem die Maschine keine Kurbel besitzt, kann die Welle auch nicht Kurbelwelle genannt werden). Auf dieser Welle sitzt ein Zahnrad, in welches die verzahnte Kolbenstange eingreift; während der Aufwärtsbewegung des Kolbens läuft dieses Zahn-

rad frei auf der Welle; sobald der Kolben jedoch niedergeht, nimmt dasselbe durch eine eigentümliche Reibungskupplung die Welle mit. Die Welle läuft daher frei nach einer Richtung um, während der Kolben sich frei nach aufwärts bewegen kann, um jedoch während der Abwärtsbewegung einen Arbeitsimpuls zu geben. Während des ersten Teiles seines Anhubes saugt der Kolben, durch ein Schaltwerk von der Schwungradwelle mitgenommen, das explosive Gemenge aus Leuchtgas und Luft. Durch einen außerhalb befindlichen Gasbrenner und die Vermittlung eines Schiebers wird die Ladung im geeigneten Momente entzündet; die Explosionswirkung schleudert den Kolben mit Heftigkeit, ohne daß derselbe Arbeit verrichtet, frei in die Höhe; sobald die Energie der Bewegung durch Bildung des Vakuums unterhalb des Kolbens aufgezehrt ist, hört die Aufwärtsbewegung auf und der Kolben geht unter dem Überdrucke der Außenluft mit der Maschine eigenen gleichmäßigen Geschwindigkeit, Arbeit an die Welle abgebend, abwärts. Bevor der Kolben seine tiefste Stellung erreicht hat, öffnet der Schieber einen Auslaßkanal, durch welchen die Verbrennungsrückstände hinausgedrückt wurden. Bei voller Leistung arbeiteten die Maschinen je nach der Größe von  $\frac{1}{4}$  bis 3 PS mit 120 bis 90 Minuten-umdrehungen, während der Kolben nur etwa 30 Hübe pro Minute machte. Die Regulierung der Geschwindigkeit der Maschine erfolgte in der Weise, daß die Zahl der Kolbenhübe, also auch der Ladungen pro Zeiteinheit durch einen Regulator beeinflußt wurde\*).

Aus dem vorstehenden Indikatordiagramm Fig. 249 ist der Arbeitsvorgang klar zu ersehen. Während des Kolbenhubes von *a* bis *b*, welcher unter Ausgabe der im Schwungrade aufgespeicherten Energie erfolgt, wird die Ladung in den Cylinder eingesaugt; im Punkte *b* bleibt der Kolben gleichsam einen Moment in Ruhe, da hier infolge Einführung der Entzündungsflamme und der unmittelbar darauf folgenden Explosion ein Druckwechsel eintritt. Die Spannung erreichte ungefähr 3,8 kg/qcm Überdruck. Durch die Explosion wird der Kolben förmlich hinaus geschossen; die Gase expandieren und der Druck fällt rasch ab. Im Punkte *d* hat die Spannung jene der Atmosphäre erreicht. Die Explosionswirkung auf den Kolben hört in diesem Momente auf; der Druck unter demselben nimmt weiter ab, infolgedessen bietet die Außenluft einen fortwährend zunehmenden Widerstand. Während der Bewegung des Kolbens von *c* bis *d* ist die Spannung von 3,8 kg/qcm auf jene der Atmosphäre gefallen; die mittlere Spannung beträgt 0,88 kg/qcm, der zurückgelegte Weg un-

\*) Ausführliche Beschreibung und Zeichnungen der Maschine siehe: Musil, *Die Motoren für das Kleingewerbe*, 2. Aufl. 1883; Schöttler, *Die Gasmachine*, 3. Aufl. 1899. Knoke, *Die Kraftmaschinen des Kleingewerbes*, 2. Aufl. 1899. Clerk, *The Gas- and Oil-Engine*, 7. Aufl. 1896.

gefähr 0,4 m, somit wurden rund 280 kg/m an den Kolben abgegeben und es frägt sich, wozu diese Arbeit verwendet wurde. In einer gewöhnlichen Kolbenmaschine würde diese Arbeit an die Kurbel und bei unbelasteter Maschine an das Schwungrad abgegeben; hier ist jedoch keine Kurbel, der Kolben vollkommen frei beweglich, somit nimmt derselbe die ganze Energie auf; sein Gewicht wurde in dieser Zeit um 0,4 m gehoben, der Rest obiger Energie ist daher in diesem Momente noch im Kolben aufgespeichert; derselbe muß sich daher nach aufwärts bewegen, bis die ganze Energie zum Anheben des Kolbens, zur Überwindung des äußeren Luftdruckes und der Reibung aufgebraucht worden ist. Wenn der Kolben gewichtslos und die Reibung gleich Null wäre, dann müßte die Diagrammfläche *bcd* gleich der Fläche *def* sein, oder mit anderen Worten, die Arbeit, welche infolge der Explosion auf den Kolben übertragen und zur Erzeugung seiner Geschwindigkeit verwendet wurde, müßte jener Arbeit gleich sein, welche die Luft der Bewegung des Kolbens entgegensetzt, um denselben wieder zur Ruhe zu bringen.

Der Kolben der in Rede stehenden Versuchsmaschine wog 50 kg; die zum Anheben desselben auf 0,4 m erforderliche Arbeit ist daher 20 kg/m; die Energie der Bewegung des Kolbens beträgt daher  $280 - 20 = 260$  kg/m.

Berechnet man die Kolbengeschwindigkeit, so findet man, daß dieselbe in dem vorliegenden Falle im Punkte *d*, in welchem der innere und äußere Kolbendruck sich ausgleichen, nahe 10 m beträgt; da der Kolben diese Geschwindigkeit erlangte, nachdem er sich um 0,4 m aufwärts bewegt hatte und hierzu 0,28 Sekunden benötigte, so war die mittlere Kolbengeschwindigkeit ungefähr 1,4 m. Diese Geschwindigkeit ist nicht wesentlich höher wie jene der Maschine von Lenoir und Hugon und kleiner wie die in modernen Gaskraftmaschinen gebräuchliche Geschwindigkeit von 2 bis 2,5 m.

Wenn die Gase nicht seitens des Cylinders abgekühlt würden, wäre die Linie *cdf* eine Adiabate und die Linie *fg* würde mit der Expansionslinie *df* zusammenfallen; die Fläche *def* des Vakuumdiagramms ist nur eine Folge der Explosionsenergie, die Fläche *dfg* hingegen resultiert aus der Abkühlung der Gase.

Ohne kühlenden Einfluß der Wandungen würde auch die Fläche *bcd* und daher auch die ihr theoretisch gleiche Fläche *def* größer sein, d. h. das erzielte Vakuum würde ohne Kühlung größer sein.

Da die Kolbengeschwindigkeit nicht wesentlich größer ist wie jene der Lenoir- und Hugonmaschine, so kann darin die ökonomische Überlegenheit der atmosphärischen Gasmaschine nicht gesucht werden. Der kühlende Einfluß der Wandungen dürfte sich bei beiden Maschinentypen

gleichstellen; bei den Maschinen der Lenoirgruppe war die Zahl der Kolbenhübe pro Zeiteinheit größer, daher der Gaskonsum pro Hub geringer als bei einer Otto- und Langenmaschine gleicher Stärke; diese arbeitete dafür mit wenigen Hüben aber großen Cylindern. Die höhere Betriebsökonomie muß daher durch andere Ursachen begründet sein. Diese Ursachen sind zweierlei Art: einerseits ist der Kolben in Ruhe, bis derselbe durch die Explosion Bewegung erhält, andererseits wird die Expansion sehr weit getrieben, denn der große Cylinder gestattet eine Expansion gleich dem zehnfachen Volumen vor der Explosion und zwar zunächst durch Expansion auf den Atmosphärendruck und dann durch Kühlung bis auf das erreichbare Vakuum. Infolge des ersteren Umstandes findet die Pressung Zeit sich bis zu ihrem Maximum zu erhöhen, bevor sich der Kolben bewegt; der höchste Druck wird also bei konstantem Volumen erreicht, wie dies die Theorie verlangt; außerdem bleiben infolge der Hubpausen Kolben und Cylinder kühl. Die Ladung wird daher vor der Explosion nur wenig erhitzt. Die Explosion ergibt bei geringerer Temperaturerhöhung einen höheren Druck.

Eine Untersuchung des Diagrammes ergibt, daß der größte Druck, wie vorhin erwähnt, 3,8 kg/qcm über den Atmosphärendruck beträgt, entsprechend einer Temperatur von 1350° C absolut. Die Ladung bestand aus 1 Teil Gas auf 7 Volumteile Luft; die vollständige Verbrennung derselben im Momente der Explosion würde einen Druck von 11,8 kg/qcm ergeben; da der größte wirklich erreichte Druck jedoch nur 32 Prozent der disponiblen Wärme entspricht, so müssen die restlichen 68 Prozent während der Expansion entwickelt worden sein. Die Linie *cd* liegt so hoch über der Adiabate, daß sie nahezu isothermisch ist; die Temperatur in *d* beträgt ungefähr 1300° statt 730° absolut bei adiabatischer Expansion. Die erhitzten Gase nehmen daher von *c* bis *d* Wärme auf und da die Verbrennung die einzig mögliche Wärmequelle ist, so folgt, daß die Verbrennung bei dem erreichten Maximaldruck nicht vollendet ist und die 68 Prozent der totalen Wärme erst während der Expansion entwickelt werden. Im Punkte *d* scheint die Verbrennung vollendet zu sein, da während der Erhebung des Kolbens von *d* bis *e* Abkühlung konstatiert werden kann, indem die Temperatur in *f* ca. 870° C beträgt, während sie bei adiabatischer Zustandsänderung 960° betragen sollte. Während der Kompression von *f* bis *g* bis auf den Atmosphärendruck blieb die Temperatur nahezu konstant 870° infolge des kühlenden Einflusses des Cylinders.

Diese Erscheinungen treten bei gasärmeren und gasreicheren Mischungen um so deutlicher hervor und bestätigen die vorstehende Erklärung derselben. Die Kenntnis dieser Erscheinungen trug wesentlich zur spä-

teren Vervollkommnung der Gasmaschine bei; aus diesem Grunde wurde, obgleich die atmosphärische Gasmaschine selbst nur mehr historisches Interesse bietet, deren Arbeitsprozeß an dieser Stelle etwas eingehender besprochen.

In den der Erfindung Langens und Ottos folgenden zehn Jahren (1867—1877) waren nicht nur die Erfinder selbst bemüht, die Mängel und Nachteile ihrer Konstruktion zu beseitigen, sondern auch von anderer Seite wurden, angeeifert durch die großen Erfolge der Langen- und Otto-Maschine, Versuche gemacht, die Vorteile derselben ohne deren Nachteile, in erster Linie mit Beseitigung des äußerst unangenehmen Rückstoßes und des lästigen Geräusches der Zahnradkuppelung derselben, zu erreichen. Unter den diese Ziele verfolgenden Konstruktionen ist die Gasmaschine von Gilles in Köln in weiteren Kreisen bekannt und durch die einschlägige Litteratur (siehe Fußnote auf Seite 642) vielfach besprochen worden.

Die Maschine von Gilles unterscheidet sich von der Langen-Otto-Maschine in erster Linie dadurch, daß statt des einen Kolbens zwei Kolben verwendet wurden, wovon der obere als Flugkolben, der andere, auf gewöhnliche Weise mit der tiefliegenden Kurbelwelle zwangsläufig verbunden, als Arbeitskolben diente.

Die Wirkungsweise der Maschine ist folgende: Der Flugkolben steht in seiner tiefsten Stellung, unmittelbar anschließend an den in seiner oberen Totlage stehenden Arbeitskolben; dieser bewegt sich infolge Energie des Schwungrades etwas nach abwärts, die Ladung in den Cylinder aufnehmend. Im geeigneten Momente erfolgt die Zündung; der Flugkolben fliegt nach aufwärts, den Gasen den zur freien Ausdehnung erforderlichen Raum schaffend, während der Arbeitskolben infolge der Explosionswirkung seinen Niederhub vollendet. Infolge dieser entgegengesetzten Bewegung der beiden Kolben bildet sich zwischen denselben ein Vakuum; der Flugkolben wird durch eine Kuppelung in seiner obersten Stellung zurückgehalten, während der Arbeitskolben unter dem Drucke der Atmosphäre arbeitverrichtend wieder zurückkehrt. Der Flugkolben wird wieder frei und fällt, die Verbrennungsprodukte hinausdrückend, in seine Anfangsstellung zurück.

Die Maschine arbeitete allerdings ruhiger, war jedoch weder so einfach noch so ökonomisch wie die Langen-Otto-Maschine und fand daher eine nur geringe Verbreitung.

Außer dieser Maschine, deren Konstrukteure sich die Aufgabe gestellt hatten, die atmosphärische Gaskraftmaschine zu verbessern, entstand während dieser Periode auch eine Reihe von Maschinen, welche wieder auf das alte Prinzip der direkten Wirkung ohne Verdichtung der Ladung zu-

rückgriffen und daher auch keine dauernden Erfolge zu erzielen vermochten. In diese Gruppe gehören die zu jener Zeit in weiteren Kreisen bekannt gewordenen, nur für minimale Leistungen bestimmten Gasmaschinen von Bisshop, mit stehendem Cylinder und seitlich neben demselben gelagerter Kurbelwelle; die direkt rotierende Kolbenmaschine von Ravel, sowie eine zweite Anordnung derselben mit oszillierendem Arbeitcylinder; die Gasmaschine von Bénier und Lamart, bei welcher die Bewegungsübertragung von dem einseitig wirkenden Kolben auf eine über dem Cylinder liegende Kurbelwelle durch Hebel erfolgte, u. a. Diese Konstruktionen bieten derzeit so wenig Interesse, daß auf eine Besprechung derselben um so weniger eingegangen werden soll, als Zeichnung und Beschreibung dieser Maschinen in der vorhin angeführten Litteratur über Gasmaschinen bezw. Kleinmotoren zu finden sind.

Wenn man die mit der Erfindung Lenoirs beginnende Periode der Entwicklungsgeschichte der Gasmaschine als ersten Zeitabschnitt (1860 bis 1867), die durch die Erfindung der atmosphärischen Gaskraftmaschine von Langen und Otto hervorgerufene Umwälzung im Baue der Gasmaschine als zweiten Zeitabschnitt (1867 bis 1878) der Geschichte unserer heutigen Gasmaschine betrachtet, dann bildet die Zeit vom Jahre 1878 bis zum heutigen Tage die dritte und letzte Periode.

**219. Die Viertaktmaschine.** Im Jahre 1878 brachte die Pariser Weltausstellung einen geräuschlos und dabei sehr ökonomisch arbeitenden Gasmotor der Deutzer Gasmotorenfabrik vorm. Langen & Otto, welcher zur Ehrung des Erfinders „Ottos geräuschloser Motor“ genannt wurde; diese Maschine war und blieb bis zum heutigen Tage der Ausgangspunkt einer neuen, für den Ausbau und die zielbewußte Entwicklung der Gasmaschine hochwichtigen Zeitperiode.

Mit kühnem Griffe verwarf die Deutzer Firma die Ergebnisse der durch ihre atmosphärische Gaskraftmaschine hervorgerufenen Umwälzung und ging wieder auf das Arbeitsprinzip der direktwirkenden Maschine zurück.

Die großartigen Erfolge, welche mit Ottos Motor erzielt wurden, waren nur durch gänzliche Beseitigung der Übelstände der älteren direktwirkenden Maschinen möglich.

Diese Übelstände in genialer Weise gründlich beseitigt und Neuerungen eingeführt zu haben, welche der Maschine bei ruhigem und nahezu geräuschlosem Gange volle Überlegenheit über alle übrigen Gasmotoren sicherten, war das große Verdienst Ottos, wengleich zugegeben werden muß, daß die drei Grundgedanken, auf welchen das Wesen der Viertaktmaschine beruht, nicht zum erstenmale von Otto ausgesprochen wurden,

indem bereits Barnett (1838) die Grundprinzipien des Otto-Motors, vielleicht auch ohne deren Wert wirklich erkannt zu haben, zur Anwendung brachte; der Münchener Uhrmacher Reithmann soll, wie bereits früher erwähnt, die Verdichtung der Ladung 1858 angewendet haben; das gleiche Prioritätsrecht wurde auch von den Franzosen Million (1861) und Beau de Rochas (1862) beansprucht; auch C. W. Siemens schlug 1862 die Kompression der Ladung vor ihrer Entzündung vor; ebenso trat Prof. Gustav Schmidt 1861 in der Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure für die Kompression durch die Bemerkung ein: Das erzielbare Resultat würde viel günstiger sein, wenn durch eine von der Maschine betriebene Pumpe Luft und Gas vor Eintritt in den Cylinder komprimiert würde.

Die Vorteile der Verdichtung der Ladung vor ihrer Entzündung zur Erreichung einer viel größeren Expansion scheinen zum erstenmale von Beau de Rochas klar erkannt und in seinem französischen Patente vom Jahre 1862 niedergelegt worden zu sein. In diesem Patente wurde ausdrücklich bemerkt, daß die Verdichtung so weit als möglich getrieben werden soll, ohne jedoch an die Grenze der Selbstentzündung infolge der Temperatursteigerung zu gelangen. Rochas erwähnte ferner einer Anordnung, um die Ladung auch ohne Hilfe einer eigenen Pumpe verdichten zu können und stellte als Arbeitsweise einer solchen Maschine die nachstehenden vier Operationen auf, welche sich zu einer Seite des Arbeitskolbens während vier Hüben bezw. zwei Umdrehungen derselben abspielen sollen:

- 1) Einsaugen der Ladung aus Gas und Luft während des Aushubes der Maschine.
- 2) Verdichtung derselben während des Kolbenrücklaufes in den verhältnismäßig großen schädlichen Raum.
- 3) Entzündung im Totpunkt und darauffolgende Expansion während des dritten Hubes.
- 4) Ausstoßen der Verbrennungsprodukte während des vierten und letzten Hubes.

Dies war somit die erste Darstellung des Viertaktarbeitsprozesses, welcher die Grundlage fast aller Gasmaschinen heutigen Tages bildet.

Beau de Rochas bezeichnete in seiner Patentschrift außer der Verdichtung der Ladung hohe Kolbengeschwindigkeit und kleine Cylinderoberflächen als weitere Bedingungen zur Erreichung hoher Betriebsökonomie. So außerordentlich schätzenswert diese Anregungen auch waren, so blieben sie dennoch lange Zeit hindurch unproduktiv; es fehlte außer der richtigen Erfassung ihrer Bedeutung vor allem an der Fähigkeit jener Zeit, mit Überwindung der sich ergebenden praktischen Schwierigkeiten diese Anregungen vereint zur Ausführung zu bringen. Erst im Jahre 1876 ge-

lang es Dr. Otto, welcher von den längst vergessenen und überhaupt wenig bekannt gewordenen Patentschriften Barnetts, Millions, de Rochas etc. Kenntnis erlangt haben dürfte, den Viertaktprozeß wieder zu erfinden und die von so außerordentlichem Erfolge begleitete Maschine, in welcher dieser Prozeß zur Ausführung gelangte, in die Praxis einzuführen.

Ottos geräuschloser Motor (von dem Erfinder so genannt, zum Unterschiede von der lärmenden Vorgängerin desselben, der atmosphärischen Gaskraftmaschine von Otto und Langen) war nicht nur die erste Gasmaschine, welche in kürzester Zeit zu so außerordentlicher Bedeutung und Verbreitung gelangte, sondern unbestritten eine der genialsten und erfolgreichsten Erfindungen auf dem Gebiete des gesamten Maschinenwesens der Gegenwart. Ottos Motor war und ist auch heute noch das Vorbild aller seit dem Erlöschen des Ottoschen Originalpatentes entstandenen, zum Teil sehr sinnreichen Konstruktionen; in seiner klassischen Einfachheit und vorzüglichen Wirkungsweise wurde er auch bis auf den heutigen Tag noch von keiner derselben wesentlich übertroffen.

Die Maschine besteht der Hauptsache nach aus einem vorn offenen, einfachwirkenden, rückwärts geschlossenen und zum Lade- oder Verdichtungsraum verlängerten Cylinder, in welchem sich ein Plungerkolben bewegt, der einerseits die Ladung der Maschine besorgt, andererseits Kraft und Bewegung und zwar zumeist ohne eigene Geradführung, also direkt mittels Pleuelstange auf die Kurbel überträgt. Das Volumen des Laderaumes hängt von der zu erreichenden Kompressionsendspannung ab; bei den älteren Maschinen war dasselbe gewöhnlich größer als das halbe Hubvolumen; die heutige Gasmaschine arbeitet jedoch mit wesentlich höherer Verdichtungsspannung, daher kleinerem Volumen des Laderaumes. Die Kompressionsendspannung hängt von der Art der Arbeitsflüssigkeit bzw. von der Entzündungstemperatur der explosiblen Ladung ab, ist daher, um vorzeitige Selbstzündung zu vermeiden, verschieden, je nachdem Leuchtgas, Kraftgas oder Gichtgas bzw. flüssige Brennstoffe verwendet werden oder wie beim Dieselmotor, nur reine atmosphärische Luft komprimiert wird.

Während des ersten Hubes (aus der rückwärtigen Totlage des Kolbens gerechnet) wird das Gemenge aus Gas und Luft in den Cylinder gesaugt, um während des darauffolgenden Rücklaufes auf das Volumen des Laderaumes verdichtet zu werden. Sobald der Kolben seine Totlage erreicht, erfolgt die Zündung. Der dritte Hub vollzieht sich unter der Pressung der expandierenden Verbrennungsprodukte und ist der einzige Arbeitshub einer Arbeitsperiode. Während des zweiten Kolbenrücklaufes werden die Verbrennungsprodukte in die Atmosphäre ausgestoßen, mit Ausnahme der im Laderaume verbleibenden Rückstände, welche, falls sie nicht durch



eigene Vorrichtungen ausgetrieben werden, die darauffolgende frische Ladung, sich mit derselben mischend, verdünnen, um sodann an dem weiteren Arbeitsprozesse teilzunehmen.

Die Arbeitscylinder müssen, um übermäßiger Erhitzung derselben mit Rücksicht auf die Möglichkeit guter Schmierung vorzubeugen, entsprechend kühl erhalten werden; sie sind daher durchgehend mit Kühlmänteln umgeben, durch deren den Arbeitscylinder einhüllenden Hohlraum beständig Wasser zirkuliert, welches eine Abflußtemperatur von im Mittel 70° C besitzen soll; zumeist bleibt die Temperatur desselben jedoch merklich darunter. Da durch die Kühlung, welche als ein großer Übelstand mit in den Kauf genommen werden muß, ein guter Teil der bei der Verbrennung entwickelten Wärme (ungefähr 40 bis 50% derselben) für die Leistung der Maschine verloren geht, daher den Wirkungsgrad entsprechend vermindert, so soll die Abühlung nur so weit getrieben werden, als unbedingt erforderlich ist; eine wesentlich geringere Temperatur des abfließenden Kühlwassers ist somit erfahrungsgemäß direkt schädlich; andererseits wäre eine wesentlich höhere Temperatur gleichfalls von nachteiligem Einflusse begleitet, weil die Gefahr einer Zersetzung des Schmieröles und als Folge dessen mangelhafte Schmierung hierdurch nahegerückt würde. Die Wasserkühlung kann entweder durch Anschluß an eine vorhandene Wasserleitung oder durch Zirkulation des Wassers in Kühlgefäßen erfolgen.

Die steuernden Organe (Einlaß- bzw. Mischventil und Auslaßventil), am Boden des Cylinders angeordnet, werden am zweckmäßigsten durch eine parallel mit der Cylinderachse mit der halben Tourenzahl der Maschine laufende, von der Maschinenwelle meist durch Schraubenräder mit der Übersetzung 2:1 angetriebenen Steuerwelle betätigt. Es gibt aber auch Maschinen, bei welchen die Steuerwelle parallel zur Maschinenwelle liegt; der Antrieb erfolgt durch Stirnräder.

**220. Die Zündung.** Bei den älteren Viertaktmaschinen erfolgte die Zündung der verdichteten Ladung unter Vermittlung eines Schiebers durch eine außerhalb brennende Gasflamme. Um zu verhindern, daß die Gase im Momente der Zündung bzw. der Explosion durch den Schieber hinausschlügen, war der Schieber so eingerichtet, daß in einer kleinen Höhlung desselben zunächst eine Interimsflamme gebildet wurde, welche sodann, gegen die Atmosphäre abgeschlossen, durch einen Kanal mit dem Inneren des Cylinders in Verbindung gebracht, in diesen hineinschlug und die Ladung entzündete.

Diese ältere Flammenzündung ist mit der Schiebersteuerung, welche ein Hindernis für die Anwendung höherer Kompression bildete, gefallen;

erstere wurde durch die Glühkörper- oder elektrische Zündung, letztere durch die heute allgemein angewendete Ventilsteuerung ersetzt. Durch die Glühkörperzündung wurde auch das lästige Ausblasen der Zündflamme der älteren Zündmethode beseitigt.

Ganz abgesehen von der an und für sich komplizierten Flammenzündung war das Zündmittel selbst eine schwache Gasflamme, deren Wirkungsdauer sich auf eine verhältnismäßig kurze Zeit erstreckte, so daß auch die Zündung leicht versagte, sobald das Zusammenwirken der beteiligten Organe eine geringe Störung erfuhr. Die Zündung war daher Ursache häufiger Betriebsstörungen, da ja das sichere Arbeiten einer Gasmaschine in erster Linie von dem präzisen Funktionieren des Zündapparates abhängt. Derselbe bildet daher ein sehr wichtiges Organ jeder Gasmaschine, wird daher meist auch durch ein Patent geschützt; für die Detailkonstruktion desselben lassen sich somit auch keine allgemein gültigen Bestimmungen feststellen.

Die ersten Patente auf Glühzünder wurden schon vor etwa 25 Jahren genommen, doch fand diese Idee erst vor etwa 15 Jahren die erste praktische Verwendung. Das erste Patent, welches das Zündglührohr nachweisbar zum Gegenstande hatte, wurde 1879 Leo Funk verliehen, doch geriet diese Erfindung wieder in Vergessenheit, bis derselbe Gedanke, jedoch in vereinfachter Form 1883 von G. Daimler wieder aufgegriffen und patentiert wurde.

Das Bedürfnis nach dieser neuen Zündungsmethode war bei den Gasmaschinen jener Zeit nicht in dem Maße vorhanden, daß sich daraus das rasche Verdrängen der alteingebürgerten Flammenentzündung erklären ließe; die Fortschritte im Baue der Petroleum- und Benzinmotoren forderten jedoch eine geänderte Zündungsmethode, weil sich bei den Petroleummotoren die Flammenzündung ihrer ungenügenden Zündkraft wegen als wirkungslos erwies, während bei den Benzinmaschinen andererseits ein vollkommen luftdichter Abschluß des Cylinders nach außen, der leichten Entzündbarkeit der Benzindämpfe wegen, ein Gebot der Notwendigkeit war; dieser luftdichte Verschuß war jedoch bei Schiebersteuerung und Flammenzündung nicht zu erreichen.

Die praktische Verwertung der Glührohrzündung fällt daher mit der Vervollkommnung der Ölmaschinen zusammen, während diese andererseits erst durch die Erfindung dieses neuen Zündverfahrens lebensfähig wurden.

Zufolge ihrer Einfachheit, verlässlichen Wirkungsweise und des Wegfalles jeder mechanischen Betätigung hat die Glührohrzündung seitdem auch im Gasmotorenbau nebst der elektrischen Zündung allgemeine Anwendung gefunden; damit ging andererseits die Erhöhung des Kompressionsdruckes Hand in Hand.

Das Prinzip der Glührohrzündung besteht dem Wesen nach darin, daß ein kurzes, einseitig geschlossenes, also sackförmiges Röhrchen aus Metall oder Porzellan, das Glührohr, mit seinem offenen Ende mit dem Laderaume des Cylinders in geeigneter Verbindung steht, während es von außen durch einen Brenner erhitzt und in beständiger Rotglut erhalten wird. Gegen Ende der Kompressionsperiode dringt das explosible Ladungsgemisch in die rückwärtige glühende Partie des Röhrchens und wird entzündet; nachdem der Kolben und somit auch die Ladung mit Ende des Hubes zur Ruhe gekommen ist, teilt sich die Entflammung sofort der ganzen Ladung mit.

Das Glührohr selbst ist im allgemeinen von verschiedener Form und Größe. Von den hierzu verwendeten Materialien, als Porzellan, Platin, Nickel, Neusilber, Aluminium und einigen patentierten Legierungen hat bisher das Porzellan die größte Verbreitung gefunden, da es rasch glühend wird, die Gluthitze lange bewahrt, dabei durch die chemische Einwirkung der Flamme nicht leidet und billig ist; es hat nur die üble Eigenschaft, daß es zerbrechlich ist und leichter zerspringt. Platin besitzt die guten Eigenschaften des Porzellans, ist dabei sehr widerstandsfähig, jedoch verhältnismäßig kostspielig. Die übrigen Metalle haben sich weniger bewährt.

Der Wirkungsweise nach unterscheidet man im allgemeinen zwei Arten von Glührohrzündungen und zwar Zündung mit offenem Glührohr und Zündung mit gesteuertem Glührohr.

Bei der Zündung mit offenem Glührohr steht das Rohr mit seinem offenen Ende in dauernder Verbindung mit dem Laderaume des Cylinders. Die Erhitzung auf Hellrotglut wird entweder durch einen offenen oder einen Bunsenbrenner bewirkt; im ersteren Falle brennt die Flamme in einem kleinen, im Verbrennungsraume mit Schamotte ausgekleideten Kamin. Nach erfolgter Erhitzung wird die äußere Erwärmung meistens entbehrlich, da die durch die Explosion erzeugte Wärme, namentlich bei raschlaufenden Maschinen und dementsprechend in kurzen Intervallen wiederkehrender Zündung, genügt, um das Glührohr dauernd auf der erforderlichen Temperatur zu erhalten.

Die Wirkungsweise des offenen Glührohres läßt sich auf folgende Weise erklären: Das Innere des Rohres ist zum Schlusse der letzten Arbeitsperiode mit Verbrennungsrückständen gefüllt; diese Füllung, von atmosphärischer Spannung, bleibt während der darauffolgenden Saugperiode nahezu stagnierend; während des Verdichtungshubes werden die verbrannten Gase nach dem rückwärtigen Teile des Rohres gedrängt; gegen Hubende werden sie jedoch so stark verdichtet, daß die frische Ladung mit der glühenden Zone des Glührohres in Berührung kommt, sich entzündet und die Explosion verursacht.

Die Geschwindigkeit, mit welcher die Entflammung der ganzen Ladung stattfindet, hängt mit von dem Einmündungsorte, der Lage und Länge des Glührohres ab. Man kann daher den Moment der Zündung regulieren, indem man die Länge und somit auch den Inhalt des Glührohres veränderlich macht, z. B. in der Weise, daß man das Glührohr mit einem seitlichen Rohr verbindet, dessen Inhalt durch einen mittels Schraubengewinde verstellbaren Pfropfen veränderlich gemacht werden kann, eine Vorrichtung, welche bei neueren Ottomaschinen für kleine Leistungen angewendet wird.

