

Außer diesen Konstruktionen seien noch im Zusammenhange erwähnt die geschlossenen Heißluftmaschinen von Rennes, Buschbaum und anderen.

Hinsichtlich des Brennstoffverbrauches waren alle diese Maschinen ziemlich gleichwertig*).

216. Heißluftmaschinen mit innerer Verbrennung. Die bereits an früherer Stelle erwähnte Schwierigkeit, einer gasförmigen Substanz Wärme durch bloße Berührung mit heißen oder kalten Wandungen zuzuführen oder zu entziehen, war der Hauptgrund, welcher die Verwendung der Heißluftmaschinen mit äußerer Verbrennung für große Leistungen verhinderte. Die Wirksamkeit einer Heizfläche ist bedeutend größer, wenn die zu erheizende Arbeitssubstanz ihren Aggregatzustand vom tropfbar-flüssigen in den gasförmigen Zustand ändert, als wenn dieselbe sich bereits vor der Erhitzung im gasförmigen Zustande befindet. Ebenso wird ein Gas bei Berührung mit kalten Oberflächen seine Wärme viel langsamer abgeben als Dampf, welcher während des Arbeitsprozesses abgekühlt, beziehungsweise kondensiert wird. Diese Schwierigkeit der Wärmeübertragung beziehungsweise Wärmeentziehung durch bloße Leitung der Wärme durch Gefäßwände wird jedoch, insofern es sich um die Erhitzung der gasförmigen Arbeitssubstanz handelt, nahezu gänzlich beseitigt, wenn sich der Verbrennungsprozeß innerhalb der Maschine selbst vollzieht. Der Abkühlungsprozeß vollzieht sich hingegen viel vollkommener und rascher, wenn man die Arbeitssubstanz, welcher Wärme entzogen werden soll, in die Atmosphäre ausströmen läßt, statt dieselbe durch Wärmeleitung abzukühlen und immer wieder von neuem zu benützen. Diesem Umstande verdanken die Maschinen mit innerer Verbrennung in erster Linie ihren verhältnismäßig hohen Wirkungsgrad.

Die erste Konstruktion einer Heißluftmaschine mit innerer Verbrennung — man bezeichnet diese Maschinen auch mit dem Ausdrucke „offene Maschinen“, im Gegensatze zu den geschlossenen Maschinen mit äußerer Feuerung — scheint von George Cayley ausgegangen zu sein**); spätere Konstruktionen, welche durch die Litteratur bekannt wurden, sind die Maschinen von Wenham***), Buckett, Hock, Brown, Benier, Holdorff, Brückner u. a.†).

*) Zeichnung und Beschreibung der seinerzeit bekannt gewordenen Heißluftmaschinen siehe: A. Musil, *Die Motoren für das Kleingewerbe*, 2. Aufl., Braunschweig 1883, sowie J. O. Knoke, *Die Kraftmaschinen des Kleingewerbes*, 2. Aufl., Berlin 1899; dieses Buch enthält zugleich eine ausführliche Theorie der Heißluftmaschine, ergänzt durch die Wiedergabe zahlreicher Versuchsergebnisse.

***) *Nicholsons Art Journal* 1807. — *Min. of Proc. Inst. of Civil Eng.*, Vol. IX.

****) *Proc. Inst. of Mech. Eng.* 1873.

†) Siehe hinsichtlich dieser Maschinen die vorhin erwähnten Arbeiten von Knoke und Musil, von welchen namentlich die erstere die vollständigste, derzeit bestehende deutsche Publikation über Heißluftmaschinen bildet.

In diesen Maschinen wird Kohle oder Koks unter Luftüberdruck in einem hermetisch verschlossenen Ofen, welchem das Brennmaterial durch eine gleichfalls luftdicht nach außen abgeschlossene, mit geeigneter Füll- und Entleerungsvorrichtung ausgestattete Kammer zugeführt wird, verbrannt. Die zur Verbrennung erforderliche Luftmenge wird von einer der Maschine angehängten Kompressionspumpe geliefert und in den Feuer- raum gedrückt; durch ein von dem Regulator der Maschine gesteuertes Verteilventil wird die Luftzufuhr unter den Rost und damit der Gang der Maschine geregelt. Die Verbrennungsprodukte, deren Volumen infolge

