

### XIII. Abschnitt.

#### Luftmaschinen.

##### **212. Luftmaschinen mit äußerer und innerer Verbrennung.**

Mit dem Ausdrucke Luftmaschine kann man im engeren Sinne des Wortes eine Maschine bezeichnen, deren Arbeitssubstanz nur aus atmosphärischer Luft besteht oder aber man wendet diese Bezeichnung im weiteren Sinne auf alle Wärmemaschinen an, welche mit Gasen, zum Unterschiede von kondensierbaren Dämpfen, arbeiten. In diesem weiteren Sinne umfaßt obige Bezeichnung somit auch alle Maschinen, deren Arbeitssubstanz aus einer Gasmischung besteht, welche durch die Verbrennung irgend eines Brennstoffes fester, flüssiger oder gasartiger Form in der Maschine selbst gebildet wurde, also in erster Linie die eigentlichen Gas- und Ölmaschinen. Diese beiden Kraftmaschinen sollen in den nächsten Abschnitten eingehender behandelt werden, doch beziehen sich einige der hier anschließenden Bemerkungen über Luftmaschinen im allgemeinen auf die Gas- und Ölmaschinen ebensowohl, als auf die mit reiner atmosphärischer Luft arbeitenden Motoren.

Bildet reine atmosphärische Luft allein die Arbeitssubstanz, dann wird ihr die Wärme durch Vermittlung von Gefäßwänden durch Leitung von einer äußeren Feuerung in gleicher Weise zugeführt, wie die Arbeitsflüssigkeit der Dampfmaschine die Wärme durch die Wandungen des Kessels aufnimmt.

Maschinen, welche in dieser Weise Wärme empfangen, nennt man **Maschinen mit äußerer Verbrennung**, zum Unterschiede von jener hochwichtigen Klasse von Maschinen, bei welchen die Verbrennung bzw. Wärmeerzeugung in der Maschine selbst stattfindet, welche daher **Maschinen mit innerer Verbrennung** genannt werden. Bei diesen Maschinen bildet dann nicht reine atmosphärische Luft allein, sondern die Mischung derselben mit den Verbrennungsprodukten die Arbeitssubstanz.

Bei allen neueren Maschinen mit innerer Verbrennung ist somit der Prozeß der Wärmeerzeugung mit dem Prozesse der Umsetzung der er-

zeugten Wärme in Arbeit im Arbeitscyylinder vereint. Die Verbrennung geht entweder der Wärmeausnützung unmittelbar voraus oder fällt mit dem ersten Teile der Arbeitsperiode zusammen. Im ersteren Falle erfolgt die Verbrennung in der Totlage der Maschine bei konstantem oder nahezu konstantem Volumen unter plötzlicher Drucksteigerung, also explosionsartig; im letzteren Falle während eines Teiles des Kolbenhubes, also bei zunehmendem Volumen, hat somit mehr den Charakter einer eigentlichen Verbrennung. Man bezeichnet daher auch die Maschinen der ersten Art mit dem Ausdrucke Explosionsmaschinen, jene der zweiten Art mit dem Ausdrucke Verbrennungsmaschinen.

Die Verbrennung in der Totlage der Maschine bedingt, daß die zur Bildung des explosiblen Gemenges erforderliche Mischung des Brennstoffes mit Luft vorher erfolgt und das Gemenge im Momente der Entzündung bereits im Arbeitscyylinder aufgespeichert ist. Bei den Verbrennungsmaschinen hingegen ist die Beschickung des Arbeitscyinders mit explosibler Ladung vor Beginn des Arbeitshubes ausgeschlossen; die Verbrennung selbst verläuft somit ohne sprunghafte Steigerung von Temperatur und Druck allmählich und geregelt.

Die Luft- und Gasmaschinen haben im Vergleiche mit jenen Maschinen, welche mit gesättigten Dämpfen arbeiten, den wesentlichen Vorteil, daß Temperatur und Spannung der Arbeitssubstanz von einander unabhängig sind. In der Dampfmaschine, sowie überhaupt in allen Maschinen, deren Arbeitsflüssigkeit gesättigte Dämpfe bilden, ist die obere Temperaturgrenze verhältnismäßig sehr niedrig, nachdem hohe Temperaturen sehr hohe Pressungen erfordern. In Luft- und Gasmaschinen ist es jedoch möglich, eine obere Temperaturgrenze zu benutzen, welche viel höher liegt wie jene der gewöhnlichen Dampfmaschine, und wenn hierbei die untere Temperaturgrenze keine Erhöhung erfährt, dann ergibt sich eine entsprechende Steigerung des thermodynamischen Wirkungsgrades der Maschine.