Es läßt sich wohl nicht leugnen, daß derlei Vorrichtungen nicht zur Vereinfachung der Maschine und ihrer Bedienung beitragen, daher die meisten Gasmotorenfabriken Glührohre unveränderlicher Länge anwenden.

Die Erfahrung hat gezeigt, daß der Moment der Zündung stets sehr nahe am toten Punkte der Maschine liegt, und daß sich die Zündung auch bei Maschinen, die mit veränderlicher Stärke der Ladung arbeiten, zur richtigen Zeit einstellt, wenn man Sorge trägt, daß auch bei der geringsten Verdichtung frische Ladung mit Ende des Hubes die Glühzone des Glührohres erreicht.

Beim Anlassen des Motors können verfrühte Zündungen vor der Totlage des Kolbens eintreten, wodurch der Kolben wieder zurückgeschleudert und das Schwungrad plötzlich verkehrt gedreht würde. Diese Vorzündung tritt dann ein, wenn die Geschwindigkeit, mit welcher frische Mischung infolge der Verdichtung in das Glührohr eindringt, kleiner ist als die Geschwindigkeit, mit welcher die Entzündung dieser Mischung im Glührohre nach außen fortschreitet. Um dieser Gefahr der Vorzündung namentlich bei großen Maschinen vorzubeugen, wendet man entweder gesteuerte Glührohre oder elektrische Funkenzündung an.

Die Zündung mit gesteuertem Glührohr unterscheidet sich im Principe von jener mit offenem Glührohre nur dadurch, daß das Glührohr mit dem Laderaume nicht in fortwährender Verbindung steht, sondern nach innen durch eine Absperrvorrichtung (Zündventil), welche von der Steuerwelle betätigt wird, geschlossen erhalten wird. Im Momente der Zündung wird durch Öffnen dieses Ventils die Verbindung zwischen dem Inneren des Rohres und dem Cylinder hergestellt, infolgedessen ein Teil der verdichteten Ladung in dasselbe hineinschlägt und sich entzündet. Da das verläßliche Funktionieren dieser Zündvorrichtung von dem jedesmaligen sicheren Abschlusse des Verbindungskanales zwischen Glührohr und Cylinder abhängt, so muß sehr darauf gesehen werden, daß die Abschlußvorrichtung auch verläßlich arbeitet, d. h. präzise öffnet und schließt, da sonst Vorzündungen eben so gut eintreten können, wie bei offenem Glührohre. Es stehen auch Ausführungen in Gebrauch, bei welchen das Rohr

nach außen offen, also mit atmosphärischer Luft gefüllt ist, um im Momente der Zündung nach außen abgeschlossen und nach innen geöffnet zu werden.

Die Glührohrzündung ist im allgemeinen einfach, sicherwirkend und billig; sie ist von der Geschwindigkeit der Maschine und deren Aufstellung unabhängig, erfordert jedoch eine gewisse Zeit (etwa 5—10 Minuten) zum Anwärmen des Glührohres beim Anlassen der Maschine; diese ist daher nicht momentan dienstbereit.

Der Gasverbrauch ist etwas größer als bei der älteren Flammenzündung und beträgt unabhängig von der Maschinengröße durchschnittlich 150 bis 200 Liter pro Stunde und Cylinder.

Die derzeit sowohl bei Gasmotoren als auch namentlich bei den mit flüssigen Brennstoffen arbeitenden Maschinen gebräuchlichste Zündmethode ist die elektrische Zündung.

Die elektrische Zündung, bekanntlich die älteste Zündungsmethode, welche später durch die Flammenzündung verdrängt wurde, besteht darin, daß durch die explosible Ladung ein elektrischer Funke schlägt, welcher in seiner Wirkung einem Glühkörper ähnlich, das Ladungsgemisch an einer bestimmten Stelle auf die Entzündungstemperatur erhitzt; die Entzündung überträgt sich dann explosionsartig auf die benachbarten Schichten und die ganze Ladung. Der Funke selbst soll in erster Linie heiß sein; seine Länge ist weniger von Belang. Ein heißer Funke ist rötlich-violett, ein kalter hingegen weißlich.

Die zum Überschlagen des Funkens dienende Vorrichtung nennt man den Zünder. Der Zünder besteht dem Wesen nach aus einem metallenen Pfropfen von verschiedener Form und Anordnung, welcher am Cylinder, in den rückwärtigen Teil des Laderaumes mündend, befestigt wird. Der Pfropfen, welcher möglichst einfach konstruiert sein muß, um rasch abgenommen und untersucht werden zu können, wird durch zwei gegenseitig isolierte Drähte durchsetzt, deren Platinspitzen sich im Innern des Cylinders gegenüber stehen. Zwischen diesen Spitzen, deren Abstand zumeist nur 1 mm beträgt, springt der elektrische Funke über. In der konstruktiven Durchführung unterscheiden sich die verschiedenen in Anwendung stehenden Zünder mehr oder weniger von dieser einfachsten Form; auf eine Besprechung derselben soll hier nicht weiter eingegangen werden\*).

So einfach die zur Funkenbildung dienenden, im Inneren des Cylinders liegenden Zünder im allgemeinen auch gebaut sind, so mannigfaltig und kompliziert sind jene Apparate, welche zur Erzeugung des Funkens dienen. Während man früher zur Erzeugung des den Funken bildenden Stromes

\*) Einige dieser Konstruktionen sind durch Zeichnung und Beschreibung erläutert in A. von Ihering, „Die Gasmachine“, Leipzig 1901, S. 393—399.

galvanische Batterien benützte, verwendet man jetzt eigene magnetelektrische Apparate oder kleine vom Motor selbst betätigte Dynamomaschinen. Die elektrische Zündung wäre wohl die beste aller Zündungsmethoden, wenn sie eben vollkommen verlässlich wäre. In diesem Sinne ist die Zündung mit fortwährender Funkenbildung beziehungsweise ununterbrochenem Durchströmen des Stromes durch den Zünder viel sicherer wirkend, als die Zündung durch einen einzigen überschlagenden Funken, weil bei dieser Anordnung ein förmliches Funkenbüschel fortwährend überströmt, wodurch die Möglichkeit eines Aussetzens der Explosion durch Versagen der Zündung ausgeschlossen erscheint.

Bei Einzelfunken ist das Versagen der Zündung leicht möglich, da allerlei Ursachen, als ein Fehler in der Entfernung der Spitzen, ein zwischen die Spitzen gelangender Öltropfen, ein Verrücken der Spitzen etc., das Überspringen des Funkens verhindert. Man trachtet daher unter allen Umständen, den Zünder an einer Stelle des Cylinders anzubringen, wo er solchen Störungen und Zufälligkeiten weniger ausgesetzt ist.

Die stromerzeugenden Apparate erhalten ihre Bewegung beziehungsweise ihren Arbeitsimpuls fast ausnahmslos von der Steuerwelle der Maschine.

Sämtliche Methoden der Funkenerzeugung kann man dem Wesen nach in zwei Gruppen trennen und zwar in solche, bei welchen durch Losreißen eines beweglichen Hebels von einem Metallstifte oder durch das Anschlagen eines derartigen Hebels an die Cylinderwand im Inneren des Cylinders entweder ein Öffnungs- oder ein Schließungsfunken im Stromkreise erzeugt wird, und in Anordnungen, bei welchen durch einen außerhalb der Maschine angebrachten Unterbrecher eine Störung in einem primären Stromkreise hervorgerufen und durch diese ein Strom in einem zweiten, sekundären Stromkreise, in welchem der oder die Zünder eingeschaltet sind, induziert und hierdurch die Funkenbildung am Zünder bewirkt wird.

Die zum Überschlagen des Funkens im geeigneten Momente dienenden Vorrichtungen sind sehr einfach und werden hierzu meistens die Steuermechanismen selbst benützt. Kompliziert werden diese Zündungen nur durch die Apparate zur Erzeugung des Stromes. Gewöhnlich wird ein sekundärer, induzierter Strom benützt, welcher durch einen in einer Spirale mit Hilfe zweier mit chromsaurer Eisenlösung gefüllter Elemente erzeugten primären Strom in der Zündleitung induziert wird.

Seltener werden die galvanischen Elemente durch magnet- oder dynamoelektrische Apparate ersetzt oder der Unterbrechungsstrom eines magnetelektrischen Apparates benützt; in beiden Fällen werden die Apparate von der Maschine beziehungsweise deren Steuerwelle bewegt.

Die Nachteile der Stromerzeugung durch galvanische Elemente haben

zur Anwendung der magnet- oder dynamoelektrischen Apparate geführt. Der Strom behält keine gleichmäßige Stärke, andererseits ist das Manipulieren mit den zur Füllung der Elemente dienenden Stoffen nicht ungefährlich. Die doppeltechromsauren Elemente reichen für etwa 150 Betriebsstunden aus und müssen daher rechtzeitig ausgewechselt werden.

Die von der Maschine bewegten magnet- oder dynamoelektrischen Apparate sind natürlich unabhängig von den Nachteilen galvanischer Batterien, sie sind jedoch viel teurer und komplizierter, da am Schwungrad eigene Drehvorrichtungen angebracht sein müssen, um beim Anlassen der Maschine auch sofort die für die Erzeugung des Stromes erforderliche Geschwindigkeit, ohne welche der Strom nicht stark genug, also das Anlassen nicht möglich ist, zu erlangen.

Die Zündung durch elektrische Funken ist einfach, jedoch sehr empfindlich, doch bietet sie den Vorteil, daß ihre Verwendung jede Feuergefahr ausschließt, daher dieselbe für jedes beliebige Gas anwendbar ist; aus diesem Grunde wird sie auch bei Benzinmaschinen fast ausschließlich benützt.

Die elektrische Zündung durch Elektromagneten und Dynamos verursacht weder während des Betriebes noch während des Stillstandes Unterhaltungskosten, jedoch bedeutend höhere Anschaffungskosten als die Zündung durch galvanische Batterien. Die Kosten der Erhaltung der Batterien stellen sich ziemlich gleich mit jenen der Zündflamme, doch erfordern sie eine viel aufmerksamere Wartung und daher mehr Bedienungsarbeit.

Außer den beiden besprochenen Zündungsmethoden — Glührohrzündung und elektrische Zündung — gibt es noch eine dritte Zündungsmethode durch bloße Verdichtung der Ladung, ohne irgend welche äußere Wärmezufuhr.

Diese Methode setzt eine so weitgehende Verdichtung der Ladung beziehungsweise der angesaugten Luft voraus, daß die Verdichtungs-entemperatur, um Versager zu vermeiden, entsprechend höher sein muß als die Entzündungstemperatur des verwendeten Brennstoffes. Diese Entzündungsmethode hat bisher bei den mit Gemischladungen arbeitenden Viertaktmotoren, der steten Gefahr eintretender Vorzündungen wegen, keine Anwendung gefunden. Das Arbeitsprinzip der an späterer Stelle eingehend besprochenen Dieselmachine, welche nur reine atmosphärische Luft saugt und komprimiert, beruht jedoch auf dieser Selbstzündungsmethode.

**221. Die Steuerung.** Die steuernden Organe haben allgemein den Zweck, die Maschine rechtzeitig zu füllen und zu entleeren; häufig dienen sie auch zur Regulierung der Geschwindigkeit derselben. Bei allen im Viertakt arbeitenden Maschinen treten die einzelnen Steuerorgane nur

während des ersten und letzten Hubes einer Arbeitsperiode (Saughub und Ausströmhübe) in Tätigkeit, bleiben daher während der beiden Zwischenhübe (Verdichtungshub und Arbeitshub) in Ruhe. Das moderne, fast ausnahmslos gebräuchliche Steuerorgan der Viertaktmaschine ist das Ventil. Bei den in neuester Zeit für Großleistungen in Ausführung gekommenen Zweitaktmaschinen wird der Arbeitskolben selbst als Steuerorgan benützt, um durch Freilegung im Arbeitcyylinder befindlicher Schlitze oder Ringkanäle u. dergl. den Ein- und Austritt der Ladung beziehungsweise der Abgase zu steuern und zu regeln. Statt des Arbeitskolbens werden auch eigene Kolbenschieber zur Steuerung benützt.

Bei den Viertaktmaschinen wird die Bewegung der Steuerorgane am zweckmäßigsten von einer Steuerwelle abgeleitet, welche halb so viel Umdrehungen macht als die Maschinenwelle. Der Antrieb der Steuerwelle erfolgt zumeist durch Schraubenräder, welche in Öl laufen; ihre Abnützung ist infolgedessen gering, ihr Gang nahezu geräuschlos. Bei guter Ausführung arbeitet der Rädertrieb sehr befriedigend; trotzdem sind wiederholt Versuche gemacht worden, ihn zu umgehen und die Bewegung der steuernden Organe entweder durch Excenter von der Maschinenwelle, oder durch geschlossene Kurvennuten von der Schwungradscheibe direkt abzuleiten. Es muß dahingestellt bleiben, ob derartige Einrichtungen, die der Abnützung doch mehr unterworfen sind, der Steuerwelle vorzuziehen sind.

Die Ventile sind fast durchgehends einfache Tellerventile mit konischem oder ebenem Sitz und zentraler Stangenführung. Entlastete oder Doppelsitzventile sind weniger beliebt, da es in Anbetracht der hohen Temperatur, welcher diese Ventile zum Teil unterworfen sind und der Verschmutzung derselben sehr schwierig ist, den gleichzeitigen guten Abschluß beider Ventilsitze herbeizuführen und zu erhalten.

Die Bewegung der Ventile ist entweder freiläufig, indem sie sich infolge der Saugwirkung der Maschine beim Einnehmen der Ladung unter dem äußeren Überdruck selbsttätig öffnen, um sich im Momente des Hubwechsels unter dem Einflusse einer Feder rasch zu schließen, oder die Anhubbewegung derselben ist eine erzwungene, bedingt durch den rechtzeitigen Eingriff der von der Maschine zwangsläufig bewegten Steuerung.

Eine vollständige Ventilsteuerung besteht immer, außer den von Hand aus bedienten Absperrventilen für Gas und Luft, aus drei Ventilen: einem Einlaßventil für das Ladungsgemisch, einem Austrittsventile und einem eigenen Gasventile, welches die Gasleitung gegen die Luftleitung abschließt, um den Austritt des Gases in diese zu verhindern während der Dauer der dem Saughube folgenden drei Kolbenhübe.

Das Auslaßventil, welches nach vollendetem Arbeitshube noch unter dem im Cylinder herrschenden Überdrucke steht, muß bei allen Maschinen



gesteuert sein, d. h. es wird durch den Eingriff der Steuerung kurz vor Hubwechsel von seinem Sitze abgehoben und zu Ende des Ausströmhubes durch eine Feder rasch geschlossen; diese Feder muß so stark sein, daß sich das Ventil während der Saugperiode nicht lüftet. Der Abschluß muß vollkommen dicht sein, damit während der Kompressionsperiode nicht Ladungsgemisch in die Ausströmleitung entweichen kann. Die Möglichkeit einer Undichtheit ist bei dem Auslaßventil in weit höherem Maße vorhanden als bei dem Einlaßventil, da es mitten in der Strömung sehr heißer, die Maschine mit hoher Temperatur (durchschnittlich  $400^{\circ}\text{C}$ ) verlassender Verbrennungsprodukte liegt, daher der Verunreinigung wie kein anderer Teil der Maschine ausgesetzt ist. Aus diesem Grunde muß das Ventil sehr leicht zugänglich sein, um ein öfteres Reinigen etc. rasch vornehmen zu können.

Fig. 250 zeigt eine gebräuchliche Anordnung des Auslaßventiles einer liegenden Maschine. Die Bewegungsübertragung von der Steuerwelle erfolgt durch Kammscheiben und Rollenhebel mit unveränderlichem Hub.

Nachdem sich die Maschine schwer dreht, wenn man die Verdich-

tungsspannung zu überwinden hat, ist auf der Muffe außer dem Kamm, der zur normalen Steuerung des Auslaßventiles dient, noch ein zweiter kleinerer unter  $180^{\circ}$  verstellter Kamm angebracht, welcher für gewöhnlich nicht auf den Hebel beziehungsweise das Ventil einwirkt. Beim Anlassen der Maschine wird nun die Rolle des Hebels von Hand aus verschoben, sodaß beide Kämme auf ihr spielen und das Ventil zweimal in jedem Spiele gehoben wird, und zwar während des Austrittes und während der Verdichtung. Sobald die Maschine in Gang gekommen, wird die Rolle wieder in ihre normale Betriebsstellung gebracht.

Seltener findet man das Auslaßventil am Rücken des Cylinders; die Anordnung am Bauche desselben wird der schlechteren Zugänglichkeit wegen nur ausnahmsweise oder bei großen Maschinen gewählt.

Fast jede Motorenfabrik baut ihre Maschinen nach ihren eigenen Normalien; auf diese vielartigen Detailanordnungen der Steuer- und

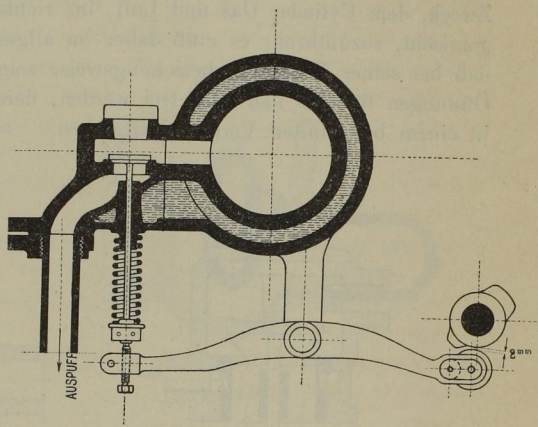


Fig. 250.

Regulierorgane liegender und stehender Maschinen kann hier um so weniger eingegangen werden, als das vorliegende Buch nicht den Zweck eines Konstruktionswerkes verfolgt, sondern den Leser lediglich nur in das Wesen des Baues und der Wirkungsweise der heute als gut anerkannten Wärmekraftmaschinen einführen soll. Übrigens ist das Gebiet der heute bestehenden verschiedenartigen Gasmaschinenkonstruktionen so umfangreich, daß selbst Spezialwerke\*) nicht in der Lage sind, auf alle Einzelheiten eingehen zu können und sich daher nur auf Besprechung einzelner Konstruktionen beschränken müssen.

Das Einlaßventil für das Ladungsgemisch, auch Mischventil genannt, wird entweder selbsttätig oder gesteuert ausgeführt und hat den Zweck, dem Cylinder Gas und Luft, im richtigen Verhältnisse und innig gemischt, zuzuführen; es muß daher im allgemeinen so eingerichtet sein, daß bei seiner Eröffnung beziehungsweise seinem Abhabe vom Ventilsitze Öffnungen für Gas und Luft frei werden, deren Querschnitte zu einander in einem bestimmten Verhältnisse stehen.

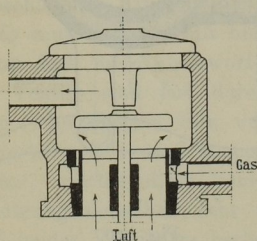


Fig. 251.

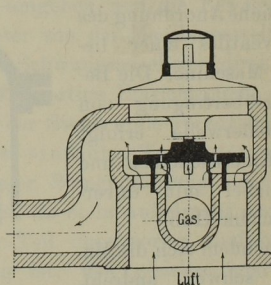


Fig. 252.

Das normale Mischungsverhältnis von Leuchtgas und Luft ist 1 : 8 bis 1 : 10; bei Bestimmung des Verhältnisses der summarischen Öffnungsquerschnitte muß jedoch auf das geringere spezifische Gewicht des Gases, auf dessen Druck und Quantität Rücksicht genommen werden und lassen sich daher keine allgemein giltigen Regeln aufstellen. Für Steinkohlenleuchtgas wird das Verhältnis der Öffnungsquerschnitte gewöhnlich zwischen 1 : 12 und 1 : 16 angenommen werden können; für Kraft- und Gichtgas ist das Verhältnis selbstverständlich, dem geringeren Heizwerte

\*) Schöttler, *Die Gasmaschine*, 4. Aufl., Braunschweig 1902. Ihering, *Die Gasmaschine*, 2. Aufl., Leipzig 1901. Knoke, *Die Kraftmaschinen des Kleingewerbes*, 2. Aufl., Berlin 1899. Musil, *Die Motoren für Gewerbe und Industrie*, 3. Aufl., Braunschweig 1897. Witz, *Traité théorique et pratique des moteurs à gaz*, 3<sup>me</sup> éd., Paris 1895. Clerk, *The Gas- and Oil-Engine*, 6. Aufl., London 1896.

dieser Gase entsprechend, größer. Der Bestimmung der Querschnitte kann eine mittlere Anfangsgeschwindigkeit von etwa 20 m pro Sekunde als Grundlage dienen (als Mittelwert der Geschwindigkeit Null und der Maximalgeschwindigkeit gegen Mitte des Hubes).

Der innigen Mischung kommt das Diffusionsvermögen der Gase sehr zu statten; trotzdem muß man denselben Gelegenheit geben, indem man Gas und Luft in getrennten Strömen gegen einander führt, also gleichsam in wirbelnde Bewegung versetzt, sich innig zu mischen und eine möglichst einheitliche Mischung zu bilden. Dieser Zweck kann auf verschiedene Weise erreicht werden, wie aus den Skizzen einiger Mischventile Fig. 251, 252 und 253 zu ersehen ist.

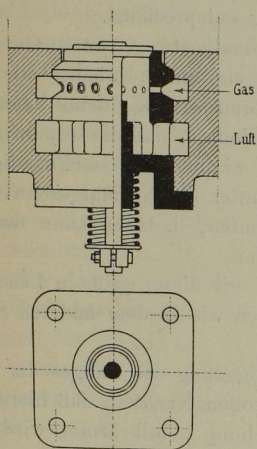


Fig. 253.

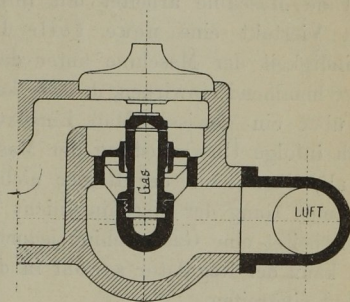


Fig. 254.

Die Anordnung Fig. 251 und 253 besitzt den Nachteil, daß die Zusammensetzung der Mischung sich mit dem Ventilhub ändert; sie ist jedoch einfacher als die Anordnung Fig. 252, welche diesen Nachteil vermeidet. Bei dieser Anordnung wird nur ein dichter Abschluß gegen die Gasleitung bezweckt, während für den Zutritt der Luft, da die Tellerplatte in die Gegenöffnung paßt, also nicht aufsitzt, der Abschluß nicht genau dichtet; die Dichtung ist hier nicht notwendig, da noch gegen den Cylinder zu ein eigenes Eintrittsventil vorhanden ist. Führt man die beiden Ventile getrennt aus, wie aus Fig. 254 ersichtlich, dann schließen beide vollkommen dichtend ab und ist der Einbau eines eigenen Einlaßventiles für die Ladung nicht notwendig.

Das zur Aufnahme des Misch- eventuell Einlaßventiles (auch Rück-

schlagventil genannt) erforderliche Gehäuse bedarf, namentlich bei kleineren Maschinen, keiner eigenen Wasserkühlung, da der Strom frischer Luft, welcher dasselbe bei jedem Einströmhube durchzieht, genügend kühlt.

Das Mischventil ist je nach der Art und Regulierung der Maschine selbsttätig oder gesteuert; in diesem Falle erfolgt die Bewegung desselben gleichfalls von der Steuerwelle durch Kammscheiben und Hebel. Das Einlaßventil ist zumeist freiläufig.

**222. Die Regelung des Gasverbrauches und Ganges der Maschine.** Einer der wichtigsten Punkte im Baue der modernen mit Gemischladung arbeitenden Viertaktmaschine ist die Regelung des Gasverbrauches, der jeweiligen Maschinenleistung entsprechend.

Eine Maschine arbeitet mit ihrer Maximalleistung, wenn sie nach jedem Viertakt eine neue volle Ladung einnimmt; wächst die Geschwindigkeit der Maschine unter dieser Voraussetzung, dann kann der Regler hemmend einwirken, d. h. er kann verhindern, daß die Geschwindigkeit über ein gewisses Maß hinauswächst; nimmt die Geschwindigkeit jedoch infolge Überbelastung der Maschine unter die Normalgeschwindigkeit ab, dann kann der Regler nicht eingreifen, d. h. er kann den zu langsamen Gang der Maschine nicht beseitigen.

Arbeitet eine Gasmachine jedoch nicht mit dieser größten Leistung, dann kann der Regulator sowohl in dem einen wie in dem anderen Sinne regelnd eingreifen.

Bei den älteren Maschinen wurde zur Regelung des Ganges der Gaszufuß gedrosselt. Diese Methode hat den großen Nachteil, daß hierdurch das Mischungsverhältnis verändert, die Mischung somit ärmer wird, als sie der Zündungsfähigkeit wegen sein sollte; die Zündung wird bei abnehmender Leistung träge und hört schließlich ganz auf, sodaß dann unverbranntes Gas die Maschine verläßt. Der Gang der Maschine wird unregelmäßig, der Betrieb unökonomisch.

Otto und Langen wendeten daher bei ihrer atmosphärischen Maschine eine andere Reguliermethode an, indem sie zeitweilig den Austritt der Verbrennungsprodukte drosselten, also die Zeitdauer eines Kolbenfluges verlängerten. Nachdem diese Methode jedoch auf die Cylinder der Maschine nachteilig einwirkte, so wurde dieses Verfahren dahin abgeändert, daß durch den Regulator die Einleitung eines neuen Kolbenspieles für eine gewisse Zeit überhaupt verhindert, somit die Zahl der Kolbenflüge statt der Zeitdauer eines Hubes geändert wurde. Dieses Regulierverfahren wendete Otto später auch auf seine Viertaktmaschine an.

Die neueren Viertaktmaschinen lassen sich hinsichtlich der Regelung in drei Gruppen einteilen und zwar:

a) in Maschinen, welche stets mit voller Ladung, aber veränderlicher Anzahl der Ladungen, also mit sogenannten ausfallenden Ladungen arbeiten;

b) in Maschinen, bei welchen die Zahl der Ladungen der regelmäßigen Wiederkehr des Viertaktes entsprechend ungeändert bleibt, jedoch die Stärke, also das Mischungsverhältnis der Ladung, mit der Kraftäußerung der Maschine sich ändert, und

c) in Maschinen, welche bei ungeänderter Zahl der Ladungen nur mit teilweiser Füllung des Cylinders durch frisches Ladungsgemisch arbeiten.

Bei den Maschinen der ersten Gruppe erhält der Cylinder bei jeder neuen Ladung entweder genau so viel Gas, als zur Bildung einer richtigen Ladung erforderlich ist, oder gar kein Gas, indem das Gaseinlaßventil so lange geschlossen erhalten bleibt, bis die abnehmende Umlaufzahl der Maschine dessen Wiedereröffnung verlangt. Es fällt also eine Explosion aus und nimmt die Maschine während des Saughubes nur Luft ein.

Man kann aber auch die Luft absperren; dann entsteht während des Aussetzens eine teilweise Luftleere in der Maschine, oder es wird das Auslaßventil, selbstverständlich bei geschlossenem Gaseinlaßventil, der zu- oder abnehmenden Umlaufzahl der Maschine entsprechend, durch den Regulator derart beeinflußt, daß dasselbe entweder nach Vollendung des Ausströmhubes geöffnet oder geschlossen bleibt; im ersteren Falle wird während des Saughubes ein Gemisch aus Verbrennungsrückständen und Luft in den Cylinder gesaugt; im letzteren Falle werden die im Cylinder enthaltenen Verbrennungsprodukte komprimiert, um beim nächsten Kolbenhub zu expandieren.

In dieser letzteren Reguliermethode wollte man den Vorteil sehen, daß der Cylinder durch das Regeln nicht abgekühlt wird; sie besitzt jedoch den Nachteil, daß entweder alle Unreinigkeiten, welche bereits ausgestoßen waren, wieder in den Cylinder zurückgesaugt oder die auf den Laderaum konzentrierten Verbrennungsrückstände so lange im Cylinder hin und her geschleppt werden, bis ein neuer Saughub eingeleitet ist.

Unter den Methoden der Regelung durch ausfallende Ladungen ist die erstere, bei welcher bei geschlossenem Gaseinlaßventil nur reine Luft gesaugt und ausgestoßen wird, die gebräuchlichste; es wird hierdurch der Cylinder im Inneren allerdings abgekühlt, jedoch bei jedem Aussetzen von den Verbrennungsprodukten teilweise gereinigt. Diese Reguliermethode ist überhaupt heute noch die gebräuchlichste und empfiehlt sich überall dort, wo Sparsamkeit im Gasverbrauche in erster Linie in Betracht kommt.

Wo es jedoch auf höhere Regelmäßigkeit des Ganges der Maschine

ankommt, ist die Methode der Aussetzer nicht am Platze, da ein Arbeitsimpuls erst nach 8, 12, 16 etc. Hüben gegeben wird; für diese Fälle muß ein Steuermechanismus gewählt werden, welcher ein Aussetzen ausschließt, also nach jedem Viertakt einen Arbeitsimpuls einleitet.

Die konstruktive Durchführung der Regelung durch Aussetzer, wie sie von Otto bei seinen Maschinen angewendet wurde und auch heute noch in gleicher und ähnlicher Weise angewendet wird, ist aus den Figuren 255 und 256 ersichtlich.

Das als Regelventil dienende Gaseinlaßventil *a* öffnet sich nur dann, wenn der Knaggen *b* einer auf der Steuerwelle verschiebbaren Muffe *c* den einen Schenkel *f* des Winkelhebels *d-f*, dessen anderer Schenkel *d* sich gegen die Ventilspindel legt, anhebt. Dies erfolgt bei der größten Leistung der Maschine nach jedem Viertakte, und bei regelmäßigem Gange derselben in gleichmäßigen Intervallen von je 8, 12 etc. Hüben.

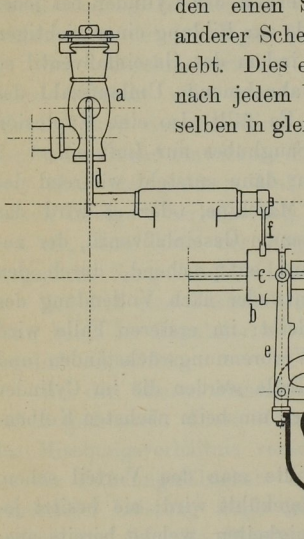


Fig. 255.

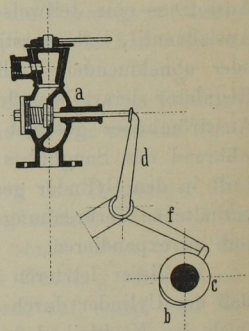


Fig. 256.