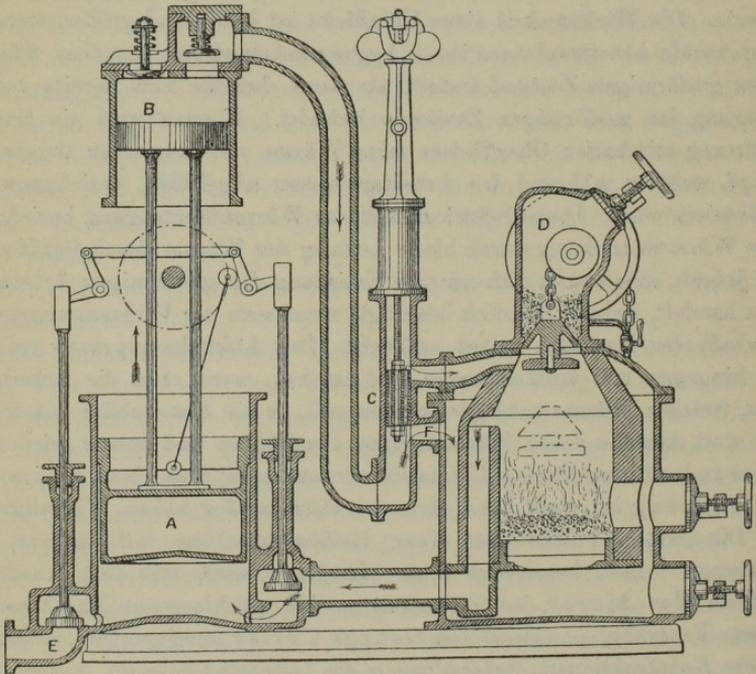


Fig. 247.

der Temperaturerhöhung entsprechend größer ist als das Volumen der eingeblasenen Luft, treten in den Arbeitscyylinder über und treiben den Kolben nach aufwärts. Nachdem derselbe einen Teil seines Hubes zurückgelegt hat, wird der Zutritt der heißen Gase geschlossen, es beginnt die Expansion, Druck und Temperatur der Cylinderfüllung sinkt, bis mit Ende des Hubes das Auslaßorgan geöffnet wird und während des Kolbenrücklaufes die Verbrennungsprodukte in die Atmosphäre entweichen.

In Fig. 247 ist die Bucketmaschine im Längenschnitt dargestellt. A ist der Arbeitscyylinder, dessen Kolben so geformt ist, daß die dichtende

Gleitfläche desselben nach dem oberen kühleren Teile des Cylinders verlegt ist und mit den Heizgasen nicht in unmittelbare Berührung tritt. *B* ist die Kompressionspumpe, welche während des Kolbenniederganges frische Luft ansaugt und dieselbe während des Arbeitshubes komprimiert und nach dem Ofen schafft. *C* ist das Verteilorgan (hier als Rundschieber gedacht), durch welches der Regulator den Zutritt der Preßluft unter den Rost und hierdurch auch den Brennmaterialverbrauch regelt. *D* ist die Füllkammer mit der Einbringvorrichtung für den Brennstoff, *E* das Auslaßorgan für die Verbrennungsprodukte. Der kinematische Zusammenhang der Maschine sowie die einzelnen Details derselben sind aus der Figur genügend klar zu ersehen.

Die Maschine von Hock ist in der Bauart gedrängter, da der Ofen unmittelbar an den Arbeitscyliner anschließt, was mit Rücksicht auf die hierdurch verminderten Wärmeausstrahlungsverluste nur günstig ist; die Feuerung, in einem gemeinschaftlichen Gehäuse vereint, ist zur Seite des Cylinders angeordnet; im übrigen ist die Anordnung der Maschine die gleiche. Die Kurbelwelle liegt hier wie dort zwischen Arbeits- und Kompressionscyliner; die Cylinder sind durch ein hohles Gußstück, die beiden Kolben durch vier Stangen fest miteinander verbunden; zwischen diesen Stangen spielt die an den Luftpumpenkolben angehängte Schubstange. Der Arbeitscyliner steht auf einem hohlen kastenförmigen Stück, welches zugleich als Vorwärmer für die Preßluft dient.

Die Hocksche Maschine wurde für Leistungen bis etwa 6 Pferdestärken gebaut. Die Spannung im Cylinder erreichte im Maximum 2,5 kg/qcm absolut.

Die Maschine von Brown war noch breiter gebaut als die Buckettmaschine, indem die beiden Cylinder vertikal nebeneinander gestellt waren. Die Bewegungsübertragung erfolgte durch einen hochgelagerten Balancier, an dessen einem Ende der Arbeitskolben, an dessen anderem Ende der Pumpenkolben sowie die Kurbelschubstange angehängt war. Diese Maschine wurde an den Küsten Deutschlands vielfach zum Betriebe der Nebelhörner und Sirenen benutzt. Die Verdichtung der Luft soll bis auf 3 kg/qcm Überdruck getrieben worden sein.

Viel Aufsehen erregte seinerzeit die um das Jahr 1888 bekannt gewordene Maschine von Benier. Benier stellte den vertikalen Arbeitscyliner direkt auf den Ofen und ordnete die Luftpumpe horizontal im Ständer der Maschine an. Die Bewegungsübertragung erfolgte gleichfalls durch einen hochgelagerten Balancier.