Die obere Temperaturgrenze kann bei Dampf allerdings unabhängig von der Spannung durch Überhitzung desselben erhöht werden; wenn aber auch die Überhitzung so weit als derzeit aus anderen Gründen möglich, gesteigert wird, so nimmt doch eine Dampfmaschine den größeren Teil ihrer Wärme bei jener niedrigen Temperatur auf, bei welcher das Speisewasser in Dampf verwandelt wird. Der direkte thermodynamische Vorteil bleibt daher trotzdem klein.

So lange der Arbeitsflüssigkeit die Wärme durch äußere Verbrennung zugeführt wird, muß ein beträchtlicher, den Wirkungsgrad schädigender Temperaturabfall zwischen der durch die Verbrennung im Verbrennungsraum erzeugten und jener Temperatur platzgreifen, bei welcher die Ar-

beitssubstanz die Wärme aufnimmt, da anderenfalls keine genügend rasche Wärmeübertragung durch die Wände des Heizapparates stattfinden könnte.

Maschinen mit innerer Verbrennung haben daher vor allem den Vorteil für sich, daß die Verbrennungstemperatur selbst die obere Grenze in dem thermodynamischen Kreisprozeß bildet.

Eine einfache, thermodynamisch vollkommene Form einer Luftmaschine mit äußerer Verbrennung wäre eine Maschine, welche dem Carnotschen Kreisprozeß folgte, sodaß Wärme nur bei der höchsten Temperatur  $T_1$  der Luft, während dieselbe isothermisch expandiert, aufgenommen würde. Mit Ende der Expansion würde die Wärmeaufnahme geschlossen; die Luft expandiert adiabatisch weiter, bis ihre Temperatur die untere Grenze  $T_2$  erreicht hat.

Während der nächsten Periode würde die Luft zunächst unter Wärmeabgabe isothermisch und darauf adiabatisch komprimiert, wodurch die Anfangstemperatur  $T_1$  wieder erreicht und der Kreisprozeß geschlossen wäre.

Das Indikatordiagramm dieses Arbeitsprozesses wurde bereits früher, § 18, Fig. 12, dargestellt.

Eine Maschine, welche den Carnotschen Kreisprozeß genau befolgt, würde unter dem großen Nachteile leiden, daß das vom Kolben zu durchlaufende Volumen in Beziehung zu der geleisteten Arbeit übermäßig groß wäre. Für Gase als Arbeitssubstanz ist die Neigung der Adiabate zur Isotherme sehr gering; die Fläche des Diagrammes, bezw. die pro Umdrehung geleistete Arbeit, ist daher im Vergleiche zu den beiden Arbeiten, deren Differenz sie bildet, d. i. die Arbeit während des Anhubes und jener des Kolbenrücklaufes, sehr klein; eine solche Luftmaschine würde daher sehr voluminös und dabei mechanisch wenig leistungsfähig.

**213. Luftmaschinen mit äußerer Verbrennung und Regenerator. Stirlings Heißluftmaschine.** Die vorstehend berührten Verhältnisse bessern sich jedoch wesentlich, wenn ein Regenerator (§ 27) anstelle der adiabatischen Zustandsänderungen tritt. In Stirlings Heißluftmaschine, welche zum erstenmale einen Regenerator benützte, wurde die Arbeitsflüssigkeit von der oberen Grenztemperatur  $T_1$  auf den unteren Grenzwert  $T_2$  dadurch abgekühlt, daß sie, den Regenerator nach einer Richtung passierend, die der Temperaturdifferenz  $T_1 - T_2$  entsprechende Wärme an denselben abgab, um die auf diese Weise in dem Regenerator aufgespeicherte Wärme bei der Umkehr der Bewegung anstelle der adiabatischen Kompression von demselben wieder aufzunehmen. Dieser Kreisprozeß wurde bereits in § 28 beschrieben und das ideale Indikatordiagramm desselben in Fig. 13 dargestellt.

Stirling hat seinerzeit verschiedene Ausführungen von Luftmaschinen

entworfen, welche diesen Kreisprozeß angenähert verwirklichten; die charakteristischen Teile einer dieser Maschinen sind durch Fig. 244 im Längenschnitt dargestellt.