Geht die Maschine jedoch rascher, dann heben sich die Regulatorpendel und schieben durch Vermittlung des Winkelhebels *e* die Muffe soweit zur Seite, daß der Knaggen an dem Schenkel des Winkelhebels *f-d* vorbeigeht. So lange die Pendel in dieser Lage verbleiben, kann kein Gas in die Maschine gelangen.

Damit beim Stillstand der Maschine das Ventil nicht offen stehen bleibt, somit die Gaszuleitung sicher geschlossen ist, muß die Muffe bei tiefster Lage der Pendel so weit verschoben sein, daß die Knagge *b* nicht unter den Hebel *f* kommt. Um jedoch die Maschine anlassen zu können, wird vor Inbetriebsetzung derselben die kleine drehbare Stütze *g* hochgeschlagen und hierdurch die Muffe in die richtige Lage gerückt. Nach der ersten Explosion wird die Stütze frei und fällt von selbst ab.

Der auf der Knagge spielende Arm des Hebels *fd* wird so flach geformt, daß er seitlich federt, wodurch eine rasche Abnützung oder ein Bruch desselben vermieden wird, wenn die Knagge bei der Verschiebung der Muffe denselben seitlich fängt.

Kommt bei einer Anlage die Regelmäßigkeit des Ganges in erster Linie in Betracht, dann genügt das Regeln durch Aussetzer nicht und muß eine der Reguliermethoden Gruppe 2 und 3 angewendet werden.

Otto half sich durch Drosselung des Gases, indem er den Steuernocken abschrägte; damit jedoch bei geringer Belastung der Maschine die Mischung nicht so gasarm werde, daß überhaupt keine Entzündung mehr eintritt, machte er die Nocken so lang, daß eine bestimmte, knappste Gasfüllung nicht unterschritten werden konnte; wenn die Maschine mit noch geringerer Belastung oder leer lief, dann setzte sie einfach aus.

Diese Reguliermethode ist ihrem Wesen nach nur für solche Maschinen geeignet, deren Belastung keinen großen Schwankungen unterworfen ist, nachdem bei abnehmender Belastung der Gasverbrauch pro Leistungseinheit verhältnismäßig zunimmt.

Eine grundsätzlich neue Methode führten Gebrüder Körting bei ihren Gasmotoren ein, indem sie entweder den Eintritt der explosiblen Ladung bei zunehmender Geschwindigkeit der Maschine vor Ende des Hubes abschließen oder zwischen dem Mischventile und dem Einlaß- oder Rückschlagventile eine Drosselklappe einschalten, somit gedrosselte Ladung gleichbleibender Mischung in den Cylinder saugen. (Siehe Fig. 268 und 269, welche die Anordnung größerer Maschinen von Körting darstellt.) Die Ladung dehnt sich in beiden Fällen bis unter die Spannung der Außenluft aus und wird beim Rückhube wieder verdichtet.

Bei dieser Reguliermethode, welche im Prinzip die vollkommenste ist, in der Praxis jedoch nicht immer richtig angewandt wird, sind die Einlaßöffnungen von Haus aus so bemessen, daß sie eine Gasmischung von bestimmter Zusammensetzung einlassen; es wird somit nicht die Zusammensetzung der Mischung, sondern gleichsam das Admissionsvolumen geregelt. Die Ladung ergibt daher stets die größtmögliche Leistung, entsprechend der von der Maschine zu verrichtenden Arbeit. Durch diese Methode wird daher die Verdichtungsspannung geregelt, wie aus den nachstehenden Diagrammen einer Körting-Maschine Fig. 257 bis 260 (S. 664) zu ersehen ist.

Die Zündungen setzen mithin nicht aus und die Regelmäßigkeit des Ganges der Maschine kann nicht ungünstig beeinflusst werden. Diese Art der Regelung ermöglicht in Gemeinschaft mit einem schweren Schwungrade elektrische Lampen ohne Zuhilfenahme von Akkumulatoren von der Maschine aus zu speisen und dennoch ein vorzüglich gleichmäßiges Licht zu erzielen.

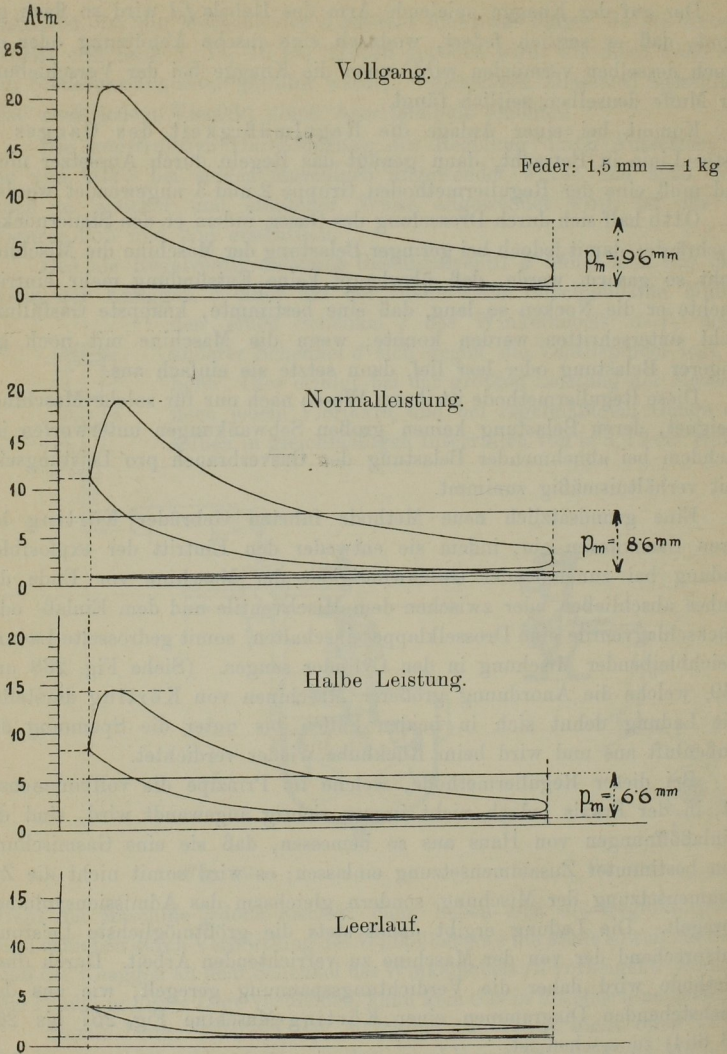


Fig. 257—260.

Da eine Maschine im allgemeinen um so sparsamer arbeitet, je stärker die Verdichtung ist, so hat man auch diese Regelung nicht umsonst, doch bedeutet sie einen erheblichen Fortschritt.



Die vorstehenden Diagramme sind von einer Maschine von 325 mm Cylinderdurchmesser bei 570 mm Hub, deren Nennleistung 35 PS beträgt, abgenommen. Die Maschine leistete während der Abnahmeversuche bei Vollgang (größte Belastung) 40,3, bei normaler Belastung (Nennleistung), 35,2, bei halber Belastung 20,5 PS. Die Umlaufzahl betrug 170 beziehungsweise 173 pro Minute (3,23 m pro Sekunde Kolbengeschwindigkeit).

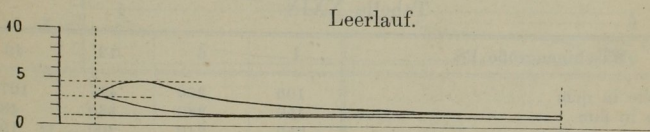
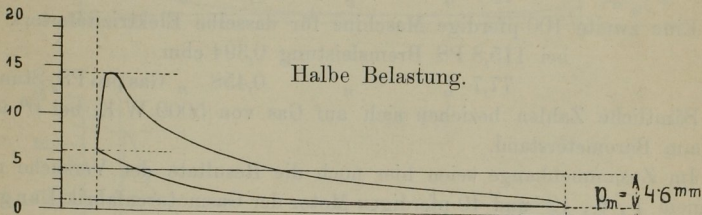
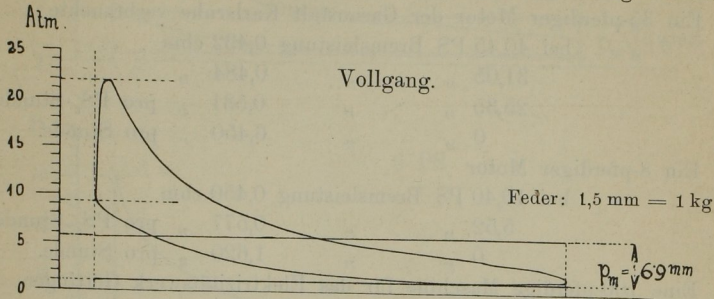


Fig. 261—263.

keit). Die Maschine wurde mit städtischem Leuchtgas von im Mittel 5000 W.E. pro cbm gespeist; die Gastemperatur betrug  $17^{\circ} \text{C}$  bei einem Luftdrucke von 765 mm. Die Maschine verbrauchte bei Vollgang 440, bei der Nennleistung 450, bei halber Belastung 585 l Gas pro PS<sub>c</sub>-Stunde. Der Leerganggasverbrauch betrug 6 cbm pro Stunde.

Die Diagramme einer anderen Versuchsreihe sind durch die Figuren 261 bis 263 dargestellt.

Die Maschine von 350 mm Cylinderdurchmesser bei 620 mm Hub,

der normalen Leistung von 40 PS, arbeitete mit Generatorgas und ergab bei Vollbelastung 45, bei normaler Belastung 40 und bei halber Belastung 24 PS an der Bremse.

Die durch die Art der Regelung hervorgerufene Änderung der Verdichtung ist aus den Diagrammen klar ersichtlich und bedarf keiner weiteren Erörterung.

Ein 35-pferdiger Motor der Gasanstalt Karlsruhe verbrauchte

bei 40,45 PS Bremsleistung 0,432 cbm

31,05	„	„	0,484	„
25,35	„	„	0,531	„ pro PS <sub>e</sub> -Stunde
0	„	„	6,450	„ pro Stunde.

Ein 8-pferdiger Motor

bei 10,40 PS Bremsleistung 0,450 cbm

5,52	„	„	0,577	„ pro PS <sub>e</sub> -Stunde
0	„	„	1,620	„ pro Stunde.

Eine 100-pferdige Maschine für das Elektrizitätswerk Göttingen

bei 116,8 PS Bremsleistung 0,428 cbm

78	„	„	0,497	„
----	---	---	-------	---

Eine zweite 100-pferdige Maschine für dasselbe Elektrizitätswerk

bei 115,8 PS Bremsleistung 0,394 cbm

77,7	„	„	0,458	„ Gas pro PS <sub>e</sub> -Stunde.
------	---	---	-------	------------------------------------

Sämtliche Zahlen beziehen sich auf Gas von 5000 W.E. bei 0° und 760 mm Barometerstand.

Im Zusammenhange seien hier noch die Resultate der Versuche mit je einem 1-, 6-, 12- und 40-pferdigen Motor der Gasmotorenfabrik Langen & Wolf in Wien veröffentlicht.

Tabelle XXIX.

Maschinengröße PS	1	6	12	40
Kolbenfläche in qcm .....	105	260	417	1075
Kolbenhub in mm .....	150	260	330	480
Umdrehungen pro Min. ....	250	240	200	190
Mittlerer Druck in Atm. ....	4,0	5,0	5,7	5,7
Indizierte Leistung PS (maximal) .....	1,75	9,01	17,4	62,0
Bremsleistung PS (maximal) .....	1,40	7,23	14,0	50,0
Mechanischer Wirkungsgrad % .....	80,0	80,0	80,4	80,6
Gasverbrauch in l pro effect. PS-Stunde ..	665	572	549	528
pro indic. PS-Stunde ..	532	459	442	425
Benzinverbrauch in kg pro effect. PS-Stunde ..	0,40	0,35	0,33	0,30
pro indic. PS-Stunde ..	0,320	0,288	0,265	0,242
Kalorischer Wirkungsgrad % bei Gasbetrieb	19,0	22,0	22,9	23,8
bei Benzinbetrieb	15,7	18,0	19,1	21,0

Die Gasverbrauchsfiguren rühren von denselben Maschinen her, von welchen die nachstehenden Diagramme Fig. 264—267 abgenommen wurden.

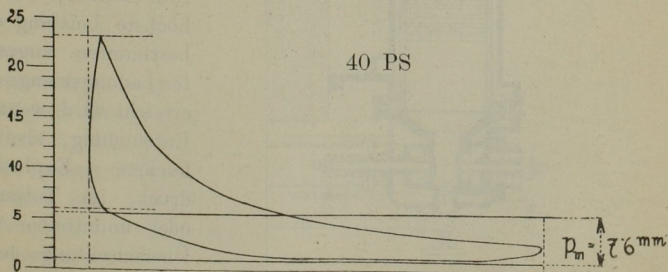
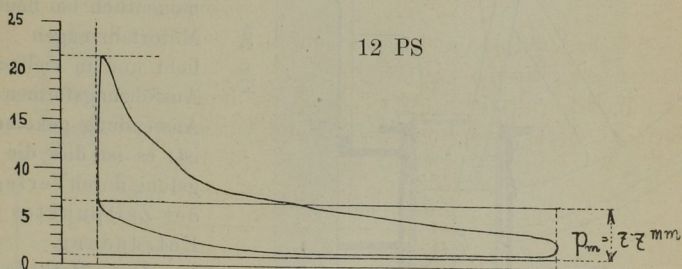
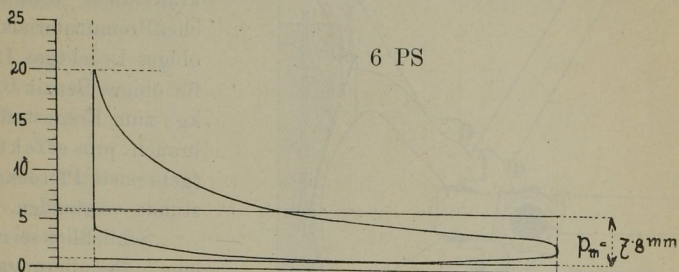
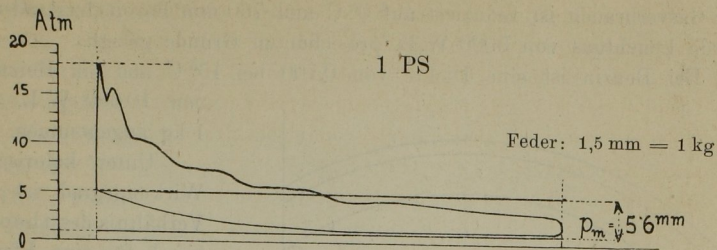


Fig. 264—267.

Der Gasverbrauch ist reduziert auf  $0^{\circ}\text{C}$  und 760 mm Barometerstand und wurde Leuchtgas von 5000 W.E. pro cbm zu Grunde gelegt.

Bei Benzin ist eine Dichte von 0,700 bei  $15^{\circ}\text{C}$  und ein Heizwert von 10 000 W.E. per 1 kg angenommen.

Unter kalorischer Wirkungsgrad ist das Verhältnis des theoretisch für eine Pferdekraftstunde erforderlichen Brennstoffmaterials (für obiges Leuchtgas 126 l, für obiges Benzin 0,063 kg) zum Brennstoffverbrauch pro effektive (gebremste) Pferdekraftstunde verstanden.

Schließlich sei noch eine Regulierungsmethode erwähnt, welche namentlich bei neueren Motorfahrzeugen beliebt und in vielfachen Ausführungsformen zur Anwendung gekommen ist; es ist dies die Regelung durch Verlegen des Zeitpunktes der Entzündung.

Diese Methode beruht darauf, daß die höchste Leistung einer bestimmten angesaugten Ladungsmenge dann erreicht wird, wenn die Entzündung, also der höchste Explosionsdruck, im Totpunkte oder unmittelbar nach Überschreitung desselben stattfindet, bei

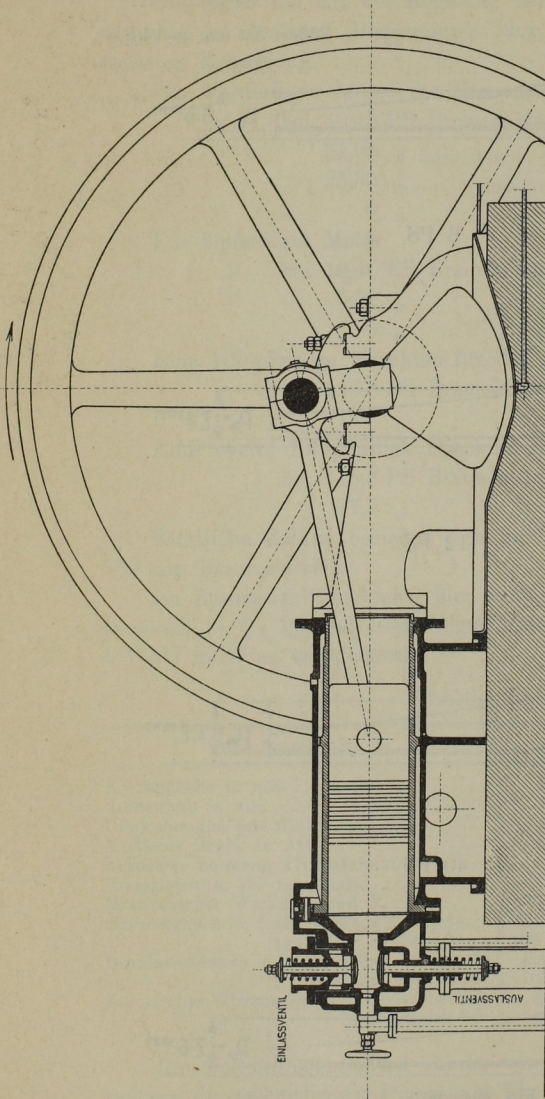


Fig. 268.

verspäteter Zündung die Leistung jedoch im Verhältnisse zu der Verzögerung abnimmt. Der frühere oder spätere Eintritt der Entzündung kann durch Verstellung des die Zündung bewirkenden Hebels oder Dauens eingeleitet werden.

Diese Methode der Regelung ist allerdings sehr einfach, vom Standpunkte der Wärmeausnützung jedoch höchst unvollkommen und daher verwerflich, nachdem das Arbeitsvermögen der angesaugten Ladung, wenn die Zündung verspätet, also erst dann erfolgt, wenn sich das Volumen wieder vergrößert, Verdichtungsdruck und Temperatur somit wieder abgenommen haben, nicht vollkommen ausgenützt wird.

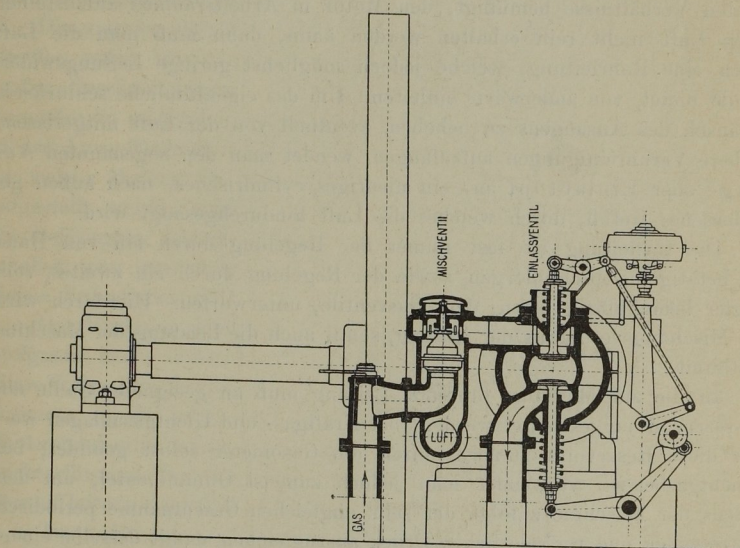


Fig. 269.

Die zur Verwendung kommenden Regler sind entweder konische Pendelregler, Achsregler oder Regler, bei welchen die Trägheit schwingender, also abwechselnd bewegter, statt stetig rotierender Pendel ausgenützt wird; diese Regler werden jedoch ausschließlich nur für Aussetzerregelung bei kleineren liegenden oder stehenden Maschinen verwendet und sind dort sehr beliebt. Wenn die Geschwindigkeit der Maschine einen gewissen Grenzwert überschreitet, nimmt die Beschleunigung der schwingenden Pendelmasse so weit zu, daß dieselbe um eine geänderte Mittellage schwingt; diese Verstellung wird in verschiedener Weise zur

Betätigung oder Nichtbetätigung des Regulierorganes (Gasventil oder Ausströmventil) ausgenützt\*).

**223. Die Gemischbildung und Reinigung des Cylinders von den Verbrennungsrückständen.** Die Bildung des Gemisches erfolgt stets in einem besonderen Raume, dessen Form und Lage bei den einzelnen Gasmaschinensystemen verschieden sein kann und vielfach auch verschieden ist; in diesen Raum münden die Zuleitungen für Luft und Gas. Die Luftleitung ist meistens in direkter Verbindung mit der äußeren Luft und durch ein selbsttätiges Ventil abgeschlossen. Die Luft soll möglichst rein, also frei von fremden Beimengungen sein. Ist man daher durch die lokalen Verhältnisse bemüßigt, den Motor in Arbeitsräumen aufzustellen, deren Luft nicht rein erhalten werden kann, dann muß man die Luft durch eine Rohrleitung, welche jedoch möglichst geringe Leitungswiderstände bietet, von anderwärts einleiten. Um das eigentümliche schlürfende Geräusch des Ansaugens zu beheben, eventuell von der Luft mitgerissene gröbere Verunreinigungen aufzufangen, wendet man den sogenannten Ansaug- oder Einlaßtopf an, ein niedriges cylindrisches, nach außen geschlossenes Gefäß, durch welches die Luft hindurchgesaugt wird.

Die Gasleitung ist fast immer der Regelung durch ein von Hand aus betätigtes Abschlußorgan, sowie der Regelung durch ein zweites, vom Regler beeinflusstes Organ, dem Gasventile, unterworfen. Hierdurch wird das Mischungsverhältnis der Ladung, somit auch die Leistung der Maschine bestimmt.

In die zur Maschine führende Leitung muß an geeigneter Stelle ein Gasreservoir eingeschaltet werden; bei Kraftgas- und Gichtgasanlagen werden diese Reservoirs zumeist durch die Gasometer selbst gebildet; bei Leuchtgasbetrieb verwendet man jedoch zumeist Gummibeutel, um den seitens der Maschine zufolge der sehr ungleichen Gasentnahme periodisch auftretenden und veränderlichen Druck auszugleichen, damit derselbe einerseits ohne Wirkung auf die Hauptgasleitung, andererseits ohne nachteiligen Einfluß auf die Bildung eines gleichmäßigen Gemisches bleibt. Genügt ein Gummibeutel nicht, dann sind zwei oder mehrere oder ein sogenannter Gasdruckregulator einzuschalten.

Bei den mit verdichteter Ladung arbeitenden Maschinen bildet der Cylinder selbst den Laderaum. Das Eindringen des Gemisches in den Mischraum und hierauf des Gemisches in den Cylinder kann entweder durch Ansaugen oder durch Drücken bewirkt werden. Im ersteren, weitaus

---

\*) Einige solcher Regleranordnungen siehe: Schöttler, *Die Gasmaschine*, sowie Musil, *Die Motoren für Gewerbe und Industrie*.

gebräuchlichsten Falle erzeugt der Arbeitskolben, wenn er aus seiner äußeren Totlage nach innen geht, selbst die Druckverminderung, infolge deren sich die Abschlößorgane für Luft und Gas selbsttätig öffnen, falls sie nicht durch eigene Mechanismen geöffnet werden.

Im anderen Falle ist an die Maschine eine Verdichtungspumpe angehängt, welche Luft und Gas ansaugt, in den Cylinder drückt und zugleich die Rolle der Mischkammer übernimmt. Statt einer Pumpe werden auch zwei Pumpen verwendet, welche Gas und Luft getrennt ansaugen und in den Cylinder drücken, wobei auf dem Wege zum Cylinder oder erst in diesem selbst die Mischung stattfindet. Die im Zweitakt arbeitenden Maschinen müssen auf diese Weise geladen werden, worauf an späterer Stelle noch zurückgekommen werden soll.

Die von der Maschine ausgestoßenen Verbrennungsprodukte verlassen dieselbe unter einem immerhin noch bedeutenden Überdruck, also mit großer Geschwindigkeit. Um das unangenehme scharfe Geräusch des Auspuffes zu mäßigen, andererseits die Kondensationsprodukte, welche sich in der Auspuffleitung bilden, zu sammeln, wendet man Ansblasetöpfe an, welche ähnlich den Einsaugetöpfen in der nächsten Nähe der Maschine aufgestellt werden müssen. Sollte ein Ausblasetopf nicht genügen, um die Belästigung der Umgebung des Maschinenortes zu vermeiden, dann schaltet man zwei oder drei Töpfe hinter einander ein oder verwendet eigene Schalldämpfer.

Die Wirkung derselben beruht meistens auf dem Prinzip, den Auspuffgasen noch einen besonderen Widerstand entgegenzusetzen, um auf diese Weise ihre lebendige Kraft und damit die Geschwindigkeit des Ausströmens in die Luft und des Stoßes gegen diese zu brechen. Dieser Widerstand wird durch durchbrochene Wände, durch parallel geschaltete, trichterförmige Zwischenwände, Siebe etc., welche in einen größeren, der Auspuffleitung eingefügten Behälter eingebaut werden, erzeugt.

Trotz der sehr energischen Ausströmung der Verbrennungsprodukte bleibt doch ein Teil derselben, entsprechend dem Volumen des Laderaumes, im Cylinder zurück. Manche Konstrukteure legen nun einen besonderen Wert darauf, die Rückstände der Verbrennung aus dem Cylinder zu entfernen, bevor eine neue Ladung eingenommen wird, um die Mischung derselben mit den Rückständen zu vermindern. Die dadurch erzielte Reinheit der Ladung ermöglicht allerdings die Verwendung gasärmerer Mischungen und hat eine viel raschere Explosion zur Folge. Das vollständige Austreiben der Rückstände ist praktisch sehr schwierig durchzuführen; man begnügt sich daher mit einem nur teilweisen Entfernen derselben.

Die in neuerer Zeit vielfach versuchte Einführung des Zweitaktes an Stelle des Viertaktes ist mit einer Reinigung des Cylinders von den Ver-

brennungsrückständen verbunden; auf diese Methode wird bei Besprechung der Zweitaktmaschinen zurückgekommen werden.

Ein anderes Mittel, welches den gleichen Zweck verfolgt, besteht darin, den Viertakt noch um zwei Hübe zu vermehren, während welcher die Maschine eine Ladung reine Luft allein ansaugt und diese zum Austreiben der Verbrennungsprodukte benützt.

Der Kreisprozeß dieser sogenannten Sechstaktmaschine setzt sich daher aus folgenden sechs Operationen zusammen: Einsaugen der explosiblen Ladung, Verdichtung derselben, Explosion und Expansion, Austreiben der Verbrennungsprodukte, Ansaugen reiner Luft, Austreiben derselben sowie der Rückstände.

Bei einer Maschine, welche diesen Arbeitsprozeß ausführt, werden die Verbrennungsprodukte allerdings fast vollständig ausgetrieben, indem die frisch einströmende Luft den Cylinder förmlich ausspült und die Rückstände des Laderaumes mit hinausnimmt, ohne daß hierzu andere Vorrichtungen als jene der Viertaktmaschine erforderlich sind.

Der Betrieb wird jedoch mit einer solchen im Sechstakt arbeitenden Eincylindermaschine trotz schweren Schwungrades und großer Geschwindigkeit ungleichmäßiger sein, als jener der Viertaktmaschine, da selbst bei voller Belastung nur nach sechs Hüben oder drei Umdrehungen ein Arbeitsimpuls erfolgt. Um den Gang der Maschine gleichmäßiger zu gestalten, wird dieselbe doppeltwirkend ausgeführt, wodurch auch die Anwendung leichterer Schwunräder ermöglicht wird. Nachdem die Cylinderwandungen durch die eingesaugte kalte Luft abgekühlt werden, so ist es, ohne Überhitzungen befürchten zu müssen, möglich, die Maschinen doppeltwirkend ausführen zu können.

Die Sechstaktmaschinen haben jedoch eine nur sehr geringe Verbreitung gefunden und werden fast nur noch in England, von wo die ersten Konstruktionen von Griffin (1883) und Rollason (1886) stammten, ausgeführt. Die doppeltwirkende Griffinmaschine ist die einzige Konstruktion, welche sich zufolge ihres regelmäßigen Ganges und der günstigen Wärmebilanz bis zum heutigen Tage in der Praxis erhalten hat und in England zum Betriebe von Dynamomaschinen für Beleuchtungszwecke mit Vorliebe verwendet wird.

Eine solche Maschine von 12,5 PS effektiver Leistung (229 mm Cylinderdurchmesser bei 356 mm Hub) hat an der im Jahre 1888 von der Society of Arts in London veranstalteten Konkurrenz teilgenommen. Die Maschine arbeitete mit einer mittleren Umdrehungszahl von 193 pro Minute und verbrauchte pro PS<sub>e</sub>-Stunde samt Zündung 0,81 cbm Gas, ein für jene Zeit immerhin günstiges Resultat.

Die Wärmebilanz stellte sich wie folgt:



In Arbeit umgesetzte Wärme . . . . .	21,1 %
Wärme der Abgase . . . . .	39,8 „
durch das Kühlwasser abgeführte Wärme	35,2 „
restlicher Verlust durch Strahlung etc. . .	3,9 „
Summa	100,0 %

Ein sinnreiches und dabei einfaches Mittel zur Entfernung der Verbrennungsrückstände wird von der Firma Crossley bei vielen ihrer Maschinen mit Vorteil, auch hinsichtlich des Wirkungsgrades derselben, verwendet.

Die in Rede stehende Anordnung ist eine Erfindung Atkinsons und besteht dem Wesen nach darin, daß das Ausströmröhr verhältnismäßig lang gebaut und das Einlaßventil etwas vor Ende des Ausströmhubes und somit auch um wenig früher als das Gasventil geöffnet wird. Nach jeder Explosion strömen die Verbrennungsprodukte schlagartig mit großer Vehemenz durch das Auspuffröhr und erzeugen infolge der Energie ihrer Bewegung in dem langen Rohre nach jedem Auspuff ein teilweises Vakuum. Wenn nun das Luftpfeinlaßventil noch vor Hubende eröffnet wird, dann strömt plötzlich frische Luft hinter dem Kolben ein, treibt die Verbrennungsprodukte durch das Ausströmröhr hinaus und füllt den Laderaum mit reiner oder doch nahezu reiner Luft. Die Länge des Ausströmröhres wird so gewählt, daß das teilweise Vakuum am Ende des Rohres gegen den Cylinder zu eintritt, wenn sich der Kolben der Totlage nähert.

Durch diese Konstruktion wird das Ausspülen des Cylinders ohne Hinzutreten irgend welcher neuer Details oder das Hinzufügen neuer arbeitsloser Hübe erreicht.