Infolge der geringen mittleren Spannung im Arbeitscyliner werden Heißluftmaschinen der in Rede stehenden Bauart und Wirkungsweise verhältnismäßig groß, schwer und teuer; andererseits werden die Dichtungs-

und Wärmeausstrahlungsverluste in Anbetracht der im Verhältnisse zur geringen Leistung großen Cylinderabmessungen sehr bedeutend. Wenn gleich die Öfen auch mit feuerfester Masse ausgekleidet wurden, so gaben diese sowie die Verschlüsse derselben zu steter Reparatur Veranlassung, wurden in Bälde, in Anbetracht der hohen Verbrennungstemperaturen, luftdurchlässig, wodurch der Wirkungsgrad in nachteiligster Weise beeinflusst wurde. * Endlich unterliegen die Cylinder, Kolben und Steuerorgane einer steten Verschmutzung durch Ruß, Flugasche etc., bedürfen daher einer sehr häufigen und gründlichen inneren Reinigung. Die Summe dieser Übelstände, sowie die glänzenden Betriebsergebnisse, welche mit der inzwischen zu hoher Vollkommenheit gelangten Gasmaschine erzielt wurden, hatten zur Folge, daß die meisten Fabrikanten den Bau der Heißluftmaschine wieder aufgaben. Diese Maschinen werden daher heutigen Tages nur mehr von einigen wenigen Firmen und von diesen nur für ganz minimale Leistungen, meist mit Gas- oder Petroleumfeuerung gebaut.

Das thermodynamische Güteverhältnis dieser Klasse von Maschinen hängt ungemein davon ab, bis zu welchem Grade die Gase bei der adiabatischen oder nahezu adiabatischen Expansion im Cylinder abgekühlt werden. Die thermodynamischen Vorteile hoher Anfangstemperaturen gehen verloren, wenn die Maschine nicht gleichzeitig mit weitgehender Expansion arbeitet. Nachdem nun bei allen Maschinen mit innerer Verbrennung die Gase unter atmosphärischen Druck von der Maschine ausgegeben werden müssen, so ist ein großes Expansionsverhältnis nur bei gleichzeitiger hoher Anfangskompression möglich. Kompression der Gase vor ihrer Erhitzung ist daher eine Grundbedingung, ohne welche Wärmekraftmaschinen mit innerer Verbrennung keinen hohen thermischen Wirkungsgrad ergeben können. Kompression ist aber auch, wie bereits früher bemerkt, ein Erfordernis aller Luftmaschinen, welche eine gewisse Leistung ergeben sollen, ohne daß das Volumen des Arbeitcylinders und damit das Gesamtausmaß derselben nicht ganz unverhältnismäßig anwächst.

Maschinen mit innerer Verbrennung, welche feste Brennstoffe benützen, konnten sich in den bisherigen Ausführungen nicht bewähren und dürfte diese Klasse von Wärmekraftmaschinen, wenn hinsichtlich der Art der Verbrennung nicht neue Wege betreten werden, wohl kaum je mehr zu irgend einer Bedeutung gelangen. Die Benützung flüssiger und vor allem gasförmiger Brennstoffe hat jedoch der Maschine mit innerer Verbrennung in verhältnismäßig kurzer Zeit eine Position von größter Bedeutung geschaffen, welche in fortwährender Zunahme begriffen ist.

Gasmaschinen, beziehungsweise Maschinen, welche durch die Verbrennung oder Explosion einer Mischung von Luft und einem brennbaren Gase arbeiten, sind im Laufe der letzten zehn Jahre in ernste Konkurrenz

mit der Dampfmaschine getreten; in jüngster Zeit wurde durch die Verwendung der Hohofengichtgase zur unmittelbaren Krafterzeugung mittels Gasmaschine eine neue Kraftquelle erschlossen, welche die Dampfmaschine auch auf dem Gebiete der Großleistung zu verdrängen beginnt. Auch die Verwertung flüssiger Brennstoffe ist durch die geniale Erfindung Diesels in eine neue Bahn gedrängt, welche die größten Erfolge nach dieser Richtung verspricht. Dem freien Wettbewerbe ist daher Tür und Tor geöffnet und wird die Zukunft lehren, ob die Gas- und Ölmaschinen nebst ihrer thermodynamischen Überlegenheit auch alle jene Eigenschaften besitzen, welche sie dauernd und erfolgreich an Stelle der Dampfmaschine zu setzen vermögen.