*A* ist der Feuertopf, ein geschlossenes von außen geheiztes Gefäß, durch welches die Luft zirkuliert und durch ein in den Deckel desselben

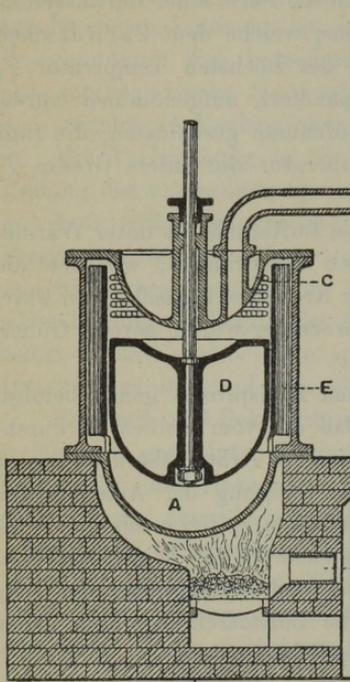


Fig. 244.

mündendes Rohr mit dem Arbeitscyliner *B* verbunden ist. Unterhalb des Deckels befindet sich der Kühler *C*, ein dünnwandiges Schlangrohr mit Wasserzirkulation. In dem cylindrischen Teile des Feuertopfes bewegt sich der sogenannte Verdränger *D*, welcher seine auf- und niedergehende Bewegung von der Maschine erhält. Befindet sich der Verdränger in seiner oberen Stellung, dann ist die Luft in dem unteren Teile des Feuertopfes angesammelt und nimmt daher in Berührung mit den glühenden Wandungen Wärme auf. In dem Maße, als sich der Verdränger nach abwärts bewegt, strömt die verdrängte erhitzte Luft nach oben und kommt hierbei in Berührung mit dem Kühler *C*. Auf dem Wege vom Boden des Feuertopfes *A* zum Deckel desselben, sowie bei der Bewegung der Luft im entgegengesetzten Sinne, ist sie gezwungen, den Regenerator *E*, welcher aus einer größeren Anzahl konzentrischer Windungen feinen Drahtgeflechtes besteht, zu durchziehen. Bei der Aufwärtsbewegung gibt die Luft Wärme an den Regenerator ab und wird hierdurch abgekühlt; bei der Abwärtsbewegung nimmt sie aus dem Regenerator die Wärme wieder auf und wird erhitzt.

Zu Beginn des Kreisprozesses befindet sich der Verdränger in seiner höchsten Stellung oder nahe derselben; die Luft nimmt Wärme bei der Temperatur  $T_1$  auf und expandiert isothermisch; es ist dies die erste Zustandsänderung des in § 28 beschriebenen Kreisprozesses.

Nun geht der Verdränger nach abwärts. Die Luft strömt, nach oben getrieben, durch den Regenerator ab, Wärme an denselben abgebend und tritt in den Raum über dem Verdränger mit der Temperatur  $T_2$  ein.

Nun bewegt sich der Arbeitskolben in  $B$ , welcher sich während der isothermischen Expansion nach aufwärts bewegt hatte, nach abwärts, hierdurch wird die Luft isothermisch komprimiert, indem die durch die Kompression frei werdende Wärme durch den Kühler  $C$  aufgenommen, beziehungsweise abgeleitet wird. Schließlich wird der Verdränger wieder nach oben bewegt, die Luft strömt neuerdings durch den Regenerator nach abwärts, nimmt die während der Aufwärtsbewegung in demselben deponierte Wärme wieder auf und erlangt die Temperatur  $T_1$ . Dies ist die vierte und letzte Zustandsänderung des Kreisprozesses § 28. Nun beginnt dasselbe Spiel von neuem.

Die wirklichen Ausführungen der Maschine Stirlings finden sich in den Patenten von R. & J. Stirling 1827 und 1840 beschrieben\*). Nach diesen Entwürfen arbeiteten die Maschinen nicht mit Luft von atmosphärischer sondern wesentlich höherer Spannung, indem zur Kompression der Luft eine eigene, an die Maschine angehängte Luftpumpe diente.

Stirlings Kreisprozeß ist theoretisch vollkommen, mag auch die Dichte der Luft welche immer sein. Die Kompression der Luft, vor ihrem Eintritt in die Maschine, erhöht keineswegs den theoretischen thermodynamischen, jedoch in hohem Maße den mechanischen Wirkungsgrad derselben; abgesehen davon wird durch die Kompression die Leistungsfähigkeit einer Maschine von gegebenen Dimensionen wesentlich erhöht, ein Umstand, welcher für die Beurteilung des Wertes der Kompression von größter Wichtigkeit ist. In Wirklichkeit wird jedoch durch die Kompression auch der thermodynamische Wirkungsgrad erhöht, indem das Verhältnis der durch Leitung und Strahlung nach außen abgegebenen, also verlorenen Wärme zur Gesamtwärme kleiner ist als bei Maschinen, welche ohne Kompression arbeiten.