Bei einer Maschine dieser Art war das Ausströmröhr 20 m lang; die Spannung im Cylinder sank gegen Ende des Hubes um ungefähr 0,14 kg/qcm unter den Atmosphärendruck, so daß im Cylinder ein Druck von 0,86 kg/qcm absolut erreicht wurde. Unter dem Überdrucke der Atmosphäre drang im Momente der Eröffnung des Luftpfeintrittsventiles ein Strom frischer Luft in den Laderaum und trieb die Verbrennungsrückstände hinaus.

Das Ausspülen des Cylinders erhöht, wie bereits früher bemerkt, die Ökonomie des Betriebes, indem für gleiche Leistung eine gasärmere Ladung genügt. Speziell bei Verwendung verhältnismäßig schwacher Gase (Kraft- und Gichtgase) ist das Ausspülen vorteilhaft, weil das Versagen der Zündung dadurch vermieden wird; andererseits wird bei großen Maschinen die Gefahr der Vorzündung als eine Folge der heißen, in größeren Mengen zurückgebliebenen Rückstände, welche sich mit der neuen Ladung mischen, durch

das Ausspülen und Reinigen des Cylinders von diesen Rückständen sehr verringert.

**224. Anlaßvorrichtungen.** Um eine Gasmaschine in Gang zu setzen, muß das Schwungrad so lange angedreht werden, bis die erste Zündung, somit der erste Arbeitsimpuls erfolgt; gewöhnlich läuft dann die Maschine von selbst an. Selbstverständlich muß vor dem Andrehen die Steuerung und Zündvorrichtung betriebsfähig eingestellt sein.

Nachdem beim Andrehen der Maschine die Ladung nicht nur angesaugt, sondern auch verdichtet werden muß, so bereitet dasselbe bei mittelgroßen Maschinen bereits Schwierigkeiten und ist bei großen Maschinen ohne eigene Vorrichtungen überhaupt nicht ausführbar.

Wie bereits an früherer Stelle (§ 221) erwähnt, versah Otto seine ersten Viertaktmotoren mit einem sehr einfachen Apparate, um die Verdichtungsarbeit beim Andrehen der Maschine zu erleichtern, welcher dann ausgebreitete Nachahmung und Verbreitung fand. Diese Vorrichtung bezweckte, durch teilweise Eröffnung des Auslaßventiles während der Compressionsperiode einen Teil der angesaugten Ladung, allerdings unausgenützt, entweichen zu lassen, um hierdurch die Arbeit am Schwungrade beträchtlich zu verringern.

Trotz dieser Vorkehrung wird das Andrehen von Hand aus schon sehr schwierig, wenn die Leistung der Maschine etwa zehn Pferdekräfte übersteigt. So lange also nicht geeignetere Andrehvorrichtungen zur Verfügung standen, konnte man größere Maschinen nicht gut verwenden.

Für Maschinen von 10 bis etwa 30 PS verwendet man derzeit Schalterwerke (windenartige Getriebe, die das Schwungrad umtreiben), welche sich nach erfolgtem Anlassen selbsttätig ausschalten; daher ihre Benennung. Für große Maschinen über 50 PS, sowie Gruppen von Motoren rentiert es sich, eine eigene kleine Gasmaschine aufzustellen, welche den oder die Großmotoren beim Anlassen antreibt. Diese Anlaßmethode ist jedoch ziemlich kostspielig und verwendet man daher meistens automatische Apparate, Selbstanlasser genannt.

Diese Apparate lassen sich nach drei Gesichtspunkten gruppieren.

Bei der ersten Gruppe wird ein Behälter mit Ladungsgemenge unter Druck gefüllt, um als Energiespeicher zum Zwecke des Anlassens zu dienen. Der Behälter wird durch die Maschine selbst gefüllt, indem mit Ende des Betriebes die Zündung gelöscht und der Cylinder durch eine eigene Leitung mit dem Behälter verbunden wird; so lange die Maschine noch fortläuft, drückt sie die letzten, nicht entzündeten Ladungen in den Behälter. Beim Anlassen wird der Cylinder wieder mit dem Behälter verbunden, die Ladung tritt unter Druck in den Cylinder und treibt den

Kolben vorwärts. Nach erfolgter Zündung tritt die erste Explosion ein und die Maschine läuft dann von selbst an.

Der bekannteste Apparat dieser Art ist jener von Clerk. Dieser Apparat ist durch die Skizze Fig. 270 dargestellt. Die Füllung des Cylinders *A* erfolgt hier durch die Verbrennung des Gases in dem Gefäße *D*, welches vorher mit einer brennbaren Mischung aus Luft und Gas von atmosphärischer Spannung gefüllt wurde. Durch den Entzünder *T* wird die Füllung des Behälters *D* entflammt; die im oberen Teile beginnende Explosion treibt die unteren Partien der Ladung unter Druck durch das Rückschlagventil *B* in den Cylinder und sammelt sich dort unter Druck. Schließlich schlägt die Flamme aus *D* durch das Ventil *B* in den Cylinder und entzündet die hinter dem Kolben verdichtete Ladung und gibt hierdurch den ersten Arbeitsimpuls zur Ingangsetzung der Maschine. Die Kurbel wurde vorher so gestellt, daß die Maschine, nicht am toten Punkte stehend, anspringen kann.

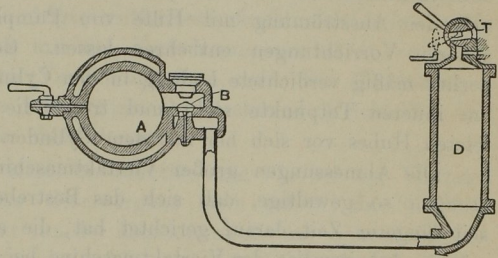


Fig. 270.

Bei der zweiten Gruppe werden die Abgase durch die Maschine selbst in einen Anlaßbehälter geschafft und verdichtet. Beim Anlassen der Cylinder mit dem Apparate in Verbindung gesetzt; die verdichteten Gase treiben den Kolben vorwärts, werden hierauf aus dem Cylinder verdrängt, worauf das Ansaugen und Verdichten einer neuen Ladung, sowie die erste Entzündung stattfindet.

Diese Methode hat den Vorteil, daß die Gefahr einer Entzündung oder Explosion der aufgespeicherten Ladung infolge von Undichtheiten des Behälters und unvorsichtigen Gebarens seitens der Bedienung, welche eine Schattenseite der ersten Methode bildet, gänzlich vermieden ist.

Die dritte Anlaßmethode besteht in der Aufspeicherung reiner atmosphärischer Luft unter entsprechender Verdichtung in einem Anlaßgefäße, durch welche die Maschine in gleicher Weise wie oben beschrieben angelassen wird. Diese Methode erfordert eine eigene Kompressionspumpe, empfiehlt sich daher nur bei großen Anlagen oder dort, wo der Arbeitsprozeß der Maschine so wie so mit der Aufspeicherung von Druckluft verbunden ist, wie dies beispielsweise beim Dieselmotor der Fall ist.

Die Frage der selbsttätigen Ingangsetzung der Gasmaschinen kann derzeit als zufriedenstellend gelöst betrachtet werden; die weitere Vervoll-

kommung der heute gebräuchlichen Vorrichtungen ist nur mehr eine Frage der Zeit, so daß in dieser Hinsicht kaum mehr viel zu wünschen übrig bleibt.

**225. Die Zweitaktmaschine.** Zweitaktmaschinen nennt man jene mit Verdichtung der Ladung arbeitenden Maschinen, bei welchen nach jeder Umdrehung auf ein und derselben Kolbenseite eine Entzündung beziehungsweise Explosion erfolgt. Die Zweitaktmaschinen arbeiten hinsichtlich ihres Kreisprozesses genau so wie die Viertaktmaschinen, nur bezüglich der Reihenfolge der vier Operationen des Viertaktes besteht hier der Unterschied, daß sich dieselben nicht in vier, sondern in zwei Hüben vollziehen, indem sich die beiden Hübe des Ansaugens und der Ausströmung mit Hilfe von Pumpen, Zwischenbehältern und anderen Vorrichtungen entbehren lassen. Gewöhnlich tritt die bereits vorher mäßig verdichtete Ladung in den Cylinder, wenn der Kolben nahe am inneren Totpunkte steht und treibt die Verbrennungsprodukte des letzten Hubes vor sich her aus dem Cylinder.

Die Abmessungen großer Viertaktmaschinen werden bei großen Leistungen so gewaltige, daß sich das Bestreben der Konstrukteure schon seit längerer Zeit darauf gerichtet hat, die an sich so einfache und bewährte Arbeitsweise der Viertaktmaschine bei großen Gasmotoren zu verlassen und durch öfter wiederkehrenden Antrieb die Abmessungen und damit auch die Gewichte der Maschinen zu verringern. Aus diesem Bestreben entstanden die im Zweitakt arbeitenden, mit einseitig offenen, also einfachwirkenden, sowie mit beiderseits geschlossenen, also doppeltwirkenden Cylindern ausgeführten Maschinen, welche letztere genau so arbeiten, wie eine Eincylinderdampfmaschine. Dieses Vorgehen hat nach jahrelanger, mühseliger Arbeit zu vollem Erfolge geführt.

Der erste, welcher im Jahre 1879 die Idee des Zweitaktes zur Ausführung brachte, war der englische Ingenieur D. Clerk. Seine Maschine fand jedoch erst 1881 Eingang in der Praxis und hat seitdem einer größeren Anzahl von Erfindern als Vorbild gedient. Unter diesen sind die Konstruktionen von Körting, Stockport, Robson, Baldwin u. a. zu erwähnen.

Diese Maschinen unterscheiden sich voneinander nur hinsichtlich ihrer Konstruktion; die Wirkungsweise ist bei allen dieselbe. Durch eine der Maschine angehängte Kompressionspumpe wird die explosive Ladung angesaugt und sodann in den Cylinder gedrückt, sobald der Arbeitskolben gegen Ende seines Aushubes eine Reihe von in der Cylinderwand befindlicher Auspufföffnungen zu überstreifen beginnt. Die unter Druck einströmende frische Ladung drängt zunächst, während der Kolben seinen

Aushub vollendet, die Verbrennungsprodukte durch jene Öffnungen hinaus. Während der Kolben seinen Rücklauf beginnt, treibt er den Rest der Verbrennungsprodukte aus dem Cylinder, um sodann während des Einhubes die Ladung weiter zu verdichten. Nach vollendetem Rückhub tritt Zündung und Explosion ein und das Spiel beginnt von neuem. Statt einer Pumpe, welche Luft und Gas einnimmt und als fertige Mischung in den Arbeitcylinder drückt, werden auch zwei getrennte Pumpen verwendet, wovon die eine als Luftpumpe, die andere als Gaspumpe dient; die Mischung erfolgt beim Übertritt in den Cylinder.

Wie aus diesem Arbeitsprozesse hervorgeht, ist bei diesen Maschinen die Expansion unvollkommen, indem der Kolben bereits vor Hubende die Auslaßschlitze überstreift, somit der Austritt früher als bei Maschinen mit gesteuerten Auslaßorganen erfolgt; andererseits findet eine teilweise Mischung der frischen Ladung mit den Verbrennungsprodukten, sowie ein nicht zu umgehender direkter Verlust derselben statt. Die Maschinen arbeiten, namentlich wenn sie doppeltwirkend gebaut sind, gleichmäßig und ruhig, jedoch auf Kosten des Gasverbrauches.

Die übrigen Teile der Maschine funktionieren wie bei der Viertaktmaschine; die Bewegung der Steuerorgane kann jedoch, da die Übersetzung 2 : 1 wegfällt, direkt von der Maschinenwelle aus ohne Zwischenwelle erfolgen. Die Regulierung erfolgt zumeist durch ausfallende Ladungen.

Bei der ersten Zweitaktmaschine von Clerk war die Einrichtung so getroffen, daß die Pumpe zuerst die Ladung und dann noch eine bestimmte Menge reiner Luft ansaugte, welche dann zuerst in den Cylinder gedrückt wurde und verhindern sollte, daß die Verbrennungsprodukte sich mit der Ladung mischen.

Steuerung und Zündung erfolgte durch einen Schieber.

Bei seiner späteren Maschine ließ Clerk die Ladung frischer Luft, welche sich nicht bewährt hatte, weg, baute dieselbe viel praktischer und verwendete zur Steuerung Ventile, zur Zündung Glührohre.

Die Stockportmaschine war derart gebaut, daß der Kompressionscylinder und der Arbeitcylinder, beide einfachwirkend, auf einem gemeinschaftlichen Rahmen einander gegenüber lagen, während die Kurbelwelle zwischen beiden gelagert und vom Arbeitskolben durch eine Pleuelstange angetrieben war. Die beiden Kolben waren untereinander durch Stangen fest verbunden.

Bei der Maschine von Robson dient der Arbeitcylinder gleichzeitig als Kompressionscylinder, indem er doppeltwirkend, also beiderseits geschlossen gebaut ist und der Kolben die Funktion des Arbeitskolbens

und Pumpenkolbens übernimmt. Die Steuerung, auch jene der Ausströmung, erfolgt durch Ventile; die Zündung durch Glührohre.

In ähnlicher Weise sind die Maschinen von Baldwin und Mire angeordnet, nur die Detailausführung ist geändert und die Glührohrzündung durch elektrische Zündung ersetzt.

Eine andere Anordnung zeigt die Maschine von Benz.

Die Arbeitsweise derselben weicht von jener der vorstehend erwähnten Maschinen insofern ab, als einerseits das Austreiben der Verbrennungsprodukte durch reine Luft, somit nicht durch die Ladung selbst erfolgt, andererseits die Expansion bis an das Ende des Hubes getrieben, also vollkommen ausgenützt wird. Diese Vorteile werden allerdings durch eine kompliziertere Konstruktion erkauft.

Der Arbeitscylinder ist wie bei der Robsonmaschine vorn geschlossen, doch dient die vordere Cylinderseite nur als Kompressionspumpe für die Luft, welche zugleich ein elastisches Kissen während der Explosion bildet und den Kolben kühlt. Das Gas wird durch eine eigene, an der Längsseite des Cylinders angebrachte, vom Kreuzkopfe betätigte Plungerpumpe verdichtet. Gas und Luft werden getrennt dem Cylinder zugeführt.

Die Wirkungsweise der Maschine ist nun folgende: Unter dem Einflusse der Explosion und der darauffolgenden Expansion verrichtet der Kolben seinen Arbeitshub. Im Momente des Hubwechsels wird das Auslaßventil geöffnet und ein Teil der Verbrennungsprodukte entweicht; fast unmittelbar darauf öffnet sich das Lufteinlaßventil; die einströmende verdichtete Luft treibt das Verbrennungsprodukt vollständig aus dem Cylinder. Ungefähr in der Mitte des Hubes schließen sich beide Ventile, während sich das Gasventil einen Moment öffnet, eine bestimmte regulierbare Gasmenge einströmen läßt und sich hierauf wieder schließt; der Kolben ist inzwischen in seiner Totlage angekommen, worauf Zündung und Explosion erfolgt und das Spiel von neuem beginnt\*).

Der Gasverbrauch der Benzmaschine ist nahezu ebenso günstig wie jener der gewöhnlichen Viertaktmaschine; sie arbeitet gleichmäßig, ruhig und nahezu geräuschlos.

Die Gleichmäßigkeit des Ganges wird bei Zwillingmaschinen wesentlich größer; die Maschinen werden unter 180° gekuppelt, so daß bei jeder halben Umdrehung eine Explosion erfolgt. Jeder Cylinder ist unabhängig von dem anderen gesteuert; zur Steuerung dient eine zwischen beiden Arbeitscylindern liegende, durch Schraubenräder mit der Übersetzung 1:1

\*) Abbildungen und Beschreibung dieser, sowie der folgenden Zweitaktmaschinen siehe: Ihering, *Die Gasmaschinen*, Leipzig 1901, S. 312—333, sowie Schöttler, *Die Gasmachine*, Braunschweig 1902.

von der Kurbelwelle angetriebene Zwischenwelle. Jeder Cylinder wird durch eine eigene Gaspumpe bedient, während die vorderen (kurbelseitigen) Arbeitscylinderseiten die Luftpumpen bilden.

Der Benzmotor hat in Deutschland und Frankreich eine ziemlich bedeutende Verbreitung, auch für kleine Leistungen von wenigen Pferdekraften, gefunden.

Zu den neueren Zweitaktmaschinen gehören außer der vorstehend besprochenen Benzmaschine die Gasmotoren von Ravel, Güldner, Söhnlein, Borsig u. a., sowie die doppeltwirkende Zweitaktmaschine von Körting.

Während die Maschine von Ravel bis auf unwesentliche Abweichungen in der Detailausführung genau so angeordnet ist, wie die Maschine von Robson, dient bei den Maschinen von Güldner und Söhnlein die hermetisch nach außen abgeschlossene Kurbelkammer, in welche der kurbelseitig offene Arbeitscylinder mündet, als Luftpumpencylinder.

Die doppeltwirkende Zweitaktmaschine von Körting wird von der Firma Gebr. Körting in Körtingsdorf bei Hannover nur für Großleistungen gebaut; sie bildet einen sehr beachtenswerten Fortschritt auf dem im Laufe der letzten Jahre besonders kultivierten Gebiete der Großgasmaschine als Ersatz der Dampfmaschine, behufs Ausnützung der Hohofen- und Generatorgase, da sie sowohl hinsichtlich des Raumbedarfes als auch der Gleichförmigkeit der Leistung und Gleichmäßigkeit des Ganges hinter jener in keiner Weise zurücksteht.

Die Maschine besteht, wie aus den Zeichnungen Fig. 271 und 272 (S. 680 und 681) ersichtlich, aus einem beiderseitig geschlossenen, verhältnismäßig langen Cylinder, in dessen Innerem sich ein Kolben befindet, der im Vergleiche mit den gebräuchlichen Dampfmaschinenkolben bedeutend länger und mit einer doppelten Garnitur Dichtungsringen gebaut ist. Der Cylinder besitzt in der Mitte sogenannte Auslaßschlitze, durch welche die verbrannten Gase ausströmen und die durch den Kolben selbst in den beiden Totpunktlagen einmal nach der vorderen und einmal nach der hinteren Seite des Cylinders hin geöffnet werden, während das frische Gemisch an den Cylinderenden eingeführt wird. Zu diesem Zwecke sind die beiden aus den Figuren ersichtlichen doppeltwirkenden Pumpen, eine für Gas, die andere für Luft, deren Kolben auf gemeinschaftlicher Stange aufgefädelt sind, angebracht. Die stirnseitige Antriebskurbel derselben ist unter einem Winkel etwas größer als  $90^\circ$ , der Hauptkurbel voreilend, gegen diese versetzt. Die Steuerorgane des Arbeitscylinders werden von einer zur Cylinderachse parallel laufenden Steuerwelle aus betätigt, während die Bewegung der Steuerorgane der Pumpen teils von der Kolbenstange derselben, teils

von einem Excenter abgeleitet wird. Zur Regulierung dient ein stehender Zentrifugalpendelregler.

Die Regelung erfolgt in der Weise, daß durch die als sogenannte Präzisionssteuerung ausgeführte Steuerung die Menge des eintretenden Gasgemisches dem Kraftbedarfe entsprechend geändert wird.

Cylinder und Kolben sind durch umlaufendes Wasser gekühlt. Durch die Kolbenkühlung hat man es in der Hand, der sonst unkontrollierbaren und daher gefährlichen Ausdehnung des Kolbens wirksam entgegenzutreten zu können, indem man den Kolben stets etwas kühler hält als den Cylinder.

Die Arbeitsweise der Maschine ist nun folgende: Steht der Kolben wie in Fig. 272 gezeichnet in seiner Totlage, dann sind die Auslaßschlitze nach der einen Seite des Cylinders geöffnet. Schon zu Beginn der Freilegung der Schlitze sinkt die Spannung der im Cylinder befindlichen Verbrennungsprodukte bis auf den Atmosphärendruck; sobald dieser Druckausgleich eintritt, öffnet sich das Einlaßventil und die neue Ladung wird durch die beiden Pumpen in den Arbeitscylinder gefördert und zwar zufolge der Einrichtung der Pumpensteuerung

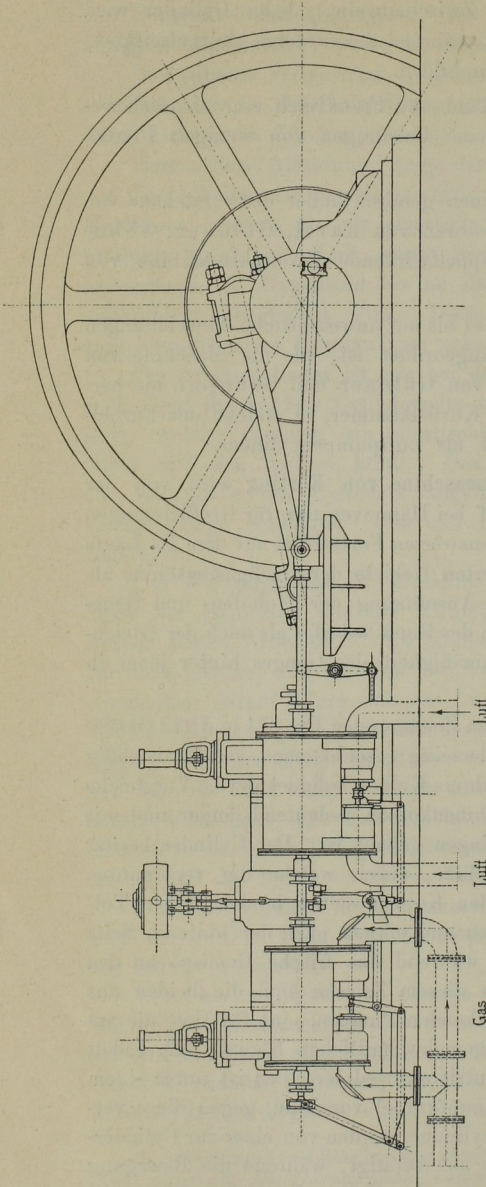


Fig. 271.



derart, daß zunächst Luft  
mischt eintritt. Die Ein-  
struiert, daß einerseits die  
nungsprodukten, ander-  
nachfolgenden Brennge-

allein und dann Gas mit Luft ge-  
trittsorgane sind andererseits so kon-  
Mischung der Luft mit den Verbren-  
seits die Mischung derselben mit dem  
misch vermieden und ein direkter Ver-

lust der explosiblen La-  
dung durch die Ausström-  
schlitze verhindert wird.

Kurz nachdem die  
Schlitze durch den rück-  
laufenden Kolben wieder  
geschlossen sind, haben die  
beiden Pumpenkolben ihre Tot-  
lage erreicht, die weitere För-  
derung des Gemisches hört auf  
und es erfolgt die Verdichtung  
der Ladung im Cylinder in be-  
kannter Weise, bis im Totpunkte  
die Zündung eintritt. Mit Ende  
des darauffolgenden Arbeits-  
hubes werden die Auslaßschlitze  
wieder eröffnet und die ver-  
brannte Ladung bläst durch die-  
selben ab und das Spiel beginnt  
von neuem. Der gleiche Vor-  
gang findet auf der anderen  
Kolbenseite statt.

Eine 400 PS-Maschine die-  
ser Art, welche längere Zeit hin-

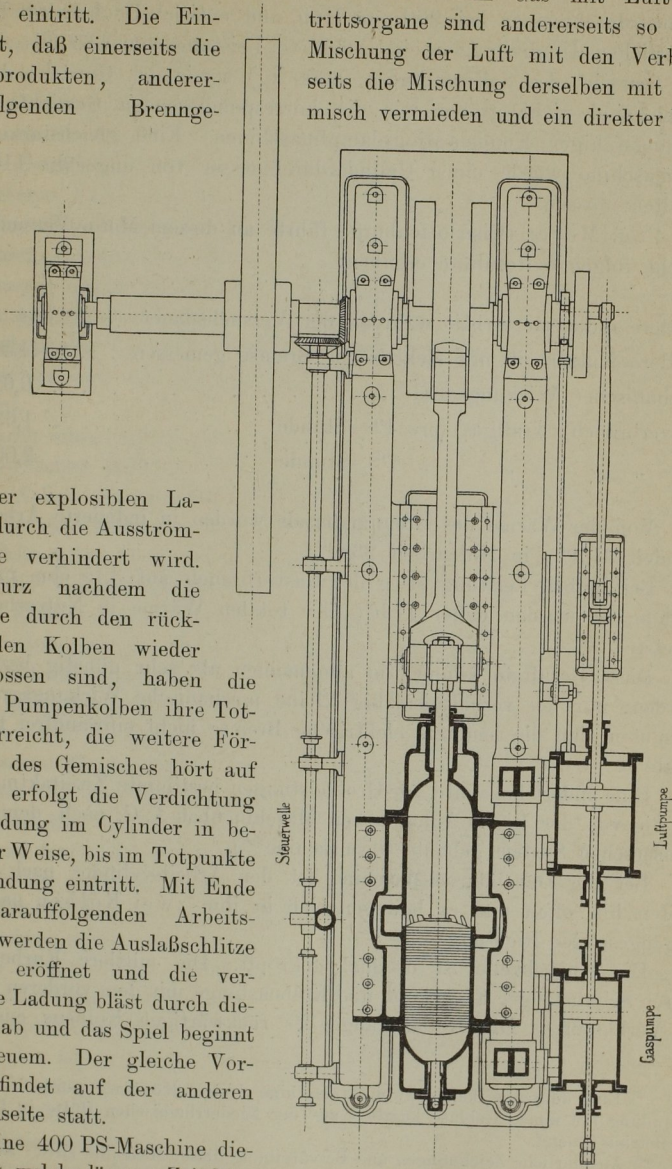


Fig. 272.

durch in der Fabrik von Gebr. Körting in Betrieb stand, hatte 550 mm Cylinderdurchmesser bei 960 mm Hub und entwickelte bei 100 bis 110 minutlichen Umdrehungen eine effektive Leistung von 360 bis 410 PS. Das Gewicht des Schwungrades (8000 kg) sowie das Gewicht der Maschine sind nicht größer wie die korrespondierenden Gewichte gleich leistungsfähiger Kondensationsdampfmaschinen. Eine gleichstarke Viertaktmaschine würde einen Cylinderdurchmesser von ungefähr 1100 mm erhalten müssen.

Prof. Meyer (Charlottenburg) führte an diesem Motor Versuche aus, welche folgende Resultate ergaben:

Mittlere indizierte Arbeit während der Versuchsdauer . . . . .	544	PS
Mittlere Nutzarbeit, mit elektrischer Bremse gemessen . . . . .	341,5	„
Mechanischer Wirkungsgrad . . . . .	0,628	
Gasverbrauch (Kraftgas) pro PS <sub>i</sub> -Stunde . . . . .	1,635	cbm
„ „ „ PS <sub>e</sub> -Stunde . . . . .	2,60	„

Von der Wärme des Brennmaterials wurden in indizierte Arbeit verwandelt 37,9%, in Nutzarbeit 23,8%.

Bei halber Leistung stieg der Gasverbrauch auf 3,15 cbm pro PS<sub>e</sub>-Stunde; es wurden daher 17,5% der totalen Wärme in Nutzarbeit umgesetzt.

Diese Resultate können im allgemeinen als sehr günstig bezeichnet werden, nur der verhältnismäßig kleine mechanische Wirkungsgrad läßt vermuten, daß die benützte elektrische Bremse nicht einwandfrei funktionierte\*).

Eine andere bekannte, für Großleistungen bestimmte Zweitaktmaschine ist die von der Berlin-Anhaltischen Maschinenbau-A.-G. nach dem Öchelhäuserschen System gebaute Gasmaschine\*\*).

Bei der Öchelhäuser-Maschine ist der Arbeitscylinder nach beiden Seiten hin offen und es bewegen sich in ihm zwei Kolben nach entgegengesetzter Richtung.

Die Kurbelwelle ist dreimal gekröpft. Die mittlere Kurbel steht durch Schubstange, Kreuzkopf und Kolbenstange mit dem vorderen Kolben in Verbindung. Die Kolbenstange des rückwärtigen Kolbens endigt in

\*) Eine doppeltwirkende Zweitaktmaschine System Körting wurde in direkter Kupplung mit einem Gebläse kürzlich auf der Niederrheinischen Hütte in Duisburg in Betrieb gesetzt.

\*\*) Ausführliche Zeichnungen und Beschreibung dieser Maschine siehe: *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, 1900, S. 299 und Taf. III.

einem Querstücke, das sich hinter dem Cylinder befindet; von diesem wird durch Vermittlung von je zwei zu beiden Seiten des Cylinders nach vorn führenden Verbindungsstangen, Kreuzköpfen und Schubstangen Kraft und Bewegung auf die beiden seitlichen Kröpfungen bezw. von diesen während des Verdichtungshubes auf den Kolben übertragen. Die Kurbeln des vorderen und hinteren Kolbens sind unter  $180^\circ$  versetzt, sodaß die beiden Kolben gleichzeitig entweder in ihrer äußeren oder inneren Totlage stehen. Im letzteren Falle liegt zwischen denselben der Verdichtungs- als Laderaum; im ersteren Falle das volle Hubvolumen vermehrt um den Laderaum.

Unter Hinweis auf die in der Fußnote angeführten ausführlichen Zeichnungen dieser Maschine möge hier die Beschreibung der allgemeinen Anordnung und Wirkungsweise derselben genügen.

Stehen also die beiden Kolben in der inneren Totlage, dann lassen sie zwischen sich den Kompressionsraum frei, die Verdichtung ist somit vollendet.

Durch einen elektrischen Funken, mittels Akkumulatorenbatterie und Ruhmkorffschen Induktor erzeugt, wird die Ladung entzündet und die Kolben, Arbeit verrichtend, nach außen getrieben. Sind dieselben nahezu am Ende des Hubes angelangt, dann legt der vordere Kolben Ausströmschlitze frei, die am Umfange des Cylinders angebracht sind, durch welche die Verbrennungsprodukte entweichen können, während der rückwärtige Kolben gleichzeitig Schlitze freilegt, die mit dem Spülluftbehälter in Verbindung stehen. Dieser Behälter wurde vorher mit einer bestimmten Menge schwach komprimierter Luft gefüllt; da die Oechelhäusermaschine namentlich für den Betrieb durch Hohofengase bestimmt ist, so entnimmt der Spülluftbehälter aus der Hohofenwindleitung eine genau abgemessene Menge Gebläseluft, die gewöhnlich unter einem Überdruck von etwa 0,7 Atmosphären steht. Diese Luftmenge strömt nun durch die gleichmäßig am Umfange des Cylinders verteilten Schlitze in den Cylinder und treibt die in demselben noch befindlichen Verbrennungsprodukte vor sich her und durch die Auspuffschlitze hinaus.

Während sich dieser Ausström-Ausspülprozeß vollzieht, bewegt sich die Maschine weiter und der rückwärtige Kolben legt, indem er sich seiner Totlage nähert, weitere, hinter den Spülluftschlitzen befindliche Schlitze frei, welche zum Einströmen der frischen Ladung dienen. Die auf etwa  $\frac{1}{3}$  Atmosphäre verdichtete Ladung strömt in den Cylinder und demselben entlang bis zu den Ausströmschlitzen. Sämtliche Schlitze müssen nun beim Rückgange des Kolbens wieder geschlossen werden, damit frische Ladung nicht durch die Ausströmschlitze verloren gehen kann. Sobald die Schlitze geschlossen sind, beginnt die Kompression, die somit bei jeder Umdrehung der Maschine einmal erfolgt.