Die Vervollkommnung der Dampfturbine und die mit derselben erzielten außerordentlich günstigen Ergebnisse hinsichtlich des Dampfverbrauches etc. führten zur Konstruktion der sogenannten **Heißluftturbine**, indem man hoffte, die Vorteile der direkt rotierenden Kraftmaschine ohne dem unbequemen und kostspieligen Begleiter jeder Dampfanlage, dem Kessel, erreichen zu können.

Die in dieser Hinsicht gegebenen Anregungen führten bis heute zu zwei Konstruktionen, jener von Nordenfeldt und jener von de Laval.

Nordenfeldt wendete den Kreisprozeß der veralteten Lenoirschen Gasmaschine (siehe nächster Abschnitt) an, indem er Luft in einen Behälter saugt, in welchem sich dieselbe mit irgend einem Brennstoffe zu einem explosiblen Gemenge mischt. Nach Schluß der bezüglichen Einlaßorgane erfolgt die Zündung, worauf die Ausflußdüsen des Behälters geöffnet werden und der größte Teil seines Inhaltes dem Laufrade der Turbine zufließt. Obwohl der Lenoirsche Kreisprozeß einen geringen thermischen Wirkungsgrad ergibt, wurde er dennoch von Nordenfeldt aufgegriffen, um mit Ladung von atmosphärischer Spannung arbeiten, also einen Kompressor ersparen zu können.

Es wäre trotzdem eine leidliche Wärmeausnützung denkbar, nachdem, dem Charakter des Motors entsprechend, ein verhältnismäßig hoher mechanischer Nutzeffekt erzielt werden kann, wenn nicht infolge des in Rede stehenden Arbeitsprozesses die Verwertung der Ausflußenergie des Arbeitsgases eine sehr unvollkommene wäre.

Denn schon der Umstand, daß sich die Ausflußgeschwindigkeit des Gases fortwährend ändert, indem sie nach jeder Zündung plötzlich zunimmt und sodann, der Expansion der entzündeten Ladung entsprechend, sofort wieder abnimmt, ist mit der gleichmäßigen Umlaufgeschwindigkeit, welche man von der Turbine fordert, nicht in Einklang zu bringen. Dieser Umstand bringt jedoch noch eine weitere konstruktive Unzuträg-

lichkeit mit sich, indem auch die Düsenquerschnitte, entsprechend der wechselnden oberen Grenze der Arbeitsspannung, jedesmal geändert werden müßten, falls man nicht auf höchste Ausnützung der Wärmeenergie verzichtet. Nachdem nun diese konstruktive Bedingung ebensowenig wie eine gleichmäßige Ausflußgeschwindigkeit erfüllt werden kann, ist auch bei diesem Heißluftturbinensystem eine günstige Ausnützung der Wärme des verbrauchten Brennmateriales nicht zu erwarten.

Der Kreisprozeß der de Laval-Turbine ist eine Zustandsänderung zwischen zwei Geraden $p_1 = \text{const.}$ und $p_2 = \text{const.}$; dies ergibt, wie bei der de Laval-Dampfturbine, gleichmäßige Ausflußgeschwindigkeit bei ununterbrochenem Betriebe.

Die Anlage besteht aus einem Druckraum, in welchem die Spannung p_1 herrscht, der durch einen Kompressor fortwährend mit frischer Luft, andererseits mit Brennstoff irgend welcher Art beschickt wird, sowie aus dem Turbinenlaufrade, dem die Gase aus dem Behälter mit der gleichbleibenden Spannung p_2 zufließen, indem Luftzufuhr und Düsenzahl so gewählt beziehungsweise geregelt werden, daß p_1 unverändert erhalten wird. Als Brennstoff kann jedes beliebige Material, daher auch Kohle, Koks etc. gewählt werden. Die de Laval-Turbine beruht somit auf dem Arbeitsprinzip der offenen Heißluftmaschine mit geschlossener Feuerung; während bei dieser die erhitzte mit den Verbrennungsgasen gemischte Luft in einzelnen Impulsen, den Kolbenhuben der Maschine entsprechend, ausgenützt wird, strömt sie bei der Heißluftturbine fortwährend dem Motor zu.

Die Umlaufgeschwindigkeiten sind hier ebenso groß als bei der Dampfturbine, daher einerseits an das Material des Laufrades dieselben hohen Anforderungen gestellt werden und andererseits die Temperatur an eine obere Grenze gebunden ist.

Die Wärmeökonomie dieser Heißluftturbine ist, wie eine einfache Rechnung lehrt, nicht größer wie jene einer Dampfturbine; die ganze Anlage wird infolge des Kompressors vielgliedrig, schwer und teuer und dabei ist die Betriebssicherheit geringer wie jene einer Dampfturbine, so daß sich der Heißluftturbine kaum eine Aussicht auf praktische Verwertung eröffnen dürfte.