Stirlings Maschinen waren außerdem doppelwirkend gebaut; der Raum über dem Kolben des Arbeitcylinders  $B$  war mit einem zweiten Feuertopf, genau so gebaut wie  $A$ , verbunden. Eine solche 50 PS-Maschine, welche 1843 in einer Gießerei zu Dundee in Betrieb stand, soll einen Wirkungsgrad von 0,3 ergeben und nur 1,7 Pfund engl. (0,77 kg) Kohle pro PS<sub>i</sub>-Stunde verbraucht haben\*\*). Die Maschine blieb drei Jahre im Betrieb, wurde jedoch dann wegen Mängel der Feuertöpfe etc. außer Dienst gestellt.

\*) Das 1827-Patent ist in genauer Kopie wiedergegeben in Fleeming Jenkins *Lecture on Gas and Caloric Engines, Inst. Civ. Eng., Heat Lectures*, 1883 bis 1884. Ebenso findet sich eine Beschreibung dieser Patente in *Min. of Proc. Inst. C. E.* 1845 und 1854.

\*\*\*) Siehe Rankines *Steam-Engine* S. 367. Der Brennmaterialverbrauch pro effektive Pferdekraftstunde war bedeutend größer.

In den Patentschriften erscheint auch eine Maschine beschrieben, deren Regenerator für sich ein eigenes Gefäß bildete. In einer anderen Maschine war der Plungerverdränger *D* so ausgebildet, daß er selbst als Regenerator diente; zu diesem Zwecke war derselbe innen mit dünnen Drahtgeflechten oder Blechabschnitzeln ausgefüllt und mit Öffnungen im Boden- oder Deckelstück versehen, durch welche die Luft bei der auf- und niedergehenden Bewegung des Verdrängers aus- und einströmte, Wärme an die Füllung desselben abgebend und wieder aufnehmend.

**214. Heißluftmaschine von Ericsson.** Der schwedische Kapitän John Ericsson, welcher sich eingehend mit der Frage der Heißluftmaschine befaßte, wendete bei seinen Maschinen eine andere Methode der Benützung des Regenerators an; er hatte jedoch mit seinen Bestrebungen in England wenig Glück und ging daher nach Amerika, wo es ihm nach vielen Mißerfolgen gelang, seine Ideen zu realisieren. Die erste große Maschine wurde auf dem Dampfschiffe „Caloric“ ausprobiert, bewährte sich jedoch nicht, weil einerseits die Heizkörper durchbrannten und andererseits die Heizfläche zu klein angenommen war. In dieser in größerem Maßstabe ausgeführten Maschine wurde die Temperatur der Arbeitssubstanz dadurch geändert, daß dieselbe den Regenerator bei konstant bleibendem Drucke durchströmte. Zu diesem Zwecke wurde die kalte Luft durch eine Pumpe in einen Receiver gepreßt, von welchem dieselbe durch den Regenerator in den Arbeitscyliner gelangte. Auf diesem Wege nahm die Luft Wärme vom Regenerator auf und expandierte. Der Arbeitscyliner war außerdem von unten geheizt, die Luft expandierte daher unter Wärmeaufnahme in demselben weiter, bis ihre Spannung nahezu auf den Druck der Außenluft gesunken war. Der Kreisprozeß wurde dadurch vollendet, daß die Luft aus dem Cylinder durch den Regenerator ausströmte. Das Indikatordiagramm dieser Maschine bildete einen Linienzug, welcher annähernd aus zwei Isothermen und zwei Kurven konstanten Druckes zusammengesetzt war\*).

Ericsson ist selbstverständlich bei diesem ersten Versuche nicht stehen geblieben; im Jahre 1855 ließ sich derselbe eine andere Konstruktion patentieren, bei welcher Arbeits- und Verteilerkolben in einem einzigen Cylinder arbeiteten. Während diese Konstruktion noch mit Regeneratoren, und zwar Röhrenregeneratoren, durch welche die Luft geleitet wurde, ausgerüstet war, trennte sich Ericsson bei seiner letzten um das Jahr 1860 bekannt gewordenen Konstruktion vom Regenerator.

\*) Bezüglich des Diagrammes der Ericssonschen Maschine sei bemerkt, daß Abbildungen hiervon in Rankines *Steam-Engine*, sowie in *Proc. Inst. of Mech. Engineers* 1873 zu finden sind.

Diese Maschine konnte als eine wesentliche Verbesserung der vorhergegangenen vom Jahre 1855 angesehen werden, da nicht nur die ganze Bauart infolge Wegfalles des Regenerators gedrungener war, sondern auch die Heizstelle, beziehungsweise der sogenannte Feuertopf in den Arbeitscylinder verlegt wurde, wodurch die sonst nach außen ausstrahlende Wärme mit nutzbar gemacht werden konnte; die Maschine wurde später von Lehmann bei Konstruktion seiner bekannten, allerdings nicht offenen, sondern geschlossenen Maschine als Grundlage benützt.