Zur Bildung des Ladungsgemisches dient eine rückwärts an die Maschine angehängte Pumpe; dieselbe ist doppelwirkend und wird durch Drehschieber gesteuert. Gas und Luft werden durch eine Mischvorrichtung angesaugt.

Die beiden Kolben der Maschine bilden zugleich die Steuerorgane für die verschiedenen Ein- und Auslaßschlitze; es sind daher eigene Organe als Ventile, Schieber etc. am Arbeitszylinder überhaupt nicht vorhanden.

Die Regelung des Ganges der Maschine erfolgt dadurch, daß bei zunehmender Geschwindigkeit ein Teil des von der Gemengepumpe angesaugten Gemisches aus der Druckleitung in die Saugleitung zurückbefördert wird. Zu diesem Zwecke befindet sich in der Druckleitung ein vom Regulator betätigtes Reglerventil, welches mehr oder weniger geöffnet wird und das überschüssige Gemenge in die Saugleitung zurücktreten läßt.

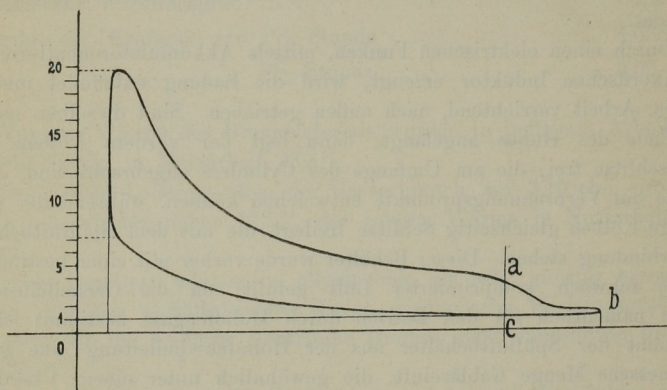


Fig. 273.

Eine 600 PS gekuppelte Maschine dieser Bauart (*Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure* 1900, Taf. III) wurde vom Hoerder Bergwerks- und Hüttenverein in Hoerde zum Betrieb einer Wechselstrommaschine aufgestellt. Der Cylinderdurchmesser beträgt 480 mm, der Kolbenhub 800 mm, die normale Umlaufzahl 135 pro Minute. Ein Cylinder leistet 300 PS<sub>e</sub>. Die beiden Maschinen sind unter 180° gekuppelt, zwischen beiden liegt das als Dynamoanker dienende Schwungrad.

Die Verdichtungsendspannung beträgt 8,5 kg/qcm absolut, die höchste Explosionsspannung ungefähr 25 kg/qcm.

Der Gasverbrauch (Gichtgas) wird von dem Hoerder Verein bei voller Belastung der Maschine mit 3,5 cbm pro PS<sub>e</sub>-Stunde, bei einem Heizwerte des Gases von 900 bis 1000 W.E. pro cbm angegeben.

Aus dem beistehenden Diagramme Fig. 273 sind die Spannungsverhältnisse im Innern des Cylinders genau zu ersehen. Man erkennt, daß die Verdichtung, Explosion und Expansion genau so erfolgt, wie in der Viertaktmaschine. Das Auspuffen geht im letzten Achtel des Expansionshubes und das Einbringen frischen Gemenges im ersten Achtel des Verdichtungs-hubes vor sich. Im Punkte *a* beginnt das Ausströmen und im Punkte *c* die Verdichtung; die Spitze *abc* des Diagrammes weicht daher in dieser Beziehung von dem Diagramme einer Viertaktmaschine ab\*).

**226. Großgasmaschinen.** Gute Leuchtgasmaschinen geben 25 bis 33 Prozent der im Leuchtgas enthaltenen Wärme, die besten Großdampfmaschinen hingegen höchstens 16 Prozent, zumeist jedoch nicht mehr als 12 bis 14 Prozent der in der Kohle enthaltenen Wärme als indizierte Arbeit ab; es ist daher längst außer Zweifel, daß die Gasmaschine der Dampfmaschine in thermischer Beziehung weit überlegen ist. In wirtschaftlicher Hinsicht wird jedoch die Leuchtgasmaschine trotzdem von der Dampfmaschine übertroffen, da dieselbe Wärmemenge aus Leuchtgas erzeugt viel teurer ist, als wenn sie durch Verbrennung von Kohle gewonnen wird.

Wesentlich günstiger stellen sich die Verhältnisse für die Gasmaschinen bei Verwendung von sogenanntem **Generatorkraftgas** oder **Mischgas**. Allein durch die Erzeugung desselben gehen immerhin noch 20 bis 30 Prozent der Wärme des Brennstoffes im Generator verloren.

Die große thermische Überlegenheit der Gasmaschine kommt jedoch voll und ganz auch in wirtschaftlicher Beziehung dann zur Geltung, wenn sowohl der Dampfkessel als auch die Gasmaschine durch ein und denselben Brennstoff gespeist werden können. Einen solchen Brennstoff bilden die Gichtgase, wie sie beim Hohofenbetrieb erhalten werden.

Eine größere Bedeutung gewann die Frage großer Gasmaschinen erst, als das Kraftgas zum Betriebe von Gasmotoren verwendet wurde; das war in Deutschland etwa vom Jahre 1886 ab. Es zeigte sich sofort, daß der Kohlenverbrauch von Kraftgasanlagen geringer sei als jener gleichleistungsfähiger Dampfmaschinenanlagen. Trotzdem machte die Entwicklung der Großgasmaschine sehr langsame Fortschritte, da es für jede neue Maschinengröße, wenn auch keine grundsätzlichen Schwierigkeiten zu überwinden waren, erst vieler neuer Erfahrungen bedurfte. Dazu kam noch der Umstand, daß eine eigentliche Nachfrage nach größeren Maschinen

\*) Eine ausführliche Besprechung der Einzelheiten dieser Maschine und der mit derselben erzielten Betriebsergebnisse siehe: *Zeitschrift des Vereins deutscher Ing.*, 1900, S. 1517.

nicht vorhanden war, da der Käufer ebensogut eine Dampfmaschine verwenden konnte, andererseits trotz des Vorteiles des verminderten Kohlenverbrauches mit einem gewissen Zagen an diese Neuerung herantrat und dies um so mehr, als sich die Gasmotorenfabriken anfänglich selbst sehr zurückhaltend zeigten, da sie in dieser Richtung nur über ein gewisses Erfahrungsmaterial verfügten.

Diese träge Entwicklung der Großgasmaschine wurde um die Mitte der 90er Jahre förmlich wie mit einem Schlage durch das Bestreben der Eisenhüttenleute, die Hohofengichtgase zum Betriebe von Gasmotoren zu verwerten, aufgerüttelt, gewaltig befördert und beschleunigt.

Die Entwicklung der Gichtgasmaschine ist einer der großartigsten Fortschritte, welcher nicht nur auf dem Gebiete des Gasmotorenbaues seit der Zeit des ersten Ottoschen Viertaktmotors, sondern auf dem Gesamtgebiete des Wärmemotorenbaues überhaupt zu verzeichnen ist. Die Hüttenindustrie braucht sehr große Motoren, gegen welche die bisher erbauten klein erscheinen; sie besitzt aber auch nicht nur den Unternehmungsgeist, sondern auch die Mittel, um das Wagnis, welches der erstmalige Bau so großer Maschinen mit sich bringt, auf sich nehmen zu können. Es wurde plötzlich, da die ersten Versuche von günstigen Erfolgen begleitet waren, eine so lebhafte Nachfrage nach Großgasmaschinen rege, daß die Gasmotorenindustrie alle Hebel in Bewegung setzen mußte, um diesen hochgeschraubten Anforderungen hinsichtlich Größe und Leistungsfähigkeit genügen zu können. Diese Aufgabe wurde jedoch in außerordentlich kurzer Zeit und in staunenswert vollkommener Weise gelöst. Während die Kraftgasmaschine sich bis vor etwa zwei Jahren nur bis zu einer Leistung von 300 Pferdekraften entwickelte, sind seit kaum sechs Jahren, seit dem Auftauchen der Idee der Verwertung von Hohofengasen, bereits zahlreiche Gichtgasmaschinen von 200 bis 1000 PS in Betrieb gekommen und Maschinen mit Leistungen von 1000 bis 2000 PS befinden sich in der Ausführung.

Die Nachfrage nach solchen Motoren ist derzeit eine so außerordentlich rege, daß die betreffenden Firmen, trotz der im allgemeinen Maschinenbau herrschenden Stagnation, den an sie herantretenden Anforderungen nicht gerecht werden können.

Mit wenigen Worten möge hier erwähnt werden, daß man fast gleichzeitig und unabhängig von einander in Deutschland, Belgien und England zum ersten Male dem Gedanken begegnete, Gichtgase zum Betrieb von Gasmaschinen zu verwenden. Die erste Anregung kam allerdings 1894 aus England. In Deutschland wurden die ersten Versuche 1895 von der Deutzer Gasmotorenfabrik in Gemeinschaft mit dem Hoerder Bergwerks- und Hüttenverein unter Benützung eines 12 PS Otto-Motors vorgenommen; zwei Monate später wurde von der Société Cockerill eine Versuchsmaschine

in Gang gesetzt. Die günstigen Ergebnisse in Hoerde führten dann zur Bestellung eines 200 PS-Motors System Oechelhäuser, welchem später die an anderer Stelle beschriebene 600 PS gekuppelte Maschine gleicher Bauart folgte. Für das gleiche Werk wurden außerdem von der Deutzer Gasmotorenfabrik zwei 1000 PS-Gichtgasmotoren geliefert. Deutschland ist somit selbständig vorgegangen und hat in dieser Richtung die führende Rolle übernommen und behauptet\*).

Was nun die allgemeine Bauart der Großgasmaschine betrifft, so kommt in erster Linie hinsichtlich der Viertakt-Eincylindemaschine der Umstand in Betracht, daß während zweier Umdrehungen nur ein Arbeitsspiel erfolgt. Obwohl der mittlere indizierte Druck im allgemeinen wesentlich größer ist als bei Dampfmaschinen (dieser Druck  $p_m$  ist aus den vorstehenden Diagrammen Fig. 257 bis 267 ersichtlich), so werden doch die Abmessungen der Gasmaschine in Anbetracht des Viertaktes und des einfach wirkenden Kolbens für große Leistungen sehr groß; infolge der hohen Pressungen müssen Gestänge und Lager sehr stark bemessen und mit Rücksicht auf die wünschenswerte Gleichförmigkeit des Ganges auch die Schwungräder so schwer gebaut werden, daß man schließlich zu fast unausführbaren Abmessungen der Maschine gelangt. Außerdem kommt noch der Umstand in Betracht, daß mit wachsender Größe der Maschine das Verhältnis der Oberfläche der Cylinderwandungen zum Cylinderinhalt abnimmt und infolgedessen die in der Maschine auftretenden hohen Temperaturen durch die Kühlung der Wandungen nicht mehr vollständig beherrscht werden können, sodaß an einzelnen Stellen Wärmestauungen bei unzulässig hohen Temperaturen entstehen, welche ein Verziehen des Cylinders, Heißblauen des Kolbens, Festsetzen der Ventile in ihren Führungen etc. zur Folge haben können. Diese baulichen Schwierigkeiten hat man allerdings in letzter Zeit durch Vervollkommnungen der Details größtenteils glücklich überwunden. Man verwendet in der Regel bei großen Maschinen nur eingesetzte Cylinder, die sich nicht verziehen und leicht auswechselbar sind. Die Kolben werden lang geführt und durch sechs bis acht selbstspannende gußeiserne Ringe, denen manchmal noch Stahlringe unterlegt werden, gedichtet. Der vordere, als Geradföhrung dienende Teil des Kolbens, welcher den Gestängedruck auf den Cylinder überträgt, wird leichtführend in den Cylinder eingepaßt und mit Rücksicht auf Reibung und Abnützung mit geeignetem Lagermetall ausgekleidet. Man hat auch versucht, den Kolben selbst durch Wasser zu kühlen. Auch auf die Schmierung des Kolbens ist besondere Sorgfalt zu verwenden; sie wird

\*) Eine Zusammenstellung der bis zum Jahre 1901 in Betrieb und Bau gestandenen Gichtgasmaschinen siehe: Ihering, *Die Gasmaschine*, 1901, S. 232.

jetzt in der Regel durch Preßpumpen besorgt und wirkt in diesem Falle sehr verläßlich.

Der zur Aufnahme der Ventile dienende Cylinderkopf bildet den Verdichtungs- und Verbrennungsraum, in dem daher die höchsten Temperaturen entstehen. Der Cylinderkopf muß daher durch Kühlwasser möglichst kalt erhalten werden, während das aus dem Cylindermantel abfließende Kühlwasser warm sein darf. Aus diesem Grunde ist es empfehlenswert, Mantel und Cylinderkopf durch eine besondere Kühlwasserleitung zu speisen.

Das Einströmventil wird von der eintretenden frischen Luft vollkommen umströmt und bleibt daher in dem gekühlten Cylinderkopf genügend kühl.

Viel ungünstiger arbeitet das Ausströmventil, welches ganz der Einwirkung der heißen Gase ausgesetzt ist. Man kann es allerdings so legen, daß die einströmende Ladung darüber hinwegstreicht und es somit etwas kühlt; wirksamer ist jedoch eine eigene Kühlung des Ventilsitzes und der Führung der Ventilspindel. Bei großen Maschinen bekommen die Ventile selbst schon bedeutende Abmessungen und gehört zur zwangweisen Eröffnung des Ausströmventiles eine bedeutende Kraft; man pflegt daher die Ventile zu teilen, in zwei Einström- und zwei Ausströmventile und letztere so zu steuern, daß das eine etwas vor dem anderen gelüftet, das letztere somit etwas entlastet wird. Diese Teilung hat auch den Vorteil, daß hierdurch der Kompressionsraum dem heutigen Bestreben entsprechend verringert werden kann, da vier kleinere Ventile bei gleichem Gesamtquerschnitte weniger Raum einnehmen als zwei große. Zur Erzielung möglichst ruhigen Schlusses der Ventile pflegt man bei großen Maschinen eigene Luftpuffer anzuwenden.

Der Verläßlichkeit wegen verwendet man bei Großmaschinen nur elektrische Zündung.

Schließlich sei noch hinsichtlich des allgemeinen Baues der Maschinen bemerkt, daß die Lager fast allgemein als Ringschmierlager, die sich sehr bewährt haben, ausgeführt werden. Die gekröpfte Kurbelwelle wurde trotz mancherlei Versuche, dieselbe durch Stirnkurbeln zu verdrängen, allgemein beibehalten. Die Cylinder großer Maschinen werden in den Rahmen eingebettet, sodaß nur der Cylinderkopf mit den Ventilen rückwärts hervorragt; es hat sich also auch die Gesamtkonstruktion der Maschine im Laufe der letzten Jahre vorteilhaft entwickelt.

Der deutsche Gasmotorenbau liefert heute Maschinen, die pro Cylinder 300 PS entwickeln können. Bei großen Eincylindermaschinen ist man jedoch zur Erzielung hoher Gleichförmigkeit gezwungen, außerordentlich schwere Schwungräder zu verwenden. Man fährt daher besser und nicht



wesentlich teurer, wenn man anstelle des schweren Schwungrades ein leichteres Schwungrad setzt und die Maschine als Zweicylindermaschine baut. Man findet daher meist schon für Leistungen von 100 PS an, für größere Leistungen fast ausschließlich, Zwillingsmaschinen.

Hinsichtlich der gegenseitigen Lage der Cylinder unterscheidet man im allgemeinen drei Anordnungen, je nachdem die Cylinder nebeneinander, hintereinander oder zu beiden Seiten der Welle einander gegenüberliegen.

Bei der ersten Anordnung, welche den übrigen Anordnungen vorzuziehen ist, ist die Kurbelwelle doppelt gekröpft, die Kröpfungen sind gleichliegend, sodaß sich die beiden Kolben gleichzeitig in der inneren oder äußeren Totlage befinden; die Steuerung ist jedoch derart angeordnet, daß der eine Kolben den Anfangshub vollzieht, während der andere den Expansionshub beschreibt u. s. f.; die Steuerungen sind also um  $360^\circ$  versetzt. Zwischen beiden Maschinen befindet sich das Schwungrad; die Kurbelwelle ist somit viermal gelagert.

Die letztere Anordnung ist dadurch gekennzeichnet, daß die Kurbelwelle nur einmal gekröpft ist, an dieser Kröpfung somit die Schubstangen beider Maschinen, deren Cylinderachsen in eine Gerade zusammenfallen, angreifen. Die Steuerungen sind um  $180^\circ$  versetzt, sodaß der Anfangshub der einen Maschine mit dem Verdichtungshub der anderen Maschine zusammenfällt. Die Maschinen sind verkehrtläufig. Bei der linksläufigen Maschine wird der Kolben durch die Explosionswirkung nach oben gedrückt, während der Kompression jedoch nach unten; der Kolben berührt somit die Cylinderwandung einmal oben, einmal unten; die Gleitflächen müssen daher sehr reichlich bemessen oder nachstellbar sein, damit sich die Kolben nicht rasch auslaufen.

Die zweite Anordnung bildet eine Tandemmaschine mit hintereinander liegenden Cylindern, einfach gekröpfter Welle, an welcher die gemeinschaftliche Schubstange angreift. Die Kolbenstange geht durch den Cylinderkopf des ersten Cylinders hindurch, muß daher in demselben durch eine Stopfbüchse abgedichtet sein. Die Steuerungen sind gleichfalls wie bei der ersten Anordnung um  $360^\circ$  versetzt, sodaß der Anfangshub in dem einen Cylinder mit dem Expansionshub im anderen Cylinder zusammenfällt. Diese Anordnung bietet infolge der durchgehenden Kolbenstange hinsichtlich der zweckentsprechenden Unterbringung der Ventile im Cylinderkopf des vorderen Cylinders behufs Erzielung eines genügend kleinen Kompressionsraumes große Schwierigkeiten; die Zugänglichkeit der Ventile wird sehr erschwert etc.; man hat daher die Tandemaufstellung trotz ihrer sonstigen Vorteile wieder verlassen, sodaß heute eigentlich nur Maschinen mit nebeneinander oder gegenüber liegenden Cylindern gebaut werden.

Den Vorteil der Zwillingmaschine, höhere Gleichförmigkeit des Ganges mit geringerem Schwungradgewichte zu erzielen, würde man selbstverständlich auch durch eine doppelwirkende Viertaktmaschine erreichen. Die Schwierigkeiten, welche bei der Doppelwirkung überwunden werden müssen, liegen einerseits in der hierdurch notwendig werdenden Stopfbüchse für die Kolbenstange, namentlich aber in dem Umstande, daß der nun vorne geschlossene Cylinder, sowie der Kolben nicht mehr einseitig mit der atmosphärischen Luft in Verbindung stehen, daher beiderseits der Einwirkung der hohen Temperaturen ausgesetzt sind. Durch die Anwendung der Howaldtschen Metallpackung sind die Schwierigkeiten hinsichtlich der Stopfbüchse völlig überwunden. Die Schwierigkeiten hinsichtlich des Kolbens können nur durch Wasserkühlung desselben auf ein nicht direkt schädliches Maß reduziert werden.

Die Firma Körting baute eine doppelwirkende Viertaktmaschine, bei welcher der Kolben auf diese Weise gekühlt wurde. In der hohlen Kolbenstange befindet sich ein konzentrisch eingebautes Rohr, durch welches das Wasser dem Kolbenkörper zugeführt wird, während dasselbe durch den ringförmigen Hohlraum der Kolbenstange zurückfließt.

Das Wasser wird durch geeignete Rohrverbindung von einer kleinen Preßpumpe geliefert und fließt mit einer solchen Geschwindigkeit zu, daß der Wasserfaden in Anbetracht der Geschwindigkeit der hin- und hergehenden Massen nicht abgerissen wird, somit ein kontinuierlicher Zu- und Abfluß des Wassers gesichert ist.

Diese Maschine soll sich nach Angabe der Fabrikanten teurer stellen, als eine gleich leistungsfähige Zwillingmaschine.

Nachdem man gegenwärtig, wie früher erwähnt, Gasmaschinen für Leistungen bis rund 300 PS<sub>e</sub> Maximalleistung pro Cylinder baut, so ist die durch Zwillingviertaktmaschinen erreichbare Leistung 600 PS. Es sind jedoch auch Ausnahmefälle zu verzeichnen. So baut z. B. die Firma John Cockerill in Seraing Viertaktmaschinen mit einem Cylinder von 1300 mm Durchmesser bei 1400 mm Hub, welche bei 80 bis 90 minutlichen Umdrehungen eine mittlere Leistung von 500 PS<sub>e</sub> entwickeln. Diese Maschinen sind zum direkten Betrieb von Hohofengebläsen bestimmt, indem die Kolbenstange durch den Cylinderkopf hindurchführt und direkt mit dem Kolben des dahinter liegenden Gebläsecylinders gekuppelt ist\*).

Gewöhnlich erreicht man jedoch durch Zwillingmaschinen eine Maximalleistung von 600 PS<sub>e</sub>.

Für größere Leistungen kuppelt man zwei Maschinen mit gegenüber-

---

\*) Über diese und andere Großgasmotoren siehe: *Zeitschrift d. Ver. deutscher Ingenieure*, 1900, S. 297, 401, 1517, sowie den Bericht über Gasmotoren der Düsseldorf-Ausstellung 1902 in der *Zeitschrift des Vereins deutscher Ing.*, 1902, S. 869.

liegenden Cylindern durch eine gemeinschaftliche doppeltgekröpfte Welle und zwischenliegendem Schwungrade. Auf diese Weise kann man Leistungen bis 1200 PS<sub>e</sub> erreichen; doch findet man diese Bauart auch schon bei Maschinen mit wesentlich kleinerer Leistung bis herab zu 600 PS<sub>e</sub>, namentlich dann, wenn es sich um große Gleichförmigkeit des Ganges handelt, da solche Maschinen bereits nach jeder halben Umdrehung einen Arbeitsimpuls empfangen, also in diesem Sinne einer doppeltwirkenden Expansionsdampfmaschine gleichwertig sind.

Neben dem Viertakt spielt der bereits im vorhergehenden erörterte Zweitakt für Gasgroßmaschinen eine sehr wichtige Rolle. Die Zweitaktmaschinen sind vornehmlich, wie schon früher erwähnt, aus dem Bestreben hervorgegangen, für dieselbe Leistung kleinere Cylinderabmessungen und höhere Gleichförmigkeit des Ganges zu erlangen, als dies bei Anwendung des Viertaktes möglich ist. Die räumliche Trennung des Arbeitscylinders und der Gemengepumpe führt bei kleineren Maschinen zu umständlichen und teureren Bauten, die mit dem einfachen Viertaktmotor nicht konkurrieren konnten, daher für kleinere Leistungen der Zweitakt längst wieder vom Markte verschwunden ist. Für Großmaschinen liegen die Verhältnisse jedoch viel günstiger, da man ja auch beim Viertakt, wie bei der Dampfmaschine, mehrere Cylinder anwendet.

Obwohl durch den Zweitakt die Leistung eines Cylinders nahezu verdoppelt wird, so darf doch nicht übersehen werden, daß der Zweitakt neben dem Arbeitscylinder noch zwei weitere Cylinder für die Gemenge- und die Spülluftpumpe (oder auch Luft- und Gaspumpe) erfordert, im ganzen daher größere Cylinderräume beansprucht als eine Zwillingsviertaktmaschine gleicher Leistung. Allerdings sind die beiden Hilfscylinder nicht für jene hohen Pressungen und Temperaturen zu bauen, welche im Arbeitscylinder auftreten; auch erspart man insofern an Ventilen, als man wenigstens den Auspuff durch den Arbeitskolben selbst unter Vermittlung von Ausströmschlitzten steuert.

Bei der doppeltwirkenden Zweitaktmaschine von Körting (siehe Fig. 271, 272) sowie bei der Maschine von Oechelhäuser leistet ein Cylinder ungefähr ebensoviel als vier Viertakteylinder gleicher Abmessungen und gleicher Kolbengeschwindigkeit. Bei der Oechelhäuser-Maschine ist jedoch der Cylinder ungefähr doppelt so lang; außerdem sind zwei Kolben, eine dreifach gekröpfte Welle, drei Schubstangen, eine rückwärtige Geradföhrung und das übrige Gestänge vorhanden. Welches System sich für Großleistungen in der Praxis besser bewähren wird, ist derzeit eine noch offene Frage, über welche wohl die Zukunft ein entscheidendes Urteil fällen wird.

Eine andere, derzeit gleichfalls noch offene Frage ist jene hinsicht-

lich des Gasverbrauches. Dieselbe spielt allerdings für Großleistungen, so lange Gichtgase zum Betriebe verwendet werden und in genügender Menge zur Verfügung stehen, keine so ausschlaggebende Rolle, wie die Einfachheit und Billigkeit der Maschine und deren Eigenart und Verhalten hinsichtlich der Anforderungen des Betriebes. In letzterer Beziehung würde wohl der Zweitaktmaschine mit doppeltwirkenden Kolben der Vorzug vor den übrigen Systemen eingeräumt werden müssen.

Theoretisch sollte sich der Gasverbrauch der Zwei- und Viertakt-systeme vollkommen gleich stellen, da ja die Kreisprozesse dieselben sind. In Wirklichkeit werden jedoch bei der Zweitaktmaschine größere Arbeitsmengen für das Herbeischaffen der Ladung und das Hinüberdrücken derselben in den Arbeitscyylinder erforderlich sein; andererseits ist es sehr fraglich, ob nicht frische Ladung durch die Ausströmschlitzte, bevor dieselben durch den Kolben geschlossen werden, entweicht, wodurch direkte Arbeitsverluste entstehen würden.

Vorteilhaft würde hingegen die Reinheit der Ladung wirken, wenn es gelingt, durch das Ausspülen des Arbeitscylanders die Verbrennungsrückstände wirklich zu entfernen. Über all' diese Fragen können jedoch nur eingehende Versuche, die derzeit nicht in genügender Vollständigkeit vorliegen, Aufklärung bringen.

**227. Die gasförmigen Brennstoffe.** Trotz der außerordentlichen Vervollkommnung der heutigen Gasmaschine und des verhältnismäßig sehr geringen Gasverbrauches derselben stellt sich die Wärmeeinheit des gewöhnlichen Leuchtgases wesentlich teurer als jene der Kohle; die Gasmaschine mußte daher der Dampfmaschine gegenüber so lange im Nachteil bleiben, als man auf die Verwendung des Leuchtgases allein beschränkt war. Diese Tatsache und das Bestreben, die Gasmaschine durch Verwendung eines wesentlich billigeren Gases, also durch Verminderung der Kosten der Wärmeeinheit, für größere Kraftanlagen konkurrenzfähig zu gestalten, hat nach vielen mitunter erfolglosen Versuchen zur Erzeugung eines billigeren Gases, des sogenannten Generatorgases, geführt.

Das Verdienst, diese Aufgabe gelöst zu haben, gebührt dem Engländer Emerson Dowson, welcher 1881 einen Apparat zur Erzeugung eines wasserstoffreichen Kraftgases und die damit gemachten Erfahrungen veröffentlichte. Dieser Apparat ist trotz seiner großen Leistungsfähigkeit verhältnismäßig einfach und billig, sodaß sich seine Anschaffung selbst für kleinere Leistungen, von etwa 20 PS aufwärts, empfiehlt und rentiert.

Dowson hat die Aufgabe allerdings nur teilweise gelöst, da seine Gaserzeuger nur zwei Brennmaterialien und zwar Anthrazit und Koks verarbeiten können.

Die teure Wärmeeinheit des Leuchtgases macht sich im Vergleiche mit der Dampfmaschine bei kleinen Leistungen nicht fühlbar, da einerseits der thermische Wirkungsgrad und die Regulierfähigkeit der Gas- kleinmaschine der Kleindampfmaschine weit überlegen ist, andererseits die Gasmaschine nahezu keine Bedienung erfordert; infolgedessen stellt sich für so kleine Leistungen der Betrieb mit Leuchtgas sogar billiger als jener mit Dampf. Es wäre daher tatsächlich eine verlorene Mühe gewesen, für Leistungen unter etwa 20 PS nach einem Gase zu suchen, dessen Wärmeeinheit sich billiger stellt wie jene des städtischen Gases.

Anders stellen sich jedoch die Verhältnisse, sobald diese Leistungsgrenze wesentlich überschritten wird, da für größere und Großleistungen nicht nur der thermische Wirkungsgrad der Dampfmaschine sich erhöht, sondern auch an die Regulierfähigkeit der Maschine ganz andere Anforderungen gestellt werden können; für solche Leistungen ist der Gas- motor mit dem Zeitpunkte der Einführung eines billigeren Kraftgases ein sehr gefährlicher Konkurrent der Dampfmaschine geworden.

Für eine effektive Leistung von 100 PS benötigt eine auf der Höhe der Zeit stehende Dampfmaschine durchschnittlich 1,3 bis 1,5 kg guter Steinkohle; eine Generatorgasmaschine 0,60 bis 0,70 kg Hüttenkoks pro effektive Pferdekraftstunde. Nachdem der Preis guter Steinkohle von jenem des guten Hüttenkoks im allgemeinen nicht wesentlich verschieden ist, so stellt sich unter der Voraussetzung, daß die Gasmaschine samt Generator hinsichtlich Bedienung, Schmierung und sonstigen Erhaltungskosten nicht teurer zu stehen kommt als eine gleich leistungsfähige Dampf- anlage, der Betrieb mit Generatorgas bereits merklich billiger als jener mit Dampf. Bei noch größeren Leistungen ändert sich dies Verhältnis etwas zugunsten der Dampfanlagen, da der thermische Wirkungsgrad der Dampfmaschine sich mit zunehmender Leistung bessert, während derselbe bei Gasmaschinen von etwa 100 PS aufwärts ziemlich konstant bleibt.

Würde es gelingen, Kraftgas aus minderwertigem Brennmaterial, wie solches ja vielfach zur Kesselfeuerung verwendet wird, erzeugen zu können, dann würde die Gasmaschine der Dampfmaschine wohl in jeder Beziehung und für jede Leistung weit überlegen sein und dieselbe zweifellos auf allen Gebieten verdrängen.

**Leuchtgas.** Das gewöhnliche städtische Leuchtgas wird durch Destil- lation geeigneter Steinkohlen erzeugt.

Der Zweck der Erzeugung desselben war ursprünglich nur die Dar- stellung eines mit hell leuchtender Flamme brennbaren Gases und es war nur ein Zufall, daß dieses Gas auch als vollkommen geeignet für die Hervorbringung motorischer Kraft befunden wurde.

Das Leuchtgas liefert ein Brennmaterial von chemischer Reinheit, welches sich zur vollkommenen Nützbarmachung der erzeugten Wärme vorzüglich eignet.

Aus 100 kg Steinkohle geeigneter Qualität erzeugt man durchschnittlich 27 bis 34 cbm Gas und 50 bis 72 kg Koks; der Rest entfällt auf Teer und Ammoniakwasser. Die Gasquantität hängt im allgemeinen von dem in der verarbeiteten Kohle enthaltenen Überschuß an Wasserstoff, welcher nicht zur Bildung von Wasser erforderlich ist, ab.

Die chemische Zusammensetzung des Leuchtgases ist sehr verschieden; es besteht aus einer größeren Anzahl unter sich verschiedener Gasarten, deren Mischungsverhältnis nicht nur von dem verwendeten Brennmaterial, sondern auch von der Art der Fabrikation und Reinigung des Gases, sowie von dem Verlaufe der Destillation abhängt. Allerdings vereinigen sich die Destillationsprodukte in den Gasometern, infolgedessen das Gas, bevor es an den Verwendungsort gelangt, eine größere Gleichförmigkeit der Zusammensetzung besitzt; eine volle Gleichförmigkeit ist jedoch jedenfalls zu erwarten.

Für genaue kalorimetrische Untersuchungen ist die Kenntnis der Zusammensetzung des Gases auf Grund chemischer Analysen unbedingt erforderlich. Die vollständige Analyse eines Leuchtgases, namentlich auf seinen Gehalt an schweren Kohlenwasserstoffen, ist jedoch außerordentlich schwierig und wird nur selten ausgeführt. Für die Mehrzahl der Versuche an Gasmaschinen wird es sich nicht um genaue kalorimetrische Untersuchungen, sondern um eine Feststellung des thermischen Wirkungsgrades und einer angenäherten Wärmebilanz handeln, daher die Bestimmung des Heizwertes durch ein Kalorimeter vollkommen ausreicht.

In Deutschland und Österreich wird derzeit das Kalorimeter von Junkers am meisten benützt. Genaue Gasanalysen mit Bestimmung des spezifischen Gewichtes können eigentlich nur von in dieser Richtung geübten Chemikern in größeren chemischen Laboratorien, welche mit den erforderlichen Apparaten ausgestattet sind, ausgeführt werden.

Für Überschlagsrechnungen nimmt man für städtisches Leuchtgas mittlere Werte an, welche sich dem wahren Werte mit einer für die gewöhnlich vorkommenden Fälle genügenden Genauigkeit nähern, und zwar den Heizeffekt (Verbrennungswärme) mit 5000 W.E. pro Kubikmeter und das spezifische Gewicht mit  $\sigma = 0,42$ . Nimmt man ferner das Gewicht von 1 cbm atmosphärischer Luft bei 0° C Temperatur und einem Barometerstande von 760 mm mit 1,2866 kg an, dann berechnet sich das Gewicht von 1 cbm Leuchtgas mit 0,54 kg.

Die Explosionsgrenzen einer Mischung aus Leuchtgas und Luft bei atmosphärischer Spannung sind 8 Volumsteile Gas als untere Grenze

und 20 Volumsteile Gas auf 100 Volumsteile Luft als obere Grenze; bei dem Mischungsverhältnisse 1:10 bis 1:11 ist die Explosionskraft im allgemeinen am größten.

Obwohl sich Gas und Luft in allen Verhältnissen mischen, so sind für den Kraftbetrieb nur jene Mischungen von Bedeutung, welche sich im geschlossenen Raume, also unter Abschluß gegen die Außenluft entzünden und unter Druckentwicklung ihrer ganzen Masse nach, also vollkommen verbrennen.

Von diesen Mischungen wird wieder jene für den Motorenbau die größte Bedeutung haben, in welcher gerade so viel Luft enthalten ist, als zur vollständigen Verbrennung des in dem Gemische enthaltenen Gasquantums erforderlich ist, da in diesem Falle alle Partien des Gases an der Verbindung desselben mit dem Sauerstoffe der Luft teilgenommen haben. Ein solches Gemisch nennt man die stärkste Mischung, weil dieselbe bei der Verbrennung, ohne störende Rückstände zu hinterlassen, den größten Druck entwickelt.

Das Mischungsverhältnis dieser stärksten Mischung ist selbstverständlich von der chemischen Zusammensetzung des Gases abhängig. Dieser Bedingung größter Druckentwicklung entspricht eine Mischung von durchschnittlich 1 Volumteil Leuchtgas auf 5 bis 6 Volumsteile Luft.

Man erzielt jedoch, wie die Erfahrung gezeigt hat, mit gasärmeren Mischungen im allgemeinen günstigere Resultate, d. h. höhere Brennstoffökonomie und wird das Mischungsverhältnis gewöhnlich mit 1:8 bis 1:10 angenommen. Diese Mischung wird allerdings durch die im Laderaume der Maschine vom vorhergegangenen Hube zurückgebliebenen Verbrennungsrückstände noch weiter verdünnt und die Entzündbarkeit vermindert, daher man in neuerer Zeit bei Großmaschinen diese Rückstände durch Ausspülen des Cylinders zu entfernen sucht.

Die in der Gasmaschine auftretende rasche Verbrennung (Verpuffung) der explosiblen Mischung ist eine ungemein rasche Fortpflanzung der in einem Teile des Gasgemisches hervorgerufenen Entzündung desselben. Die Geschwindigkeit, mit welcher sich die Entzündung fortpflanzt, hängt von der Gleichförmigkeit der Mischung und dem Mischungsverhältnisse ab. Je dünner, d. h. je gasärmer die Mischung ist, desto langsamer verbreitet sich die Verbrennung über die ganze Masse. Von der Art der Verpuffung hängt auch die Druckentwicklung ab und wird der Maximaldruck um so früher erreicht, je rascher die Verbrennung erfolgt. Die Explosionsfähigkeit wird also durch das Mischungsverhältnis auf zweierlei Art beeinflusst: einerseits durch die Änderung der Zeitdauer bis zur Erreichung des größten Druckes, andererseits durch die Größe dieses Druckes selbst.

Ein gewöhnlicher Viertaktmotor kleinerer Größe arbeitet durchschnitt-

lich mit 180 bis 220 Umdrehungen in der Minute, somit ist die Zeitdauer eines Hubes 0,17 bis 0,14 Sekunde. Würde eine Ladung somit, im Momente des Hubwechsels entzündet, zu ihrer vollständigen Verbrennung diese Zeit benötigen, dann würde die Verbrennung erst mit Hubende vollendet sein und die ganze Expansionsarbeit ginge verloren; es können daher nur Mischungen verwendet werden, welche zu ihrer vollständigen Verbrennung einen kleinen Bruchteil obiger Zeitdauer erfordern.

Die Höhe des Punktes *D* über *C* (Fig. 274) kann durch Rechnung bestimmt werden, sobald die Temperatur in *C*, die spezifische Wärme (bei konstantem Volumen) der verbrannten Mischung, die durch die Explosion erzeugte Wärme, sowie die Änderung der spezifischen Dichte, hervorgerufen durch die Änderung der chemischen Zusammensetzung infolge der Explosion, bekannt sind.

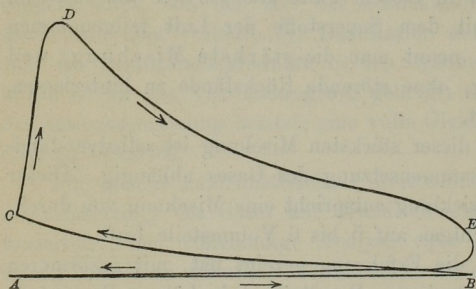


Fig. 274.

Die Indikator-*p-v*-Diagramme der Gasmaschinen zeigen im allgemeinen im Momente der Entzündung einen wesentlich kleineren Druck, als die Rechnung unter Voraussetzung momentaner Verbrennung ergeben würde. Das

Diagramm Fig. 274 einer gewöhnlichen, unter normaler Belastung arbeitenden Viertaktgasmaschine (siehe ferner die Diagramme Fig. 261, sowie 264 bis 267) zeigt eine so rasche Drucksteigerung infolge der Explosion, daß der höchste Druck in *D* erreicht wird, ohne daß sich das Volumen merklich vergrößert hat; der Berechnung der zugeführten Wärme kann daher, ohne einen nennenswerten Fehler zu begehen, die spezifische Wärme bei konstantem Volumen zugrunde gelegt werden. Diese Berechnung ergibt, daß nur 60 bis 70 Prozent jener Wärme, welche bei vollständiger Verbrennung der Mischung erzeugt wird, zur Hervorbringung der der Drucksteigerung von *C* nach *D* entsprechenden Temperatursteigerung erforderlich sind; der Rest wird somit erst während der darauffolgenden Expansion der heißen Gase entwickelt. Der Prozeß der Verbrennung (eine Explosion im vollen Sinne des Wortes findet ja tatsächlich nicht statt) beginnt allerdings ungemein rasch, verzögert sich jedoch während des Kolbenhubes, so daß sich die Wärmeentwicklung auf den ganzen, mindestens auf den größten Teil des Hubes erstreckt. Man nennt diese Erscheinung das „Nachbrennen“.

Das Nachbrennen ist dadurch erwiesen, daß einerseits der größte



Druck nach erfolgter Entzündung viel kleiner ist als jener Druck, welcher der vollständigen Verbrennung entsprechen würde, und andererseits der Verlauf der Expansionslinie auf eine beständige Wärmezufuhr während der Expansionsperiode schließen läßt.

Obwohl während der Expansion die Gase sehr viel Wärme durch Leitung seitens der wassergekühlten Cylinderwand verlieren (dieser Verlust beträgt durchschnittlich 40, in manchen Fällen sogar 50 Prozent der durch die Verbrennung entwickelten Wärme), fällt die Expansionslinie doch sehr wenig von der Adiabate ab und bleibt sogar in einzelnen Fällen über derselben. Dies beweist, daß der Verlust an Wärme durch Abkühlung der Gase der Zunahme an Wärme infolge des Nachbrennens mehr oder minder das Gleichgewicht hält.

Der Verbrennungsprozeß wird namentlich dann verzögert, wenn die explosible Mischung gasarm ist. Der größte Druck wird dann erst im weit vorgeschrittenen Kolbenhube erreicht und es ist denkbar, daß die von der Maschine ausgestoßenen Verbrennungsprodukte sogar noch unverbranntes Gemisch enthalten.

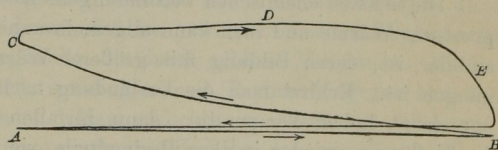


Fig. 275.

Fig. 275 zeigt das Diagramm einer Viertaktmaschine, welche mit sehr gasarmer Ladung gespeist, infolgedessen die Verbrennung außerordentlich verzögert wurde.

Der Prozeß der explosionsartigen Verbrennung wurde experimentell u. a. von dem englischen Ingenieur D. Clerk\*) untersucht, welcher Mischungen aus Gas und Luft, sowie Mischungen aus Wasserstoff und Luft in geschlossenen Gefäßen zur Explosion brachte, die mit einem Apparate versehen waren, welcher die Zeitintervalle der Druckschwankungen anzeigte. Bei diesen Experimenten nahm der Druck nach erfolgter Explosion nur infolge des kühlenden Einflusses der umgebenden Wandungen ab. Nachdem die Temperatur vor der Entzündung bekannt war, konnte aus dem Druckdiagramm die höchste Temperatur, welche während der Verbrennung erreicht wurde, unter der Annahme, daß die spezifische Wärme der Gase unverändert blieb, berechnet und mit jener Temperatur verglichen werden, welche bei momentaner vollständiger Verbrennung erreicht worden wäre. Mischungen aus Gas und Luft im Verhältnisse 1:15 bis 1:5 wurden auf diese Weise untersucht; die höchste hierbei er-

\*) Siehe D. Clerk, *The Gas- and Oil-Engine*, 6. Aufl., London 1896, sowie dessen Arbeiten „*On the Theory of the Gas-Engine*“ und „*On the Explosion of homogeneous gaseous Mixtures*“ in *Min. of Proc. Institution of C. Engineers* 1882 und 1886.

reichte Temperatur betrug gewöhnlich nur etwas mehr als die Hälfte jener Temperatur, welche der augenblicklichen vollkommenen Verbrennung entspricht.

Bei der besten Mischung von Leuchtgas und Luft im Verhältnisse 1 : 6 bis 1 : 7 erreichte der Druck seinen höchsten Wert  $\frac{1}{20}$  Sekunde nach erfolgter Entzündung; die Temperatur betrug 1800° statt 3800° C, welche Temperatur bei momentaner vollständiger Wärmeentwicklung hätte erreicht werden müssen.

Bei der schwächsten Mischung wurde der höchste Druck ungefähr erst nach  $\frac{1}{2}$  Sekunde erreicht; die Temperatur betrug hierbei 800° statt 1800° C. Nachdem sich in diesem Falle der kühlende Einfluß der Wandungen infolge der langen Zeitdauer der Verbrennung schon während derselben fühlbar machte, dient der Vergleich dieser Temperaturen nicht mehr als ein Mittel zur genaueren Beurteilung des Grades der Vollkommenheit der Verbrennung.

Die meisten chemischen Verbindungen erzeugen während ihres Bildungsprozesses Wärme und man kann allgemein annehmen, daß jene Verbindung stabiler ist, deren Bildung mit größerer Wärmeentwicklung vor sich gegangen ist. Erhitzt man die Verbindung nach ihrer Bildung bis zu entsprechend hoher Temperatur, dann zerfallen im allgemeinen chemische Verbindungen wieder in ihre Bestandteile, sie zersetzen sich und dadurch kann nicht jene Verbrennungstemperatur erzielt werden, die der Mischung theoretisch entsprechen würde. Viele Verbindungen, welche durch entsprechend hohe Erhitzung zersetzt wurden, lassen sich durch darauf folgende, noch so langsame Abkühlung nicht zurückbilden; doch gibt es wieder Gase, welche sich nach erfolgter Zerlegung in ihre Bestandteile durch langsame Abkühlung aus der Vereinigung dieser wieder bilden. Man nennt diesen Prozeß Dissociation.

Die Dissociation ist eine Erscheinung, welche wohl genügend erklärt, jedoch nicht genügend erforscht ist, um über die dabei auftretenden Temperaturgrenzen übereinstimmend verlässliche Resultate zu erhalten. Das für die Verwendung der Gase als Krafterzeugungsmittel wichtige Resultat steht jedoch fest, daß die Dissociation den Verbrennungstemperaturen Grenzen zieht und die Erzielung von sonst erreichbaren Temperaturen verhindert.

Durch die während des ersten Stadiums der Explosion auftretenden hohen Temperaturen wird die Vereinigung von Gas und Luft, falls sie nicht vorher bereits erfolgt ist, verhindert, andererseits wird die bereits erfolgte Verbindung wieder zerlegt, bis die Temperatur während der Expansion und unter dem kühlenden Einfluß der Wandungen so weit gesunken ist, daß der Prozeß der Vereinigung wieder vor sich gehen kann.

Die höchsten Temperaturen, welche in Gasmaschinen auftreten, sind hoch genug, um auf diesem Wege die Erscheinung des Nachbrennens beziehungsweise der verzögerten Verbrennung erklären zu können.

Andererseits tritt jedoch diese Erscheinung gerade bei gasarmen Mischungen besonders hervor, obwohl hier die Maximaltemperaturen verhältnismäßig niedrig sind und somit der Effekt der Dissociation entsprechend gering ist.

Es erscheint daher wahrscheinlich, daß die Dissociation allein nicht die Hauptursache der verzögerten Verbrennung sein kann, sondern daß dieselbe auch auf die fortschreitende Verunreinigung der brennbaren Mischung durch die bereits verbrannten Partien derselben zurückzuführen ist. Ist die Mischung bereits zu Beginn der Verbrennung stark verunreinigt, indem sich dieselbe z. B. mit den im Kompressionsraume zurückgebliebenen Verbrennungsrückständen mischt, dann vollzieht sich der Verbrennungsprozeß schon von Anfang an verzögert.

Otto legte seiner Zeit großes Gewicht auf eine Schichtung der Gase im Cylinder und zwar derart, daß die gasreichen Partien der Ladung sich in der Nähe der Zündungsstelle, die durch größere Mengen von Rückständen oder Luft verdünnten, somit gasarmen Partien hingegen sich in der Nähe des Kolbens befinden. Man erblickte in dieser von Otto angestrebten Schichtung der Gase auch die Ursache der verzögerten Verbrennung der Ladung. Clerks Experimente haben jedoch diese Ansicht widerlegt, indem die von ihm benützten Mischungen, trotzdem dieselben genügend Zeit fanden, sich zu einer homogenen Masse zu mengen, in einzelnen Fällen sehr verzögert explodierten. Bei schwachen Mischungen ist es zweifelsohne vorteilhaft, in der Nähe des Entzündungsortes eine etwas gasreichere Mischung zu bekommen, um die Entzündung der ganzen Ladung zu beschleunigen; es ist dies aber auch der einzige Vorteil einer Schichtung der Gase, selbst wenn sich dieselbe praktisch durchführen ließe. Es ist andererseits klar, daß bei der gewöhnlichen Arbeitsweise einer Gasmaschine von einer allgemeinen Schichtung nicht die Rede sein kann, da in Anbetracht der außerordentlichen Geschwindigkeit, mit welcher die Gase in den Cylinder einströmen und der dadurch hervorgerufenen heftigen Bewegung derselben jede schichtenweise Lagerung im Cylinder ausgeschlossen erscheint, außer man sorgt durch eigene Vorrichtungen dafür, daß den Gasen bei ihrem Eintritte in den Cylinder die kinetische Energie dadurch benommen wird, daß man sie gleichsam für kurze Zeit zur Ruhe bringt. Solche Vorrichtungen verwendet man auch bei Zweitaktmaschinen, um zu verhindern, daß sich die frische Ladung mit den Verbrennungsprodukten der vorhergegangenen Explosion, ehe dieselben ausgespült sind, mische.

Der Gasverbrauch ist in erster Linie von der Größe der Maschine und der Art der Regulierung derselben abhängig; es lassen sich daher keine allgemein zutreffenden Werte angeben; es kann jedoch im großen Durchschnitte als feststehend angenommen werden, daß kleinere Maschinen bis etwa 10 PS 0,7 bis 0,6 cbm, mittelgroße Maschinen 0,6 bis 0,5 cbm und große Maschinen mit Leistungen von 50 PS und darüber 0,5 bis 0,45 cbm Leuchtgas (von 5000 W.E. durchschnittlichem Heizeffekte pro cbm) pro effektive Pferdekraft und Stunde verbrauchen; man ist jedoch auch bei besonders sorgfältiger Ausführung auf 0,40 cbm, in einzelnen Fällen auch noch unter diese Verbrauchsziffer gekommen. Diese Werte beziehen sich selbstverständlich auf den Gasverbrauch der vollbelasteten Maschine. Bei abnehmender Leistung der Maschine steigt der Gasverbrauch pro Leistungseinheit um so mehr, je mehr sich die Leistung der Leergangsarbeit nähert. Diese Steigerung ist abhängig von der Größe und Güte des Motors.

Der mechanische Wirkungsgrad, d. i. das Verhältnis der effektiven zur indizierten Arbeit der Maschine, schwankt natürlich innerhalb weiter Grenzen.

Die heutigen Leuchtgasmaschinen arbeiten fast ausschließlich im Viertakt mit einseitig offenen Cylindern, direkter Kupplung des Kolbens mit der Kurbel; durch den Entfall der getrennten Geradföhrung, sowie jeder Stoffbüchsenreibung, ist die Reibungsarbeit ohnedies auf ein möglichstes Maß reduziert. Die Summe der Reibungsarbeit und der Widerstandsarbeit der drei Arbeit verzehrenden Kolbenhübe des Viertaktes ist jedoch immerhin so groß, daß der mechanische Wirkungsgrad der Gasmaschine, namentlich bei nur teilweiser Belastung derselben, hinter jenem einer gleich leistungsfähigen Dampfmaschine, gute Ausführung in beiden Fällen vorausgesetzt, zurückbleibt.

Im Durchschnitte kann der mechanische Wirkungsgrad der normal belasteten Maschine mit 0,80 bis 0,82 angenommen werden und bleibt ziemlich konstant, wenn die Maschine um ungefähr 10 Prozent mehr oder weniger belastet wird. Bei einer Belastungsabnahme um 20, 40 und 60 Prozent nimmt der mechanische Wirkungsgrad größerer Maschinen durchschnittlich um 4, beziehungsweise 8 und 20 Prozent ab; bei kleineren Maschinen fällt er noch rascher ab, sobald die halbe Belastung derselben unterschritten wird.

Aus dem Gasverbrauche pro effektive PS-Stunde und dem mechanischen Wirkungsgrade ergibt sich der Gas- beziehungsweise Wärmeverbrauch pro indizierte PS-Stunde; derselbe beträgt unter obigen Voraussetzungen je nach der Größe der Maschine 2800 bis 2400, beziehungsweise 2400 bis 2000 und 2000 bis 1800 Wärmeeinheiten. Daraus resultiert ein thermischer Wirkungsgrad der Leuchtgasmaschine von 0,22 bis 0,35

und in Berücksichtigung des mechanischen Wirkungsgrades ein wirtschaftlicher Wirkungsgrad (d. i. das Verhältnis des Wärmewertes der effektiv erzeugten Arbeit zum Wärmewerte des hierzu verbrannten Brennstoffes) von 0,18 bis 0,28.

Vergleicht man die Ziffern mit jenen, welche an früherer Stelle (V. Abschnitt) für den wirtschaftlichen Wirkungsgrad der Dampfmaschine aufgestellt wurden, so erkennt man die außerordentliche Überlegenheit der Gasmaschine in wärmeökonomischer Hinsicht. Diese Überlegenheit ist einerseits durch das große Temperaturgefälle, andererseits durch den gänzlichen Entfall jeder äußeren Verbrennung und die verhältnismäßig hohe mittlere Temperatur der Arbeitssubstanz, bei welcher dieselbe durch ihre eigene Verbrennung Wärme aufnimmt, begründet.

Trotz dieser verhältnismäßig hohen Vollkommenheit der Gasmaschine gehen doch immerhin noch 72 bis 82 Prozent des dem Brennstoffe inwohnenden Arbeitsvermögens wirtschaftlich verloren, ein Resultat, welches allerdings im Vergleiche mit der Dampfmaschine als günstig zu bezeichnen, in Wirklichkeit jedoch sehr beklagenswert ist.

Forscht man nach den Ursachen, welche diese enormen Verluste an Wärme herbeiführen und welche zur Folge haben, daß in unseren heutigen Gasmaschinen im günstigsten Falle viermal so viel Gas verbraucht wird, als theoretisch erforderlich wäre\*), so findet man, daß abzüglich jener Wärme, welche für die Leergangsarbeit der belasteten Maschine erforderlich ist, der größte Teil in das Kühlwasser übergeführt, sowie mit den Abgasen abgeführt wird. Die Größe dieser Einzelverluste kann nur fallweise genau ermittelt werden und liegen derartige, bekannt gewordene Versuchsergebnisse in größerer Anzahl vor. Als roher Durchschnittswert kann der Wärmeverlust durch die in das Kühlwasser übergeführte Wärme mit 40 bis 45 Prozent, jener durch die mit den Abgasen abgeführten Wärme mit 30 bis 35 Prozent angenommen werden.

Der Verlust durch die in das Kühlwasser übergeführte Wärme ist einer der größten Mängel der Gasmaschine in ihrer heutigen Entwicklung. Die Wasserkühlung ist unbedingt notwendig, so lange Arbeitscyliner und Verbrennungsraum vereint sind; wäre eine Trennung derselben praktisch durchführbar, indem z. B. durch Einschaltung eines Luftpolsters die heißen Produkte der Verbrennung gehindert werden, die arbeitenden Oberflächen

\*) Eine Stundenpferdekraft ist gleich 270 000 mkg; die zur Erzeugung derselben erforderliche Wärmemenge =  $\frac{270\ 000}{427} = 632,3$  W.E. Nimmt man nun an, daß bei vollständiger Verbrennung 1 cbm Leuchtgas 5000, 1 cbm Mischgas 1100 bis 1300 und 1 cbm Gichtgas 750 bis 950 W.E. entwickelt, so ist theoretisch für die Stundenpferdekraft eine Gasmenge erforderlich von 0,126 cbm Leuchtgas, 0,575 bis 0,486 cbm Mischgas und 0,840 bis 0,665 cbm Gichtgas.

zu erreichen, dann könnte dieser Verlust vermindert, möglicherweise vermieden werden.

Sehr bedeutend sind ferner die Arbeitsverluste infolge der mit den Abgasen abgeführten Wärme.

Eine teilweise aber wirksame Abhilfe könnte durch Ausdehnung der Expansion, wie solche z. B. von Atkinson in seiner „Cycle“-Maschine durchgeführt wurde, geschaffen werden; bessere Resultate wären jedoch durch Anwendung eines Regenerators (siehe Abschnitt II) zu erzielen; obgleich mehrfache Versuche in dieser Richtung gemacht wurden, so ist doch die Regenerativgasmaschine ein heute noch ungelöstes Problem.

Aus dem vorstehenden geht wohl klar hervor, daß für die heutige Gasmaschine hinsichtlich Verbesserung des Wirkungsgrades noch ein sehr weites Feld offen steht, denn der wirklich erreichte Wirkungsgrad bleibt hinter dem theoretisch erreichbaren viel weiter zurück, als dies bei der älteren Wärmekraftmaschine, der Dampfmaschine, der Fall ist. Bei Bestimmung des idealen Maximalwertes kann als untere Temperaturgrenze die Temperatur der atmosphärischen Luft (17° C) und als obere Grenze 1600° C angenommen werden, welche Temperatur bei Verbrennung des Leuchtgases unter den in Gasmaschinen stattfindenden Verhältnissen nach übereinstimmenden Messungen erreicht wird. Wenn die gesamte Wärme bei dieser Temperatur aufgenommen würde, gäbe die Formel

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

das Maß dieses idealen Wirkungsgrades, welches unter der weiteren Voraussetzung, daß keine Abkühlungsverluste eintreten und der Kreisprozeß unter Anwendung eines Regenerators durchaus umkehrbar sei, erreicht werden könnte.

Für obige Temperaturen, also  $T_2 = 290^\circ$  und  $T_1 = 1873^\circ$  absolut, wird

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1} = 0,84.$$

Dieser ideale Wirkungsgrad würde jedoch einem Arbeitsprozesse entsprechen, bei welchem Gas und Luft vor Beginn der Verbrennung, sei es durch Kompression oder durch Benützung eines Regenerators, auf die höchste Temperatur des Prozesses gebracht wurden und während der Verbrennung jede Abkühlung ausgeschlossen ist. Dieser Prozeß würde somit eine Arbeitsweise voraussetzen, welche von jener der heutigen Gasmaschine vollkommen verschieden wäre, weil bei allen derzeit bestehenden Gasmaschinen die Wärmezufuhr von einer entsprechenden Temperaturerhöhung begleitet ist.

Um daher der Wirklichkeit näher zu kommen, sei jener Kreisprozeß als Basis für den idealen Wirkungsgrad einer Gasmaschine vorausgesetzt,

bei welchem die Verbrennung zwischen zwei bestimmten Temperaturen, einer niedrigeren Anfangs- und einer höheren Endtemperatur, stattfindet und der Arbeitsprozeß in jeder anderen Hinsicht umkehrbar sei. Sei daher  $T_0$  die Temperatur, bis zu welcher die Gase vor ihrer Entzündung erhitzt wurden,  $T_1$  die höchste Temperatur, bei welcher die Verbrennung beendet ist und  $T_2$  die untere Temperaturgrenze des Prozesses, dann ist nach früher die größte Arbeit, welche die Gewichts- und Volumeinheit der Arbeitssubstanz zu leisten vermag,

$$W = \int_{T_0}^{T_1} \frac{T_1 dH}{T} (T - T_2) = \sigma \int_{T_0}^{T_1} \frac{dT}{T} (T - T_2),$$

worin  $H$  die totale zugeführte Wärme,  $\sigma$  die spezifische Wärme bedeutet und vorausgesetzt wird, daß die spezifische Wärme während der Verbrennung ungeändert bleibt. Daraus folgt

$$W = \sigma (T_1 - T_0) - \sigma T_2 \log \frac{T_1}{T_0},$$

und der Wirkungsgrad

$$\frac{W}{\sigma (T_1 - T_0)} = 1 - \frac{T_2}{T_1 - T_0} \log \frac{T_1}{T_0}.$$

Setzt man hierin wie oben  $T_1 = 1873$ ,  $T_2 = 290$  und nimmt man  $T_0 = 600$  an, dann ergibt sich der ideale Wirkungsgrad mit rund 0,72.

Das beste bis heute erreichte Resultat zeigt, daß bei unseren modernen Gasmaschinen im günstigsten Falle ungefähr die Hälfte, zumeist jedoch nur ein Drittel dieses Wertes erreicht wird.

**Das Generator- oder Mischgas.** Wie bereits an früherer Stelle erwähnt, war das Bestreben der Gasmaschinenfabriken dahin gerichtet, die Gasmaschine durch Einführung eines wesentlich billigeren Kraftgases einerseits von den städtischen Gaswerken unabhängig, andererseits infolge der Verminderung der Betriebskosten, namentlich für größere Leistungen, konkurrenzfähig zu gestalten.

Das Generatorgas entsteht beim Durchströmen atmosphärischer Luft durch glühende Kohlen. Der sich hierbei vollziehende chemische Prozeß besteht in der Oxydation des Kohlenstoffes durch den Sauerstoff der Luft zu Kohlenoxyd, wobei der Stickstoff der Luft frei wird und neben dem Kohlenoxyd in dem Generatorgas enthalten ist. Dasselbe ist daher theoretisch ein Mischgas aus Kohlenoxyd und Stickstoff. In Wirklichkeit enthält dasselbe je nach der Herstellung auch noch gewisse Mengen von Kohlensäure, Wasserstoff und Methan.

Der Heizwert des Generatorgases hängt natürlich von der chemischen Zusammensetzung desselben, namentlich von dem Gehalte an

Wasserstoff beziehungsweise Kohlenoxyd ab, liegt jedoch zumeist für die hier in Betracht kommenden Gase zwischen 1100 bis 1300 W.E. pro cbm.

Das Gewicht eines cbm beträgt durchschnittlich 1,1 bis 1,2 kg (bezogen auf 0° und 760 mm).

Wie bereits erwähnt, gebührt Dowson das Verdienst, die Frage der Erzeugung eines billigeren Kraftgases in allgemein zufriedenstellender Weise gelöst zu haben; das mit dem Dowsonschen Generator erzeugte Halbwasser- oder Mischgas wird daher auch nach ihm zumeist Dowsongas genannt. Das Dowsongas wird durch Überleiten von Luft und Wasserdampf über glühende Kohlen erzeugt und besteht aus einem Gemisch von Wasserstoff, Kohlenoxyd, Stickstoff, etwas Kohlensäure und Sumpfgas, dessen durchschnittliche Zusammensetzung wie folgt angenommen werden kann:

Wasserstoff H . . . . .	18	Volumteile
Kohlenoxyd CO . . . . .	25	„
Stickstoff N . . . . .	48	„
Kohlensäure CO <sub>2</sub> . . . . .	7	„
Sumpfgas CH <sub>4</sub> . . . . .	2	„
	<hr/>	
	100	Volumteile.