Ericsson hatte mit seinen Erfindungen kein Glück; ebensowenig vermochten die zum Teil sehr sinnreichen Konstruktionen von Wilcox, Whipple, Burdin, Bourget, Belou, Laubercan, Windhausen, Roper und anderen mehr als vorübergehende Erfolge zu erzielen und so erlosch wieder langsam das Interesse, welches man den calorischen Maschinen, namentlich zur Zeit ihres Bekanntwerdens, entgegenbrachte.

An diesen Mißerfolgen waren jedoch die Erfinder insofern selbst schuld, da sie sich nicht von dem Gedanken zu trennen vermochten, in der Heißluftmaschine einen ökonomischeren Ersatz der Dampfmaschine zu sehen, daher stets zu Ausführungen im großen drängten. Heißluftmaschinen mit äußerer Verbrennung sind jedoch für große Leistungen aus verschiedenen Gründen unpraktisch und unrationell; einerseits bereitet die Erhitzung so großer Luftmengen außerordentliche Schwierigkeiten, andererseits nehmen die Dimensionen solcher Maschinen in einer Weise zu, daß sie kaum mehr in einem Verhältnisse zur erzielten Leistung stehen. So sollen die vier Maschinen des Dampfes „Caloric“ bei einer Gesamtleistung von 600 PS<sub>e</sub> (tatsächlich leisteten dieselben nur 300 PS) 4200 mm Cylinderdurchmesser bei 1800 mm Hub gehabt haben. Durch weitgehende Kompression der Luft und Erhöhung der mittleren Dichte derselben über jene der Atmosphäre können allerdings die Dimensionen der Maschine wesentlich vermindert werden, allein die Schwierigkeiten, welche die Herstellung genügend großer Heizflächen bereitet, bleiben trotzdem bestehen, ebenso wie die stete Gefahr des Durchbrennens der bei so hohen Temperaturen der Einwirkung des Feuers ausgesetzten Teile der Maschine. Heißluftmaschinen mit äußerer Feuerung werden daher heutzutage nur mehr für sehr kleine Leistungen von einem Bruchteile einer Pferdekraft bis höchstens 3 PS<sub>e</sub> für gewerbliche und Laboratoriumszwecke aller Art, Wasserversorgungen etc. gebaut. In ihrer allgemeinen Anordnung, sowie hinsichtlich der Wirkungsweise gleichen diese kleinen Luftmaschinen modernerer Bauart dem alten Originale Stirlings.

**215. Neuere Heißluftmaschinen mit äußerer Feuerung.** Um an einigen Beispielen die Ausführung neuerer Heißluftmaschinen mit

äußerer Feuerung zu erörtern, seien aus der nicht unbedeutenden Anzahl derartiger Konstruktionen einige bekannte Typen herausgegriffen.

Fig. 245 zeigt im Längenschnitt die kleinen, namentlich für Leistungen von wenigen Kilogramm Metern bestimmten Maschinen nach dem Patente H. Robinson.

Die Maschinen arbeiten ohne Kompressionspumpe mit einer mittleren Pressung gleich jener der Atmosphäre. Zufolge der geringen Druckdifferenz ist weder eine eigene Dichtung des Kolbens, noch der übrigen mit der Arbeitsluft der Maschine in Berührung stehenden Teile der Maschine erforderlich.

Der Feuertopf *A* mit dem darüber befindlichen Cylinder dient zugleich als Verdränger. Der Arbeitscylinder *B* steht mit *A* durch den Kanal *D* in steter Verbindung; diese Verbindung wird durch eine im Boden des Arbeitscylinders befindliche, in der Zeichnung nicht ersichtliche zentrale Öffnung hergestellt. Der Feuertopf *A* wird von außen durch eine Koksfeuerung *C* oder durch einen Bunsenbrenner erhitzt. Der Verdrängerkolben *E* erhält seine auf- und niedergehende Bewegung von dem Schwinghebel *F*, welcher durch eine kurze Lenkerstange mit dem Kurbelzapfen verbunden ist. Der Verdrängerkolben läuft infolge dieser Bewegungsübertragung dem Arbeitskolben um ungefähr  $90^\circ$  vor; in der Figur ist ersterer in seiner tiefsten Stellung, während der Arbeitskolben noch seinen halben Hub zu vollenden hat. Der Verdrängerkolben *E* bildet zugleich den Regenerator; derselbe ist derart gebaut, daß die Luft, in gleicher Weise wie bei den Originalkonstruktionen Stirlings, durch denselben nach auf- und abwärts hindurchstreichen kann. Der Verdränger-