Die Zusammensetzung wird durch den Gang der Erzeugung, sowie durch den Umstand mehr oder minder beeinflusst, ob zur Erzeugung des Gases Anthrazit oder Koks allein, oder eine Mischung beider Brennstoffe verwendet wird; es kommen daher wesentliche Schwankungen namentlich hinsichtlich des Gehaltes an Wasserstoff und Kohlenoxyd vor, während der Gehalt an Stickstoff ziemlich konstant bleibt. Außer obigen Gasen kommen auch ab und zu im Dowsongase kleine Mengen (Bruchteile eines Prozentes) von O und C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> vor.

In der Gasmotorenpraxis wird zumeist vorausgesetzt, daß ein Mischgas, dessen Wasserstoffgehalt größer ist wie jener an Kohlenoxyd, einen entsprechend höheren Heizwert besitze; dem ist aber nicht so. Wasserstoff entwickelt bei seiner Verbrennung pro Gewichtseinheit allerdings eine viel größere Wärme als irgend eine andere brennbare Substanz; dem Volumen nach entwickelt jedoch Kohlenoxydgas sogar etwas mehr Wärme als Wasserstoff.

Wasserstoff entwickelt bei der Verbrennung pro Gewichtseinheit bekanntlich 34170 W.E.; hiervon kommt jedoch jene Wärme in Abzug, welche bei der Verbrennung des Wasserstoffes zur Dampfbildung verzehrt wird; diese Wärmemenge beträgt pro Gewichtseinheit verbrannten Wasserstoffes 5733 W.E., sodaß der wirkliche Heizwert des Wasserstoffes mit 28437 W.E. angenommen werden muß.



28437 W.E. ist somit die durch Verbrennung von Wasserstoff für Zwecke der Gasmaschine verfügbare Wärme.

Eine Gewichtseinheit Kohlenoxyd entwickelt bei ihrer Verbrennung 2400 W.E.; da nun eine Volumseinheit Kohlenoxyd 14 mal so viel wiegt als eine Volumseinheit Wasserstoff, so ist diese Gewichts-differenz maßgebend für den Vergleich der pro Volumseinheit Wasserstoff und Kohlenoxyd entwickelten Wärme. Die Wärmewerte verhalten sich daher wie  $14 \times 2400 = 33600$  zu 28437; es entwickelt somit die Volumseinheit Kohlenoxyd 1,18 mal so viel Wärme bei der Verbrennung als Wasserstoff. Der Heizwert dieser beiden Gase kann daher bei Bestimmung des Heizwertes eines Kraftgases als nahezu gleich groß angenommen werden und es ist daher die Summe der Volumen dieser beiden Gase, nicht aber das Einzelvolumen derselben für den Heizwert eines Gases ausschlaggebend.

Wenn daher auch das Dowsongas eine verschiedenartige Zusammensetzung besitzt, z. B. 18,2 Volumteile CO bei 26,55 Volumteilen H, oder 25,07 Volumteilen CO bei 18,73 Volumteilen H etc., so ist doch das summarische Volumen dieser beiden brennbaren Gase nahezu gleich groß und beträgt 44,75 bzw. 43,60 Prozent des Gesamtvolumens. Das prozentuelle Verhältnis dieses Volumens zweier verschiedener Gase gibt zugleich angenähert das Verhältnis des Heizwertes derselben.

Der Wirkungsgrad des Gasgenerators wird gewöhnlich mit 75 Prozent angenommen, d. h. das mit demselben erzeugte Kraftgas gibt bei seiner Verbrennung 75 Prozent jener Wärmemenge, welche das hierzu verbrauchte Originalbrennmateriel bei vollständiger Verbrennung entwickelt hätte. Der Brennstoff wird im Generator bis auf den Aschengehalt in Gas verwandelt, die Ausnützung desselben ist daher sehr günstig und wird der Wirkungsgrad von einzelnen Firmen sogar mit 80 bis 82 Prozent angegeben. Würde die Analyse des Gases genau jene Zusammensetzung desselben ergeben, welche das Gas bei seinem Austritte aus dem eigentlichen Generator besitzt, dann könnte der Wirkungsgrad durch eine Analyse auch genau bestimmt werden; da das Gas auf seinem Wege vom Erzeuger zum Gasbehälter jedoch den Scrubber und Kühler passieren muß und hierbei Kohlensäure und Wasserdampf verliert, so ist es unmöglich, den Wirkungsgrad der Anlage aus der Analyse des Gases mit voller Genauigkeit zu bestimmen.

Das Dowsongas brennt mit nicht leuchtender blauer Farbe, ohne jeden Rauch oder belästigenden Geruch. Das aus Koks hergestellte Gas ist nahezu geruchlos, während das aus Anthrazit erzeugte Gas infolge des nie fehlenden Schwefeleisengehaltes der Anthrazite einen deutlichen Geruch besitzt. Das Gas ist infolge des großen Gehaltes an Kohlenoxyd in hohem Maße giftig; da es hierbei farb- und nahezu geruchlos ist, so ist die Ge-

fahr einer Vergiftung in weit höherem Grade vorhanden als bei dem sich durch seinen penetranten Geruch verratenden Leuchtgas. Man hat daher empfohlen und auch Versuche gemacht, dem Gase künstlich einen leicht erkennbaren Geruch zu geben.

Dowsongas der gewöhnlichen Zusammensetzung erfordert zu seiner vollständigen Verbrennung durchschnittlich 0,24 cbm Sauerstoff oder 1,13 cbm atmosphärische Luft pro cbm Gas, d. h. mit anderen Worten, das Dowsongas benötigt zu seiner Verbrennung etwas mehr als sein eigenes Volumen Luft.

Bei der großen Verschiedenheit der chemischen Zusammensetzung städtischer Leuchtgase ist auch die zur vollständigen Verbrennung derselben erforderliche Luftmenge sehr verschieden und liegt zwischen dem 5,2- bis 7,4-fachen Volumen des Gases. Da der Heizwert des Generatorgases (Dowsongas) 1100 bis 1300 W.E., jener des Leuchtgases durchschnittlich 5000 W.E. pro cbm beträgt, also die Volumeneinheit Leuchtgas 4 bis  $4\frac{1}{2}$  mal soviel Wärme bei der Verbrennung entwickelt als Dowsongas, so wird auch für dieselbe Leistung ungefähr 4 bis  $4\frac{1}{2}$  mal soviel Generatorgas benötigt. Die an früherer Stelle besprochene doppeltwirkende Zweitaktmaschine von Körting verbrauchte anlässlich der Versuche loco Fabrik bei einer Leistung von 544 PS<sub>e</sub> bzw. 341,5 PS<sub>e</sub> 1,635 cbm Generatorgas (von im Mittel 1200 W.E. pro cbm) pro indizierte bzw. 2,60 cbm pro effektive Pferdekraftstunde; bei nur halber Belastung stieg der Verbrauch auf 3,15 cbm pro PS<sub>e</sub>-Stunde. Der thermische Wirkungsgrad betrug somit 0,379, der wirtschaftliche Wirkungsgrad 0,238.

Da man mit 1 kg reinen Brennstoffes (trockene Anthrazitkohle oder Koks) von mindestens 7500 bzw. 7000 W.E. zumeist 5,2 bis 4,5 cbm Gas erzeugt, die Maschinen durchschnittlich 2,2 bis 2,8 cbm Generatorgas pro PS<sub>e</sub>-Stunde verbrauchen, so ergibt sich ein durchschnittlicher Verbrauch an Anthrazit bzw. Koks pro effektive Pferdekraftstunde von 0,4 bis 0,6 bzw. 0,6 bis 0,8 kg. Es sind dies selbstverständlich nur Mittelwerte, da genaue Werte auch eine genaue Kenntnis des Heizwertes des verwendeten Gases, der Größe und Eigenart der Maschine erfordern. So garantiert z. B. die Motorenfabrik Gebrüder Körting bereits bei Maschinen von etwa 40 PS aufwärts einen Verbrauch von 0,7 kg Koks pro PS<sub>e</sub>-Stunde, erreicht jedoch unter normalen Betriebsverhältnissen eine noch wesentlich geringere Verbrauchsziffer von 0,45 bis 0,5 kg. Die Skodawerke in Pilsen sowie die Vereinigte Maschinenfabrik Nürnberg-Augsburg geben den Verbrauch an Koks ihrer Generatorgasmaschinen mit 0,5 bis 0,6 kg, jenen an Anthrazit mit 0,4 bis 0,5 kg pro PS<sub>e</sub>-Stunde an. Die Filiale der Deutzer Gasmotorenfabrik Langen & Wolf in Wien garantieren bei ihren Maschinen mit Sauggasgeneratoren pro PS<sub>e</sub>-Stunde 1 kg Koks oder 0,6 kg Anthrazit u. s. f.

Diese äußerst günstigen Brennstoffverbrauchsfiguren sind einerseits eine Folge der heutigen hochvollendeten Konstruktion der Gasmaschine und deren Regulierung im allgemeinen, andererseits sind sie in dem Umstande begründet, daß man namentlich bei wasserstoffärmeren Halbwassergasen und verstärkter Kühlung des Verbrennungsraumes mit der Kompression ohne Gefahr der Vorzündung höher hinaufgehen kann als bei Leuchtgas (siehe z. B. die Diagramme Fig. 257 und 258) und daß infolge der geringeren Verbrennungstemperatur auch ein geringerer Teil der Wärme in das Kühlwasser übergeführt wird. Bei einem Vergleiche hinsichtlich des thermischen Wirkungsgrades mit der Leuchtgasmaschine darf eben nicht übersehen werden, daß in obigen Verbrauchsziffern festen Brennstoffes auch der 25-prozentige Verlust an Wärme durch den Generator, dessen Wirkungsgrad jenem einer guten Kesselanlage gleichkommt, enthalten ist, während sich die Verbrauchsziffern an Leuchtgas auf die dem Arbeitszylinder direkt zugeführte Wärmemenge beziehen. Der thermische Wirkungsgrad der Generatorgasmaschine als solcher ist daher trotz des bedeutend wärmeärmeren Gases zumeist größer als jener der Leuchtgasmaschine gleicher Leistungsfähigkeit.

Vergleicht man vorstehende Verbrauchsziffern an festen Brennstoffen mit jenen gleich leistungsfähiger Dampfmaschinen (man kann im allgemeinen annehmen, daß mittelgroße Dampfmaschinen zweimal, kleinere Maschinen drei- bis viermal soviel Brennstoff gleicher Qualität benötigen als Gasmaschinen gleicher Leistungsfähigkeit), so erkennt man sofort die bedeutende Überlegenheit der Generatorgasmaschine hinsichtlich der Ökonomie des Betriebes; berücksichtigt man außerdem, daß eine größere Kesselanlage mehr und teurere Bedienung erfordert als eine Generatoranlage gleicher maschineller Leistung, so ist wohl klar, daß heutigen Tages namentlich für mittlere Leistungen zwischen 20 und 100 PS, in vielen Fällen auch für wesentlich größere Leistungen, die Gasmaschine der Dampfmaschine vorgezogen wird.

Was nun die Apparate zur Erzeugung des Generatorgases betrifft, so besteht heute bereits eine Reihe von verschiedenartigen Konstruktionen. Infolge der großen Konkurrenz strebt natürlich jedermann darnach, die Kraftgasanlage möglichst einfach und billig herzustellen und es werden daher die Apparate auch zumeist nur so groß als unbedingt nötig genommen, ja es kommt sogar nicht selten vor, daß Apparate geliefert werden, welche jenen Funktionen, welche sie ihrer Bezeichnung nach erfüllen sollten, nicht genügen.

Eine andere Klage, die man häufig hört, ist die, daß die Gase nicht genügend gereinigt der Maschine zugeführt werden, also die Reinigungs-

vorrichtungen vielfach unzureichend sind, daher die Rohrleitungen und Maschinen stark verschmutzt werden und einer häufigen Reinigung bedürfen. Der Schmutz setzt sich aber nicht nur in den Ventilen fest und verhindert dadurch den guten Gang der Maschine, sondern er gelangt auch in den Cylinder, verursacht eine schnellere Abnutzung der Laufflächen und damit Undichtheit der Kolben, Belästigung und Schädigung der Bedienungsmannschaft; gleichzeitig sinkt damit aber auch die Ökonomie des Betriebes entsprechend den Gasverlusten.

Es empfiehlt sich daher, bei der Anlage eines Gasgenerators nicht den Kostenpreis, sondern die Güte desselben in erster Linie in Betracht zu ziehen.

Die Gasgeneratorapparate lassen sich im allgemeinen in zwei Gruppen teilen: in solche, welche mit Überdruck und in solche, welche mit Unterdruck arbeiten; erstere führen das Gas der Maschine unter Druck zu, bei letzteren saugt die Maschine das Gas aus dem Generator. Man nennt daher die Apparate der ersteren Art **Druckgeneratoren**, jene der zweiten Art **Sauggeneratoren**.

Der bekannteste und verbreitetste Druckgenerator ist jener von Dowson; die allgemeine Anordnung dieses Apparates ist durch Fig. 276 dargestellt.

Der **Dowsongasapparat** besteht der Hauptsache nach aus einem kleinen Dampfkessel zur Erzeugung überhitzten Wasserdampfes, einem mit feuerfesten Steinen ausgefütterten cylindrischen Schachtofen (dem eigentlichen Generator), in welchen ein Dampfstrahlgebläse Luft mit Dampf gemischt bläst; der sogenannten Hydraulik oder Vorlage, d. i. ein Wasserabschluß des Gasableitungsrohres; einem mit Koks gefüllten Reiniger, in welchem dem von unten eintretenden und nach oben abziehenden Gase rieselndes Wasser entgegenströmt (dem sogenannten Scrubber) und einem Gasometer mit schmiedeeisernem Bassin, welcher mit dem Dampfstrahlgebläse derart in Verbindung steht, daß er die Dampfzuführung zu diesem insofern regelt, daß sich Gaserzeugung und Gasentnahme das Gleichgewicht halten.

Der Dampfkessel kann mit jedem Brennmaterial beschildet werden, doch eignet sich Gaskoks hierzu am besten. Die zum Betriebe erforderliche Dampfspannung beträgt  $2\frac{1}{2}$  bis 3 Atm. bei kleineren Apparaten und 3 bis  $3\frac{1}{2}$  Atm. für größere Apparate bzw. Betriebe über etwa 20 PS. Der Dampf wird auf 180 bis 200° C, am Injektor gemessen, überhitzt. Der Kessel benötigt bei genügenden Abmessungen im Dauerbetriebe ungefähr 9—10% der gesammten Brennstoffmenge. Man kann, wie dies zum Beispiel bei den von Gebr. Körting gebauten Generatoren der Fall ist, die Wärme des abziehenden Gases zur Vorwärmung der Verbrennungsluft ausnützen, wodurch der Wärmeverlust durch den Dampfkessel durch

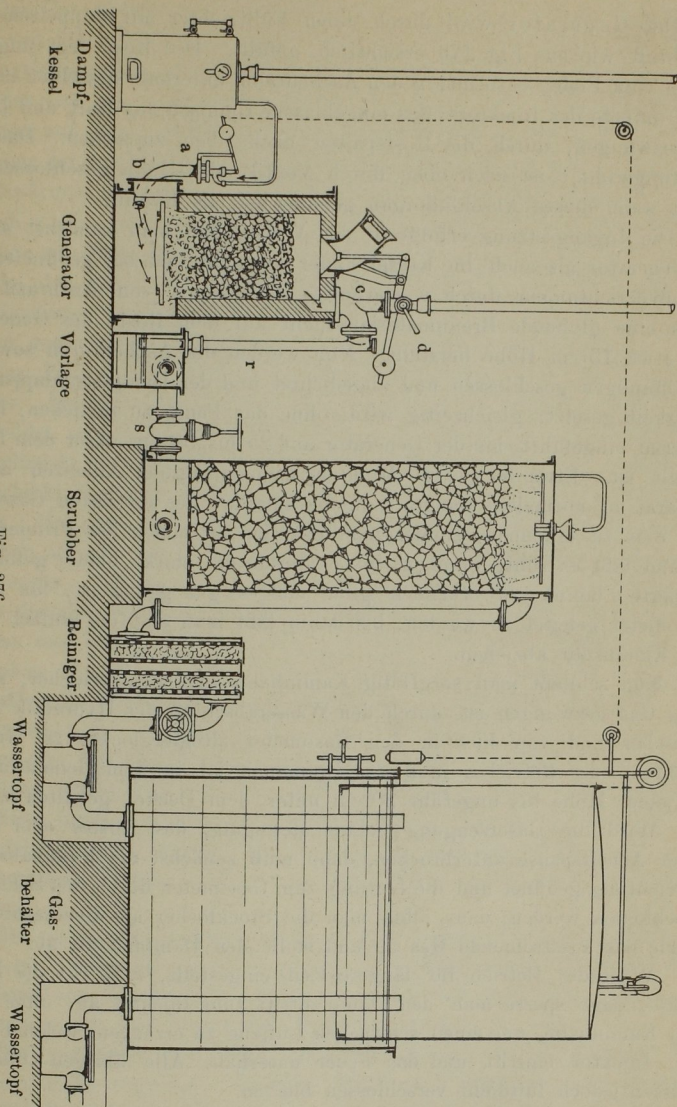


Fig. 276.

Wiedergewinnung der Wärme in der Verbrennungsluft ausgeglichen wird, so daß in bezug auf Brennstoffausnützung die Druckgasanlage der Sauggasanlage gegenüber nicht im Nachteile ist.

Der Generator wird durch einen Fülltrichter mit doppeltem Gasverschluß, wie aus Fig. 276 ersichtlich, gefüllt. Der Rost liegt ungefähr 30 cm vom Boden entfernt; in den Aschenraum unterhalb desselben mündet die Trompete des Injektors; das eingeblasene Gemisch aus Luft und Dampf ist gezwungen, durch die Rostspalten nach oben zu ziehen. Das Gasableitungsrohr *c* ist nach oben durch Ventil oder Hahn geschlossen und dient, wenn dieses Abschlußorgan geöffnet ist, als Kamin.

Die Ingangsetzung erfolgt in der Weise, daß man zunächst sowohl im Generator als auch im Kessel Feuer anmacht und bei geöffneten Abschlußvorrichtungen durch wiederholtes Aufbringen von Anthrazit oder Koks eine glühende Brennmaterialschicht auf dem Roste des Generators von etwa 15 cm Höhe herstellt. Nun werden die Aschentüren sowie die Füllöffnungen geschlossen und abgedichtet und der Dampfstrahlapparat in Tätigkeit gesetzt; gleichzeitig wird, ohne das Feuer zu ersticken, Brennmaterial eingeführt, bis der Generator auf 25 bis 30 cm unter dem Deckel gefüllt ist. Etwa 30 bis 40 Minuten nach erfolgtem Anheizen ist der Apparat in normalem Gange, d. h. die Qualität des erzeugten Gases gut. Um dies zu erkennen, zündet man das Gas an einem der Probierlöcher an und läßt es ruhig brennen, bis es durch die starke blaue, gelblichrot tingierte Flamme zu erkennen gibt, daß es gut genug ist, um in den Gasometer geleitet zu werden; bis dahin läßt man das Gas einfach durch das Kaminrohr abziehen.

Nun schließt man sorgfältig Kaminhahn und Probierlöcher, so daß alles Gas gezwungen ist, durch den Wasserabschluß der Hydraulik in den Scrubber und von hier in den Gasometer (Reglerglocke) zu strömen. Während des Betriebes muß das Brennmaterial in dem Generator stets auf einer Höhe bis ungefähr 20 cm unter dem Deckel gehalten werden.

Wird die Gaserzeugung behufs Reinigung des Rostes oder wegen einer Arbeitspause unterbrochen, dann muß zunächst die Kaminabschlußvorrichtung geöffnet und die Leitung zum Gasometer durch den Schieber *S* geschlossen werden; dann öffne man die Stocklöcher am Generatordeckel, zünde das ausströmende Gas an und stelle den Dampfzutritt ab.

Wird der Betrieb für längere Zeit eingestellt, z. B. für die Nachtpause, dann sperre man den Dampfzutritt zum Injektor ab, öffne etwas den Kaminhahn, um einen schwachen Luftzug zu erzeugen, welcher durch den Injektor eintritt und das Feuer unterhält. Alle übrigen Öffnungen müssen jedoch luftdicht verschlossen bleiben.

Der Generator kann, je nach dem Aschengehalte des Brennmaterials, 6 bis 14 Tage ununterbrochen betrieben werden, bevor man das Feuer auszuziehen braucht, um die sich im Generatorschacht angesetzte Schlacke entfernen zu können.

Das Gas verläßt den Generator am oberen Ende mit einer Temperatur von 500—700° C; es liegt daher nahe, diese Wärme, welche bei älteren Generatoren unbenutzt wegging, noch nutzbringend zu verwerten, weil das Gas ja ohnehin abgekühlt werden muß. Gebr. Körting leiten die Gase auf ihrem Wege zum Reiniger durch einen Vorwärmer zur Erwärmung der zur Vergasung dienenden Luftmenge und durch einen zweiten zur Erwärmung des Kesselspeisewassers. Die vorhandene Gaswärme wird dadurch wieder nutzbar gemacht und es entstehen daher wesentliche Ersparnisse an Brennstoff.

Bei den später besprochenen Sauggeneratoren wird die Wärme der den Generator verlassenden Gase zur Heizung des Kessels ausgenützt, welcher somit zwischen Generator und Reiniger eingeschaltet ist.

Zur Reinigung des Gases dienen Koksscrubber und Sägespäne-reiniger. Der Scrubber, dessen unterer Teil als Vorlage oder Vorwascher ausgebildet sein kann, wodurch die getrennte Vorlage erspart wird, ist ein cylindrisches Gefäß aus Blech, in welchem auf einem Roste eine Koksschicht liegt; diese wird berieselt, während von unten das Gas einströmt. Bei ganz reinem Anthrazit genügt die Reinigung durch diesen Scrubber allein. Hinter demselben befindet sich gewöhnlich ein Sägespäne-reiniger. Dieser ist aus Eisenblech hergestellt, ca. 1 m hoch; im Innern desselben sind auf Holzgittern Sägespäne ausgebreitet, durch welche das Gas von unten nach oben strömt. Etwa alle vier Wochen sind die Sägespäne zu ersetzen. Die Reiniger sind aus diesem Grunde mit einer Umlaufleitung versehen, sodaß während der Reinigung der Betrieb nicht unterbrochen zu werden braucht. Die Reinigung ist somit nur eine mechanische von Staub, Flugasche etc.; eine chemische Reinigung, wie bei Leuchtgas erforderlich, ist hier nicht notwendig, da das aus Anthrazit oder Koks hergestellte Gas teerfrei ist und nur sehr geringe Mengen von Schwefelwasserstoff besitzt, die größtenteils von dem Reinigungswasser aufgenommen werden. Das Gas kann daher auch sofort verwendet werden.

Der im Scrubber enthaltene Koks muß je nach der Art des Betriebes alle 6 bis 12 Monate gereinigt werden. Vor Öffnung des Scrubbers muß das Feuer aus dem Generatorschacht gezogen und ausgelöscht, sowie die Verbindung mit dem Gasometer abgesperrt werden.

Das gereinigte Gas wird dem Gasometer beziehungsweise der Reglerglocke zugeführt. Dieselbe taucht in Wasser, das sich in einem Unterbehälter befindet. Die Glocke wird durch das einströmende Gas gehoben. Durch Belastung oder Entlastung derselben wird der Gasdruck geregelt. Die Größe ist so bemessen, daß sie den zeitweilig sinkenden oder steigenden Gasverbrauch ausgleicht; ein Aufsichern von Gas ist

nicht beabsichtigt und auch nicht empfehlenswert, sofern nicht andere technische Zwecke nebenbei erreicht werden sollen. Das Auf- und Absteigen der Reglerglocke wird zur Regelung der Gaserzeugung benutzt, indem mittels Kettenzügen ein Drosselventil in der Dampfleitung zum Gebläse geöffnet oder geschlossen wird.

Eine der Hauptannehmlichkeiten der Druckgasgeneratoren ist der Umstand, daß der Prozeß ununterbrochen fortläuft und nur einer geringen und nicht besonders geschulten Wartung bedarf. Als ein Nachteil derselben wird der Umstand angesehen, daß die ganze Anlage unter Druck steht, also auch der Dampfkessel höher gespannten Dampf erzeugen, daher eigens gefeuert werden muß, während bei den Sauggasgeneratoren, welche unter Minusdruck stehend stets soviel Gas erzeugen, als bei jedem Arbeitssaughub von der Maschine gefordert wird, der Kessel durch die vom Generator abgesaugten heißen Gase selbst geheizt werden kann.

Nachdem der Gasometer bei einer Sauggeneratoranlage entfällt, auch der Dampfkessel leichter gebaut sein kann, so wird die Anlage einfacher, somit billiger und beansprucht auch weniger Raum. Der Betrieb wird jedoch infolge der unvermeidlichen Druckschwankungen und Schwankungen in der Zusammensetzung des Gases weniger gleichmäßig sein als der Betrieb durch Druckgeneratoren, andererseits sind Undichtheiten der Apparate viel nachteiliger und gefährlicher, da durch dieselben Luft in den Apparat gesaugt wird.

Die Sauggeneratoren werden meist nur für kleinere Leistungen bis etwa 50 PS mit Vorteil benützt werden können; für größere Leistungen spielt der etwas geringere Anschaffungspreis, sowie die Raumfrage keine so ausschlaggebende Rolle wie bei kleinen Anlagen, die meist auch mit Raummangel zu kämpfen haben. Die Sauggeneratoren sind ja tatsächlich aus dem Bestreben entstanden, die unbestrittenen Vorteile des Generatorgasbetriebes dem Gewerbetreibenden und Kleinindustriellen zugute kommen zu lassen.

Der im vorstehenden beschriebene Dowsongasapparat zeigt in seiner vollständigen Gliederung die Einrichtung solcher Apparate im allgemeinen; in baulicher Beziehung findet man jedoch wesentliche Vereinfachungen, welche einerseits eine mögliche Herabminderung aller Wärmeverluste, also eine noch weitergehende Ausnützung des Brennstoffes, andererseits eine Reduktion des Preises und Raumbedürfnisses des Gaserzeugers bezwecken. Eine derartige Vereinfachung des Dowsonapparates besteht z. B. darin, daß Scrubber und Gasometer vereint sind, indem der Scrubber direkt im Unterbehälter des Gasometers steht, die aus demselben aufsteigenden gereinigten Gase daher direkt die Reglerglocke füllen. Diese



Anordnung entbehrt des Sägespäanreinigers, ist daher nur für sehr reines Brennmaterial brauchbar\*).

Die Sauggasgeneratoren sind ein Fortschritt auf dem Gebiete des Wärmemotorenbaues, welcher der jüngsten Zeit angehört.

Die Idee, das Gas durch den Gasmotor selber zu erzeugen, beziehungsweise die Luft durch den Generator zu saugen, ist nicht mehr neu, indem bereits im Jahre 1895 ein diesbezügliches Patent bestand. Dieses Patent hat den interessierten Firmen Veranlassung zu eingehenden Versuchen gegeben, die jedoch alle ein negatives Resultat ergaben, und dies mag wohl auch die Veranlassung gewesen sein, das Patent fallen zu lassen. Die Gasmotorenfabriken waren infolge dieser Versuche der Ansicht, daß derartige Sauggasgeneratoren nicht vorteilhaft und mit der wünschenswerten Sicherheit wirken. Seit jener Zeit sind jedoch die Mängel, welche den ersten Apparaten anhafteten, durch rationellere Konstruktion der Einzelheiten derselben behoben, sodaß derartige Anlagen heute bereits vielfach in Betrieb stehen und zufriedenstellend funktionieren. Eine Reihe solcher Apparate französischer Firmen, als M. Taylor & Cie. in Paris, Société anonyme des moteurs thermiques Gardie in Nantes, L. Guénot in Paris, Compagnie „Duplex“ in Paris etc. waren, allerdings ohne Motoren, auf der Weltausstellung in Paris ausgestellt. Einige dieser Apparate sind in der *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure* 1901 beschrieben.

Einer der beliebtesten Sauggasgeneratoren ist jener von Taylor. Dieser Apparat ist in Fig. 277 (S. 714) abgebildet.

Der Taylorsche Generator besteht der Hauptsache nach aus dem eigentlichen Generator *A*, dem kleinen Dampfkessel *B*, dem Reiniger *C* und dem Absaugekessel *D*, an welchen direkt das Gassaugrohr der Maschine *E* anschließt.

Das zur Verwendung kommende Gas wird im Generator durch Einsaugen eines Dampfluftgemisches erzeugt und aus Koks oder Anthrazit, oder einem Gemenge beider Brennstoffe gewonnen. Die Saugwirkung bildet der Motor selbst; in jeder Arbeitsperiode erzeugt sich mithin der Motor selbsttätig die erforderliche Gasmenge, wobei das Dampfluftgemenge ohne besondere Feuerung entsteht, indem die Wärme des vom Generator abziehenden Gases das Wasser verdampft. Der Verdampfer ist entweder wie in Fig. 277 vom Generator getrennt angeordnet oder es ist der Deckel des Generators direkt als Wasserverdampfer ausgebildet.

Nach längeren Betriebspausen oder bei Inangsetzung des kalten Apparates muß die Glut durch ein dem Generator beigegebenes kleines Handgebläse (von Hand aus gedrehter Ventilator) angefacht beziehungs-

\*) Siehe D. Clerk, *The Gas-Engine*, S. 360.

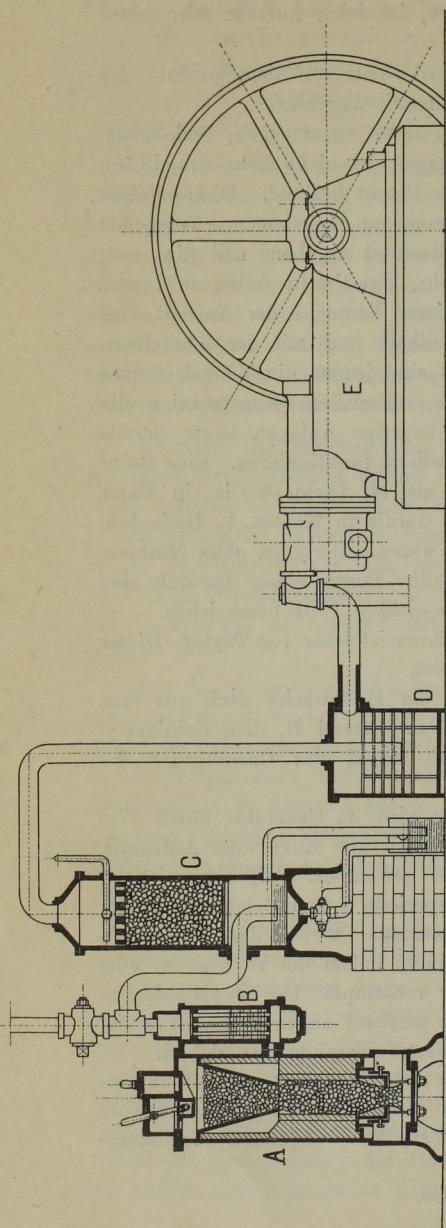


Fig. 277.

weise erzeugt werden, wozu 12 bis 15 Minuten erforderlich sind. Erst bis das Feuer zur Hochglut angeblasen ist, kann der Generator vollkommen beschickt werden. Wenn das Gas die richtige Qualität hat, dann muß es entzündet mit langer orangeroter Flamme brennen. Die Reinigung des Gases erfolgt in gleicher oder ähnlicher Weise wie bei Druckgeneratoren, wie überhaupt ein grundsätzlicher Unterschied zwischen Sauggas- und Druckgasanlagen hinsichtlich des Zweckes, der Einrichtung sowie der Abmessungen der einzelnen Teile nicht erkennbar ist.

Auf eine Beschreibung anderer Gasapparate sei hier nicht weiter eingegangen, weil sich dieselben nicht hinsichtlich des Arbeitsprinzips sondern nur hinsichtlich der gegenseitigen Lage und Anordnung der einzelnen Teile, also nur in konstruktiver Beziehung, von dem Taylorschen Apparate unterscheiden.

Die Bestrebungen, billigere Brennmaterialien zur Erzeugung von Kraftgasen zu verwenden, waren bisher von keinem bedeutsamen Erfolge begleitet.

Generatoranlagen zur Erzeugung von Holzgas für motorische Zwecke sind in neuester Zeit speziell in Frankreich vielfach ausgeführt worden. Der Generator Riché, nach seinem Erfinder benannt, besteht dem Wesen nach aus einem gemauerten mit Feuerungsraum versehenen Ofen, auf dessen Rost

durch Kohle, Holzabfälle u. dergl. ein lebhaftes Feuer unterhalten wird. Die Heizgase treten durch horizontale Kanäle in vertikale Schächte, in welchen gußeiserne, mit Holzstücken angefüllte Retorten aufgestellt sind; der untere Teil derselben, gegen welchen die horizontalen Kanäle münden, wird auf einer Temperatur von ungefähr 900° C erhalten; die Temperatur der Retorten kann von außen beobachtet werden. Die im oberen Teile der Retorte überdestillierten Gase bestehen im Mittel aus 20% Kohlen-säure, 20% Kohlenoxyd, 15% Kohlenwasserstoff und 45% Wasserstoff; sie treten in einen Wascher und von diesem in den Gasbehälter.

Der Heizwert des Gases beträgt im Mittel 3100 W.E. pro cbm. Versuche ergaben bei der Destillation von 1,4 kg Holz mit 0,56 kg Steinkohle mittlerer Güte im normalen Betriebe 1 cbm Gas von 3000 W.E. und mindestens 0,26 kg guter Holzkohle als Nebenprodukt. Wendet man statt Steinkohle zur Heizung Holz an, dann sind obige 0,56 kg Kohle durch 1,2 bis 1,6 kg Holz oder Holzabfälle zu ersetzen.

Es ergibt sich daraus ein totaler Holzverbrauch von 3 kg pro Pferdekraftstunde, wenn man den stündlichen Gasverbrauch pro Leistungseinheit mit 1 cbm annimmt. Außerdem gewinnt man 0,26 kg Holzkohle.

Eine derartige Holzgasanlage befindet sich u. a. in der Gasfabrik zu St. Gobain, wo durch 12 Retorten von 2650 mm Höhe und 250 mm Durchmesser Gas für zwei Motoren von je 25 PS erzeugt wird. Die Elektrizitätswerke in Pierrelatte und Champagnole sind ebenfalls mit Holzgasmotoren ausgerüstet. Die Motoren verbrauchen je nach ihrer Größe 0,9 bis 1,2 cbm Holzgas pro PS<sub>e</sub>-Stunde. Die Kosten einer Pferdekraft stellen sich angeblich auf 2,4 bis 4,8 Pfennig. Auf der Pariser Ausstellung 1900 war ein 8 PS-Viertaktmotor, zu dessen Speisung Holzgas aus einem Generator Riché mit zwei Retorten obiger Abmessungen diente, ausgestellt\*).

Ein anderes, vielversprechendes Verfahren der Verwertung billiger Kleinkohle zur Erzeugung eines für den Maschinenbetrieb geeigneten Gases ist das Verfahren von Dr. Ludwig Mond; das auf diesem Wege hergestellte Kraftgas wird daher Mondgas genannt\*\*).

Die Schwierigkeit der Herstellung eines dem Dowsongas entsprechenden Kraftgases aus bituminöser Kleinkohle liegt einerseits in der zu leicht eintretenden Verstopfung der Gaserzeuger, andererseits in der Abscheidung von Teer. Diese Schwierigkeiten überwindet Mond dadurch, daß er einerseits die entstehenden Teerdämpfe im Ofen selbst fast vollständig verbrennt und andererseits die Vergasung bei sehr niedriger

\*) Eine Skizze dieses Generators siehe: *Z. d. Ver. deutscher Ing.* 1901, S. 331.

\*\*\*) Über dieses Gas berichtet ausführlich Prof. Schöttler in der *Zeitschr. des Ver. deutscher Ing.* 1901, S. 1593.

Temperatur vollzieht, indem er nebst Dampf einen Teil der Abgase der Maschine in den Ofen bläst oder große Dampfmenngen in denselben einführt. Durch sinnreichen Wärmeaustausch in umfangreichen Vorrichtungen vermeidet Mond die zu befürchtenden großen Wärmeverluste; die Kosten der Erzeugung werden durch Gewinnung von Sulfat aus dem sich entwickelnden Ammoniak herabgedrückt.

Das Mondsche Verfahren ist nur für große Anlagen vorteilhaft durchzuführen; für kleineren Kraftbedarf ist dasselbe nicht geeignet, daher auch nicht berufen, mit dem Dowsongas für Leistungen von 20 bis 100 PS in einen Wettbewerb zu treten. Eine große Anlage dieser Art besteht schon seit längerer Zeit in der chemischen Fabrik von Brunner, Mond & Cie. zu Winnington Works in Northwick und soll gute Erfolge nachweisen; in neuerer Zeit sind weitere Anlagen errichtet worden u. a. für die Gasmaschinenfabrik von Crossley Brothers bei Manchester sowie für die Premier Gas Engine Works bei Nottingham.

Nach den Berichten Humphreys in der Institution of Civil Engineers 1897 und in der Society of Mechanical Engineers 1901 besteht das trockene Mondgas, in Raumteilen ausgedrückt, aus

26,4 %	Wasserstoff,
10,2 „	Kohlenoxyd,
16,2 „	Kohlensäure,
44,6 „	Stickstoff und
2,5 „	Sumpfgas

und wiegt bei 0<sup>o</sup> und 1 Atm. 1,015 kg/cbm. Der Heizwert (oberer Heizwert) beträgt 1320 W.E./cbm.

Aus der Analyse berechnet sich der untere Heizwert mit 1165 W.E., der obere mit 1313 W.E./cbm für trockenes Gas.

1 kg Kohle von 67,9% Kohlenstoffgehalt beziehungsweise 7225 W.E./kg Heizwert lieferte 4,43 cbm Gas. Somit beträgt das Verhältnis des Heizwertes des Gases zu jenem des hierzu verbrauchten Brennstoffes

$$\frac{4,43 \times 1320}{7225} = 0,81.$$

Für den unteren Heizwert des Gases wird dieses Verhältnis natürlich entsprechend ungünstiger.

Der Wirkungsgrad der Anlage ist jedoch wesentlich geringer, nachdem bei Erzeugung des Gases noch Dampf zuzuführen und mechanische Arbeit zu verrichten ist; berücksichtigt man diese beiden Faktoren, dann ergibt sich der Wirkungsgrad mit 0,65 für den oberen und 0,61 für den unteren Heizwert des Gases. Der Wirkungsgrad der Anlage ist in Berücksichtigung der schlechten Beschaffenheit des zur Herstellung des

Mondgases verwendeten Brennmaterials im Vergleiche mit einer Dowson-gasanlage, deren Wirkungsgrad mit durchschnittlich 0,75 angenommen werden kann, als günstig zu bezeichnen.

Nachdem bei Verwendung von Mondgas nur Großleistungen inbetracht gezogen werden können, so läßt sich ein Vergleich mit einer Dampfanlage auch nur für Leistungen über etwa 500 PS ziehen; für solche Anlagen dürfte bei Verwendung desselben minderwertigen Brennstoffes durch Mondgas eine 20- bis 30-prozentige Brennstoffersparnis erreicht werden können.

Der Vollständigkeit halber sei noch bemerkt, daß das aus minderwertigerer Kleinkohle von 62,7 % Kohlenstoffgehalt beziehungsweise 6786 W.E./kg Heizwert erzeugte Gas nach den Berichten Humphreys aus

29%	Wasserstoff,
11 „	Kohlenoxyd,
16 „	Kohlensäure,
42 „	Stickstoff und
2 „	Sumpfgas

zusammengesetzt war, bei 0° und 1 kg/qcm Druck 0,987 kg/cbm wog und einen Heizwert von 1370 W.E./cbm als oberen Grenzwert hatte.

1 kg feuchter Kohle lieferte 3,82 cbm Gas; das Verhältnis der Heizwerte war daher noch etwas günstiger als im obigen Falle und stellte sich auf

$$\frac{3,82 \times 1370}{0,914 \times 6786} = 84,5\%$$

nachdem der Feuchtigkeitsgehalt der Kohle 8,6 % betrug.

**Das Hohofengichtgas.** Seit den ersten bescheidenen Versuchen, die Hohofengichtgase nicht mehr zur Heizung der Dampfkessel zu verwenden, sondern die in denselben enthaltenen Wärmemengen durch die Gasmaschine direkt in mechanische Arbeit zu umsetzen, sind nur wenige Jahre verflossen und innerhalb dieser kurzen Zeit hat die Verwendung der Hohofengichtgase zum Betriebe von Gasgroßmaschinen eine außerordentliche Bedeutung für die gesamte Eisenindustrie erlangt.

Seiner Zusammensetzung nach besteht das Gichtgas durchschnittlich aus 26 bis 30 Volumprozenten Kohlenoxyd, etwa 7 bis 10% Kohlensäure, geringeren Mengen Wasserstoff und Kohlenwasserstoffen und im übrigen hauptsächlich aus Stickstoff.

Der Heizwert desselben ist bei der Verschiedenartigkeit der Zusammensetzung der Gichtgase auch verschieden, kann jedoch im großen Durchschnitt mit 950 W.E./cbm angenommen werden.

Nach den bis heute vorliegenden Versuchen kann der Verbrauch an Gichtgas von 950 W.E./cbm bei voller Belastung der Maschine, je nach Größe derselben, mit durchschnittlich 2,5 cbm pro PS<sub>i</sub> und 3,2 bis 3,5 cbm pro PS<sub>e</sub> und Stunde angenommen werden. Es sind ja meist nur große Maschinen, welche hier inbetracht kommen.

Die bereits an früherer Stelle erwähnte 600 PS, mit dem Gebläse direkt gekuppelte Maschine von J. Cockerill in Seraing, ergab bei den ohne Gebläse ausgeführten Versuchen bei 94,37 Minutenumdrehungen eine Leistung von 786,16 PS<sub>i</sub> beziehungsweise 575 PS<sub>e</sub> (mechanischer Wirkungsgrad  $\eta = 0,73$ ); der Gasverbrauch betrug 2,556 cbm pro PS<sub>i</sub> beziehungsweise 3,495 cbm pro PS<sub>e</sub> und Stunde. Der Heizwert des Gases wurde mit 915,2 beziehungsweise 984,5 W.E./cbm ermittelt und zwar im ersteren Falle unter Benützung eines Kalorimeters von Junker, im anderen Falle durch die Bombe von Witz. Der thermische Wirkungsgrad betrug daher 0,27 beziehungsweise 0,25.

Die Versuche der mit dem Gebläse gekuppelten Maschine ergaben insofern günstigere Resultate, als die Regulierung der Maschine inzwischen verbessert wurde. Die Maschine arbeitete bei 83,92 Minutenumdrehungen mit 746,73 PS<sub>i</sub>, beziehungsweise 562,57 PS<sub>e</sub> und verbrauchte hierbei 2,345 beziehungsweise 3,113 cbm Gas pro Pferdekraftstunde. Bei auf 93 Umdrehungen erhöhter Geschwindigkeit stieg die Leistung auf 886,54 PS<sub>i</sub>, beziehungsweise 725,3 PS<sub>e</sub>; der Gasverbrauch betrug 2,334 beziehungsweise 2,853 cbm pro PS-Stunde.

Die Versuche mit einer 200 PS-Gichtgasmaschine von Gebr. Körting in Hannover ergaben bei voller Belastung einen Gasverbrauch von 3,5 cbm pro PS<sub>e</sub>-Stunde. Derselbe stieg bei einer 12% Leistungsabnahme auf 3,8 cbm, bei einer Leistung von nur 90 PS jedoch auf 6,6 cbm\*).

Mit einem 40 PS Kruppschen Präzisionsgasmotor der Johannishütte in Duisburg ausgeführte Versuche\*\*) ergaben einen Verbrauch an Gichtgas von 950 W.E./cbm, welcher in anbetracht der geringen Leistung der Maschine auffallend gering war; derselbe betrug 2,81 cbm pro PS<sub>e</sub> beziehungsweise 2,23 cbm pro PS<sub>i</sub>-Stunde. Die Wärmebilanz dieses Motors stellte sich wie folgt:

Indizierte Arbeit . . . . .	29,82 Prozent
Kühlwasserverlust . . . . .	33,01 „
Mit den Abgasen . . . . .	26,95 „
Unvollkommene Verbrennung . . . . .	6,82 „
Strahlungs- und Leitungsverluste . . . . .	3,40 „

Summe 100 Prozent.

\*) Zeitschr. des Ver. deutscher Ing. 1900, S. 856.

\*\*) Ebendasselbst, S. 1213.

Die bis heute vorliegenden Versuche hinsichtlich des Gasverbrauches und der Wärmebilanz der Gichtgasmaschinen sind noch zu vereinzelt, um daraus einen Schluß auf die Allgemeinheit dieser Motoren ziehen zu können; auch stehen die Motoren selbst, hinsichtlich der Frage der besten Bauart derselben, noch zu sehr im Zustande der Entwicklung, und da in erster Linie auch die Frage der zweckmäßigsten Regulierung noch nicht endgiltig gelöst ist, auf den Gasverbrauch jedoch einen wesentlichen Einfluß übt, so haftet den bis heute vorliegenden Versuchsergebnissen auch noch eine begriffliche Unsicherheit an.

Die anfänglichen Befürchtungen, daß die Verwertung der Gichtgase zur unmittelbaren Krafterzeugung infolge der wechselnden Zusammensetzung der Hohofengase, des geringen Gehaltes an brennbaren Gasen (etwa 25 bis 35 Prozent), der Beimengung von Staub, Metall- und anderen Dämpfen, sowie des Gehaltes an Wasserdampf, hinsichtlich der Zündung, des gleichmäßigen Ganges, der Verunreinigung und Abnutzung des Cylinders und der inneren bewegten Teile, der Zersetzung des Schmieröles etc. besondere Schwierigkeiten bereiten wird, sind als längst überwunden zu betrachten. Soweit bis heute die Erfahrung reicht, ist die Verschmutzung des Cylinders nicht größer wie bei Leuchtgasmaschinen; ebenso wenig konnte bisher beobachtet werden, daß die Cylinderwandungen in höherem Maße angegriffen werden, als bei Verwendung von Leucht- oder Dowsongas; auch die Schmierung bereitet keine neuen Schwierigkeiten etc.

Der Druck der Hohofengase beträgt an der Gicht durchschnittlich 90 bis 150 mm Wassersäule; die Temperatur derselben schwankt zwischen 300 und 350° C. Vor dem Motor beträgt der Druck zumeist nur mehr 20 bis 60 mm, während die Temperatur des Gases als Folge der Reinigung desselben bis auf 8° bis 15° C sinkt. Die Gase bedürfen vor ihrem Eintritt in den Motor einer gründlichen Reinigung und Abkühlung, doch genügten bisher die bei Generatorgasanlagen mit Erfolg angewendeten Koksscrubber und Sägemehltreiner auch hier vollkommen.

Auf vielen Hohofenanlagen wird das Gichtgut vor Eintritt in die Winderhitzer und Dampfkessel ohnehin sorgfältig gereinigt, so daß hierdurch die Zahl der für den Gasmaschinenbetrieb erforderlichen zusätzlichen Apparate sich auf je einen Scrubber und Sägemehltreiner beschränken dürfte.

Die Gichtgasmotoren unterscheiden sich, wie ja bereits an früherer Stelle erörtert, prinzipiell in keiner Weise von den Leuchtgas- und Generatorgasmaschinen. Mit der Kompression geht man, ohne Gefahr frühzeitiger Zündung, zumeist auf 9 bis 12 kg/qcm Endspannung hinauf. Hierdurch wird der thermische Wirkungsgrad günstig beeinflusst und steht auf nahezu gleicher Höhe mit jenem der Leuchtgasmaschine. Auch die

Zündung erfolgt vollkommen verlässlich, sodaß verspätete Zündungen oder Ausbleiber und deren üble Folgen nicht zu befürchten sind; die Verbrennung selbst erfolgt allerdings etwas langsamer als bei Leuchtgas und erscheint die Explosionslinie in der Richtung der Kolbenbewegung stark verschleppt; auch der Verlauf der Expansionskurve läßt erkennen, daß ein Teil der Gase erst während der Ausdehnung derselben verbrennt. Der Explosionsenddruck nimmt daher auch nicht jenen Wert an, welchen er mit Rücksicht auf die erhöhte Verdichtung annehmen sollte.

Während das Gewicht des Leuchtgases mittlerer Zusammensetzung pro cbm 0,53 bis 0,54, jenes des Dowsongases 1,1 bis 1,2 kg beträgt, wiegt 1 cbm Hohofengas durchschnittlicher Zusammensetzung 1,23 kg und benötigt zur vollständigen Verbrennung 0,715 cbm atmosphärischer Luft (gegenüber 5 bis 7 cbm für Leuchtgas und 1,13 bis 1,15 cbm für Generatorgas). Die theoretische Verbrennungstemperatur beträgt im Mittel 1650° C (gegenüber den mittleren Werten der Verbrennungstemperaturen von Leuchtgas bezw. Dowsongas von 2050 bezw. 2000° C). Bei gleichen Abmessungen leistet ein mit Gichtgas gespeister Motor um durchschnittlich 20% weniger als ein Leuchtgasmotor.

Über die außerordentliche Bedeutung der Verwendung der Hohofengichtgase zum direkten Kraftbetrieb erlangt man einen einigermaßen verlässlichen Einblick, wenn man die durchschnittliche Gasproduktion ins Auge faßt.

Man kann im allgemeinen annehmen, daß auf 1 Tonne im Hohofen erzeugtes Roheisen 4600 bis 4650 cbm Gichtgas erzeugt werden. Rechnet man, daß hiervon 10% verloren gehen und 30% für die Winderhitzung benötigt werden, so erübrigen 60% das sind rund 2800 cbm für motorische Zwecke.

In Deutschland und Luxemburg werden stündlich etwa 920 Tonnen Roheisen erzeugt; dieser Produktion entsprechend stehen daher stündlich 2 576 000 cbm Gichtgas zur Verfügung. Rechnet man nun im großen Durchschnitte 3,5 cbm Gas pro PS<sub>e</sub>-Stunde, so ergibt sich daraus eine Arbeitsmenge von 736 000 PS<sub>e</sub>.

Ein wichtiger Umstand, welcher namentlich für andere Industrien schwer in die Wagschale fällt, ist der, daß die Hohofenwerke, wenn sie vom Dampfbetriebe auf den Gasmaschinenbetrieb übergehen, bedeutend weniger Gas für den eigenen Betrieb verbrauchen, da man annehmen kann, daß mit 1 cbm Gas und Dampftrieb nur ungefähr die halbe Leistung erzielt wird als bei Gasbetrieb. Nach allen vorliegenden Erfahrungen ist feststehend, daß von der gesamten Gichtgaserzeugung rund 40% durch die Dampfkessel des Hohofenbetriebes aufgezehrt werden, somit nur 20% für andere Zwecke zur Verfügung stehen; wird der Dampftrieb



jedoch durch Gasbetrieb ersetzt, dann stehen etwa 40%, also 1700000 cbm Gas pro Stunde, bezw. eine Leistung von rund 486 000 PS<sub>e</sub> 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.

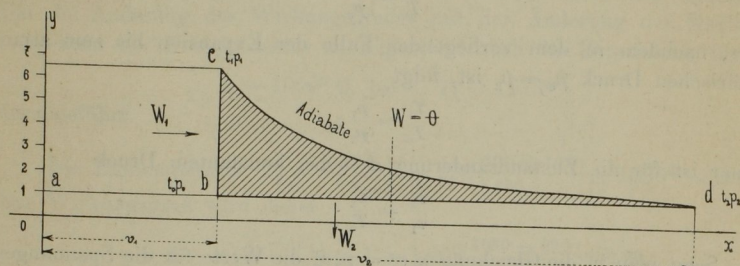


Fig. 278.

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  $273^{\circ}\text{C}$ ).

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  $\eta$  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 Gasmachine 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  $1000^\circ$  auf  $1600^\circ \text{ C}$  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

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

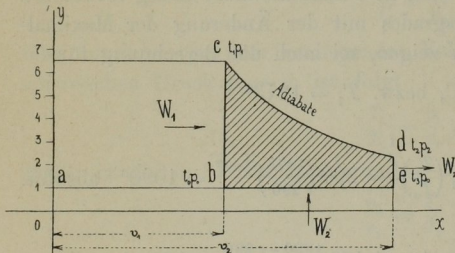


Fig. 279.

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  $1600^\circ$  beziehungsweise  $1000^\circ \text{ C}$  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 Gasmachine, 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.

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

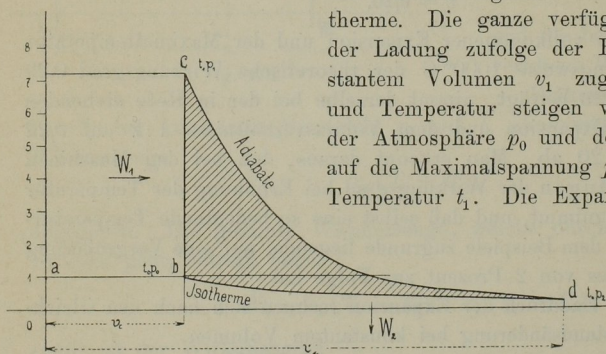


Fig. 280.



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 endgültige 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  $1273^\circ$  absolut und  $T_0 = 290^\circ$ , entsprechend  $t_1 = 1600^\circ$  beziehungsweise  $1000^\circ$  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.

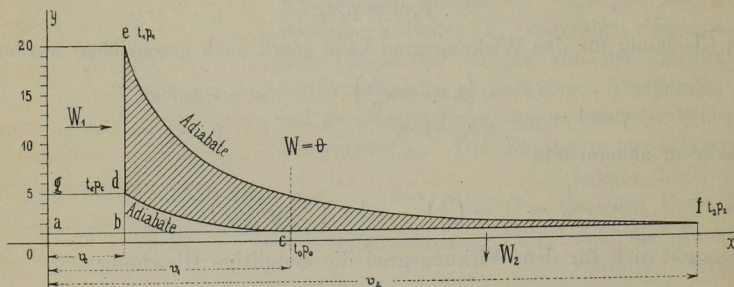


Fig. 281.

*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

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

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

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

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

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

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 Gasmisch; 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 Gasmisch 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  $1000^\circ$  C und die Temperatur der Außenluft mit  $t_0 = 17^\circ$  C, somit  $T_1 = 1873^\circ$  beziehungsweise  $1273^\circ$  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.

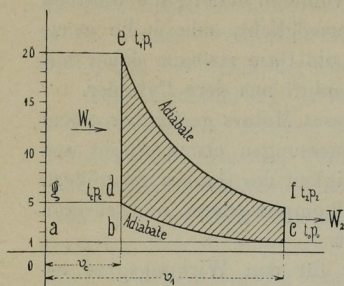


Fig. 282.

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

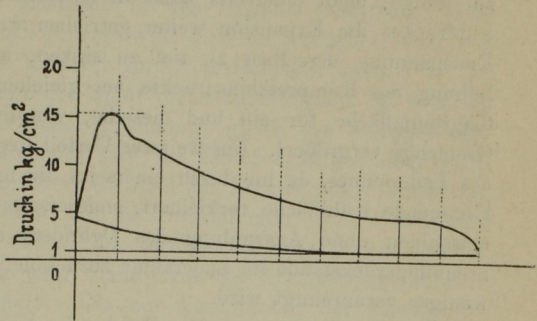


Fig. 283.

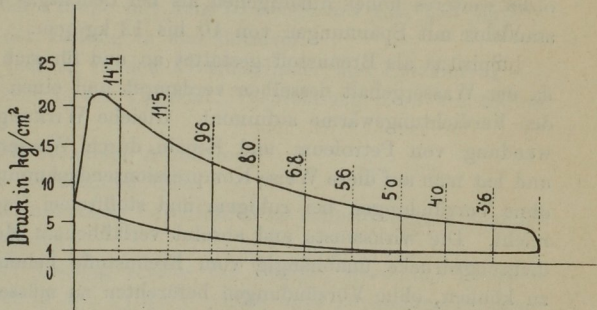


Fig. 284.

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,

daß sie nicht durch geeignete Konstruktion einer Maschine näherungsweise erfüllt werden könnten.

Nach diesem Arbeitsprinzip waren die Petroleummotoren von Brayton und Simon, erstere eine amerikanische Erfindung, letztere eine englische Nachahmung derselben, gebaut. C. W. Siemens lenkte bereits 1861 die Aufmerksamkeit auf dieses Arbeitsprinzip, erzielte aber damit ebensowenig einen Erfolg, als F. Million im Jahre 1860; die Ausführung dieser Maschinen scheiterte an dem Unvermögen sachgemäßer Detaildurchführung.

Die Maschine von Brayton wurde speziell in Amerika in vielen Exemplaren ausgeführt und durch die Ausstellung in Philadelphia 1876 in weiteren Kreisen bekannt; gelegentlich der Pariser Weltausstellung 1878 war eine solche Maschine von Simon ausgestellt\*).

In neuerer Zeit wurde dieses Arbeitsprinzip wieder aufgenommen und durch die Dieselmachine zu voller Geltung gebracht.

Das vollkommene Indikatordiagramm einer Maschine dieser Type ist in Fig. 285 dargestellt.

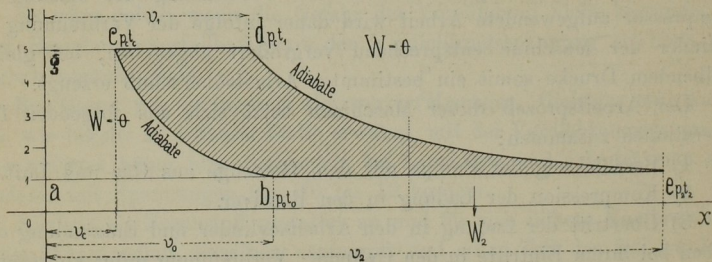


Fig. 285.

Ogleich der in Rede stehende Arbeitsprozeß zwei Cylinder verlangt und somit durch zwei Diagramme dargestellt werden sollte, ist es jedoch für das Verständnis besser, beide Diagramme in einem vereint so zu behandeln, als ob sich der ganze Arbeitsprozeß im Motorcylinder allein abwickeln würde. Die schraffierte Fläche stellt die verfügbare Arbeit des Kreisprozesses, die nicht schraffierte Fläche hingegen die Arbeit der Kompressionspumpe dar.

Die Linie  $abc$  ist die atmosphärische Linie; das Volumen der Pumpe ist durch die Strecke  $ab$ , das Volumen des Arbeitscylinders durch die Strecke  $ac$  dargestellt. Die Pumpe nimmt das Volumen  $ab$  von atmosphärischer Spannung auf und drückt dasselbe in den Receiver; die Kom-

\*) Zeichnung und Beschreibung dieser Maschine siehe: Musil, *Die Motoren für das Kleingewerbe*, 1883; Knoke, *Die Kraftmaschinen für das Kleingewerbe*, 1887.

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 Motocylinders,  $abcg$  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  $\eta$  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

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

Die zugeführte Wärme ist auch hier

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

die abgeführte Wärme

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

und daraus ergibt sich der Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{W_1 - W_2}{W_1} = \frac{c_p(T_1 - T_c) - c_v(T_2 - T_3) - c_p(T_3 - T_0)}{c_p(T_1 - T_c)}$$

oder

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

Obwohl in diesem Falle keine feste Beziehung zwischen dem Wirkungsgrade und der Temperatur der adiabatischen Kompression besteht, so ist doch klar, daß der Wirkungsgrad mit zunehmender Temperatur  $T_c$  gleichfalls zunehmen wird. Um diese Abhängigkeit an einem Zahlenbeispiele zu zeigen, müßte nicht nur wie früher ein bestimmter Verdichtungsgrad, sondern auch das Verhältnis des Hubvolumens des Arbeitscylin-

ders zu jenem des Pumpencylin-

genommen werden. Nachdem die Wahl dieses Verhältnisses im allgemeinen willkürlich ist, so werden auch die daraus berechneten Werte des theoretischen Wirkungsgrades kein klares Bild hinsichtlich des Wertes des in Rede stehenden Arbeitsprozesses bieten. In neuerer Zeit wurde jedoch die Verbrennung bei konstantem Drucke von Diesel wieder aufgegriffen und in seiner Viertaktmaschine erfolgreich durchgeführt; es sollen daher einem Zahlenbeispiele die tatsächlichen Verhältnisse der Dieselmachine zugrunde gelegt werden.

Wie aus der Beschreibung der Dieselmachine im folgenden Abschnitte hervorgeht, vereinigt dieselbe wie jeder Viertaktmotor Arbeitscylin-

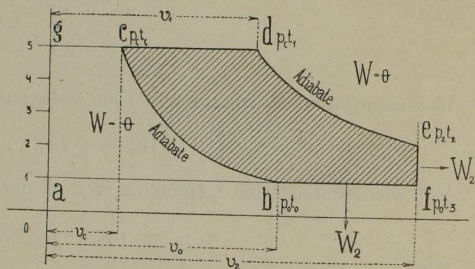


Fig. 286.

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. 286a 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  $550^{\circ}$  bis  $600^{\circ}$ , jene der flüssigen Brennstoffe (Petroleum, Benzin)  $500^{\circ}$  bis  $550^{\circ}$  C be-