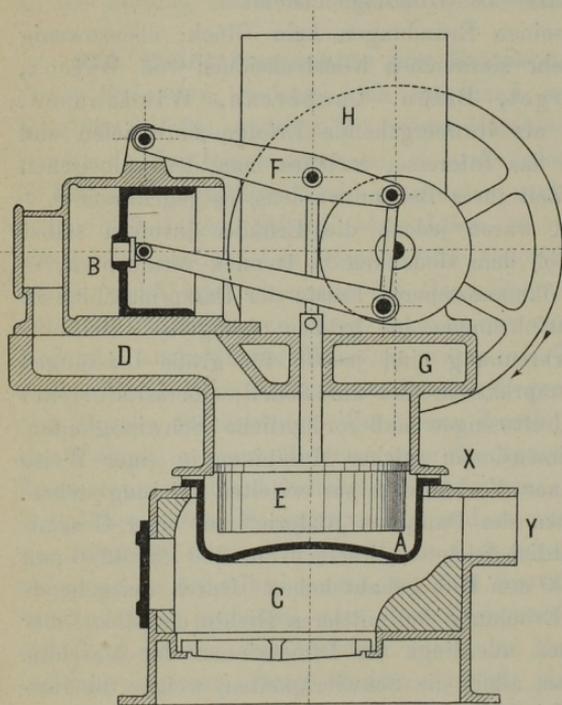


Fig. 245.

Der Feuertopf *A* wird von außen durch eine Koksfeuerung *C* oder durch einen Bunsenbrenner erhitzt. Der Verdrängerkolben *E* erhält seine auf- und niedergehende Bewegung von dem Schwinghebel *F*, welcher durch eine kurze Lenkerstange mit dem Kurbelzapfen verbunden ist. Der Verdrängerkolben läuft infolge dieser Bewegungsübertragung dem Arbeitskolben um ungefähr  $90^\circ$  vor; in der Figur ist ersterer in seiner tiefsten Stellung, während der Arbeitskolben noch seinen halben Hub zu vollenden hat. Der Verdrängerkolben *E* bildet zugleich den Regenerator; derselbe ist derart gebaut, daß die Luft, in gleicher Weise wie bei den Originalkonstruktionen Stirlings, durch denselben nach auf- und abwärts hindurchstreichen kann. Der Verdränger-

cylinder ist nach oben durch den Kühler *G* abgeschlossen; die Kühlung erfolgt durch beständige Wasserzirkulation, indem der Hohlraum von *G* mit dem Wasserbehälter *H* in offener Verbindung steht. Unter Bezug auf den an früherer Stelle erörterten Kreisprozeß der Stirlingmaschine, welchen die vorliegende Luftmaschine gleichfalls befolgt, erscheint eine weitere Besprechung der Wirkungsweise derselben überflüssig.

Eine Eigentümlichkeit der Robinsonmaschine, welche in Anbetracht der kleinen Leistungen, für welche heutzutage Heißluftmaschinen nur mehr Verwendung finden und der zumeist mangelhaften Wartung derselben als ein Vorteil hervorgehoben werden muß, ist das gänzliche Fehlen jeder Packung, aller Ventile und Stopfbüchsen; dieser Vorteil wird allerdings nur dadurch erreicht, daß die Maschine ohne Kompression arbeitet, daher sowohl ihre Leistungsfähigkeit, als auch ihr Wirkungsgrad sehr enge Grenzen nicht überschreiten kann.

Eine andere Konstruktion, welche der Hauptsache nach, jedoch nicht vollkommen, den Kreisprozeß Stirlings befolgt, ist die durch Fig. 246 im Längenschnitte dargestellte Heißluftmaschine von Rider.

In dieser bekannten und vielfach ausgeführten Maschine sind *A* und *B* zwei oben offene Cylinder, deren Plungerkolben *C* und *D* an zwei unter nahezu  $90^\circ$  versetzten Kurbeln angehängt sind. Die beiden Cylinder sind durch den Regenerator *H* verbunden. Der untere Teil des Cylinders *C* ist von einem Kühlmantel *E*, durch welchen Wasser zirkuliert, konzentrisch umgeben. Der untere Teil des anderen Cylinders *B* ist mit dem Feuertopfe *F* in den Ofen eingehängt, wodurch die in dem Zwischenraume *G* unterhalb des Plungers *D* eingeschlossene, mit den glühenden Wandungen des Feuertopfes in Berührung tretende Luft erhitzt wird.

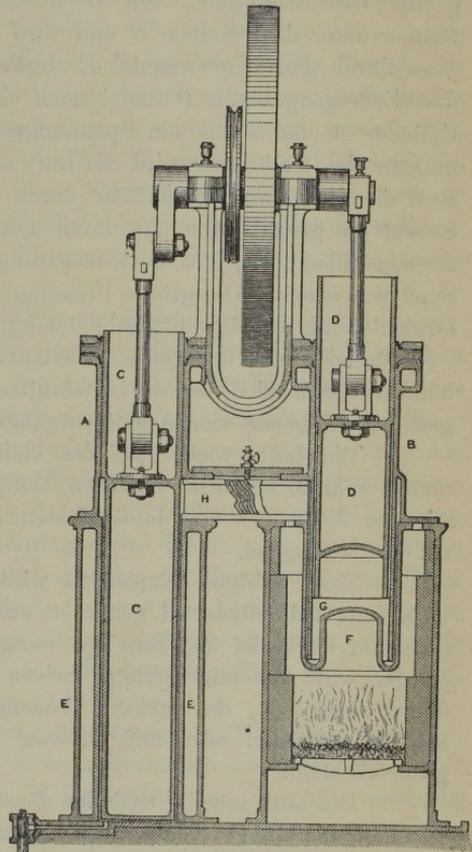


Fig. 246.

In der durch Fig. 246 dargestellten gegenseitigen Stellung der beiden Kolben steht *C* in seiner tiefsten Lage, um den Anhub zu beginnen, während *D* in der Aufwärtsbewegung begriffen ist. Nahezu die ganze Menge der Arbeitsluft war im Raume *G* komprimiert, expandiert in dem Maße, als dieselbe Wärme aufnimmt, Arbeit auf den Kolben *D*, sowie auf den Kolben *C* übertragend. Während dieser Periode erreicht *D* seine höchste Stellung, während sich *C* ungefähr in der Mitte des Hubes befindet; die Luft strömt nun infolge des rasch anwachsenden Volumens mit großer Geschwindigkeit von *G* durch den Regenerator *H* nach dem Raume unter dem Kolben *C* und wird zuerst durch den Regenerator und dann durch den Wassermantel *E* abgekühlt. Während der ersten Periode des Niederganges von *D* findet noch ein Überströmen der Luft nach dem Cylinder *A* und somit ein Spannungsabfall statt. Nach der Bewegungsumkehr des Kolbens *C* wird die Luft unter demselben komprimiert, während die frei gewordene Wärme durch den Kühler *E* aufgenommen wird. Sobald die ganze Luftmenge durch den Regenerator nach dem Feuertopfe zurückgeschafft ist, um dort neuerdings erhitzt zu werden, beginnt das Spiel von neuem. Die größte Pressung, welche während des Kreisprozesses erreicht wird, beträgt ungefähr 1,4 kg/qcm.

Obleich sich der ganze Arbeitsprozeß ohne Unterbrechung vollzieht, können doch auf Grund der vereinigten Bewegung beider Kolben im allgemeinen folgende vier Arbeitsvorgänge unterschieden werden:

1) Die Luft, vorher auf das kleine Volumen *G* zusammengedrückt, nimmt Wärme bei ihrer höchsten Temperatur auf und expandiert, Arbeit auf den Kolben *D* und infolgedessen auch bis zu einem gewissen Grade auf *C* übertragend.

2) Nach erfolgter Expansion wird die Luft durch den Regenerator nach dem Kaltcylinder *A* gedrängt, auf diesem Wege Wärme an den Regenerator abgebend und ihre Spannung verlierend. Während dieses Vorganges wird nur sehr geringe Arbeit an die Luft übertragen oder von dieser abgegeben, da sich die Wirkungen der beiden Kolben *D* und *C* nahezu aufheben, oder mit anderen Worten, das Volumen völlig un geändert bleibt.

3) Die Luft, nun im Cylinder *A* auf ein größeres Volumen ausgedehnt und auf die untere Temperatur abgekühlt, wird beim Niedergange des Kolbens *C* zusammengedrückt, Wärme an den Kühler *E* abgebend. Während dieses Vorganges wird Arbeit an die Luft seitens der Maschine abgegeben.

4) Die gepreßte Luft wird unter Wärmeaufnahme durch den Regenerator nach *G* gedrückt, infolgedessen nehmen Temperatur und Spannung zu. Während dieser Periode wird gleichfalls wenig Arbeit von der Luft geleistet, noch an dieselbe abgegeben.

Die Ridermaschine unterscheidet sich von der eigentlichen Stirlingmaschine dadurch, daß ihr Verdränger gleichzeitig auch als Arbeitskolben dient. Die Maschine hat mancherlei Vorzüge; besonders erwähnenswert ist das im Vergleiche mit anderen Maschinen sehr einfache Getriebe, sowie das bequeme, ohne Auseinandernehmen mögliche Nachdichten der Kolben. Zur Dichtung dienen, wie aus Fig. 246 ersichtlich, Lederstulpe. Allerdings bringt die Anwendung zweier Cylinder den Nachteil mit sich, daß durch zwei Kolben auch zwei Undichtheitsquellen geschaffen sind.

Der Regenerator ist aus einer größeren Anzahl parallel gestellter gußeiserner Platten gebildet, die zwischen sich Spalten von etwa 2 mm Weite lassen. Durch einen abnehmbaren Deckel können die Platten, die bei geschlossenen Maschinen nicht so rasch verschmutzen als Drahtbündel, Drahtgeflechte u. dgl., leicht herausgenommen und gereinigt werden. Der auf diesem Deckel befindliche Hahn (Ventil) dient zum Abstellen der Maschine; öffnet man denselben, dann bläst die heiße Luft ab und die Maschine bleibt stehen. Am Kaltluftcylinder ist ein Schnarchventil angebracht, das sich öffnet, sobald Luftmangel eintritt und die Spannung unter jene der Außenluft sinkt.

Die Ridermaschine hat namentlich zur Wasserförderung für landwirtschaftliche und häusliche Zwecke in Größen bis etwa 3 PS eine ziemlich verbreitete Verwendung gefunden. Der mechanische Wirkungsgrad, d. i. das Verhältnis der effektiven zur indizierten Arbeit, ist, wahrscheinlich zufolge der doppelten Lederstulpdichtung, verhältnismäßig sehr gering und bewegt sich je nach der Größe der Maschine zwischen den Grenzwerten 0,35 bis 0,45. Der Verbrauch an Brennstoff stellt sich ungefähr jenem einer gleich leistungsfähigen Dampfmaschine gleich und beträgt 4 bis 6 kg Gaskoks pro PS<sub>e</sub>-Stunde; dabei arbeiten die Maschinen mit 150 bis 100 minutlichen Umdrehungen. Nach den von dem Verfasser an mehreren Ridermaschinen vor Jahren durchgeführten Leistungsversuchen beträgt die mittlere Spannung im Heißluftcylinder *B* durchschnittlich 0,85 bis 0,88, jene im Kaltluftcylinder *A* 0,40 bis 0,44 kg/qcm.

Eine der besten und seinerzeit beliebtesten Konstruktionen einer geschlossenen Heißluftmaschine mit äußerer Feuerung ist die im Jahre 1868 bekannt gewordene Maschine von W. Lehmann. Die Maschine vereinigt Arbeitskolben und Verdränger in einem einzigen, bei älteren Maschinen liegend, bei neueren Maschinen stehend angeordneten Cylinder. Diese Anordnung bedingt, daß die Kolbenstange des im heißen Teile des Cylinders spielenden Verdrängers durch den Arbeitskolben hindurch und mittels Stopfbüchse gedichtet sein muß. Für die Dichtung des im kühlen Teile des Cylinders spielenden Arbeitskolbens genügt ein einfacher Lederstulp. Der Verdränger liegender Maschinen wird auf Rollen geführt, um die

gleitende Reibung durch rollende zu ersetzen. Die Bewegungsübertragung vom Arbeitskolben auf die Kurbel und umgekehrt von dieser zurück auf den Verdränger erfolgt durch ein aus Hebeln und Lenkstangen gebildetes Getriebe und gehört in Anbetracht der geringen Leistungen und zumeist nicht genügend aufmerksamen Wartung dieser Maschinen mit zu den Schattenseiten derselben. Um die Erneuerung des Lederstulpes des Kolbens sowie ein Nachstellen der Führungsrollen ohne Demontierung der Kurbelwelle vornehmen zu können, wurde dieselbe bei den liegenden Maschinen auf den Rücken derselben gelegt; später hat man jedoch diesen Vorteil wieder aufgegeben.

Die Regulierung dieser, sowie der geschlossenen Maschinen überhaupt, ist wohl einer der schwächsten Punkte derselben, da die Veränderung der Nutzleistung durch Vernichtung eines Teiles der indizierten Arbeit erfolgt, und zwar in der Weise, daß man entweder durch ein vom Regulator eingestelltes Ventil bei zu raschem Gange der Maschine Luft aus derselben entweichen läßt oder durch eine Bremse die Arbeit zum Teil direkt abbremsst. Im ersteren Falle wird dann die Luft durch ein Schnarchventil wieder ersetzt.

Der Zug soll so reguliert werden, daß der Feuertopf stets dunkel rotglühend erhalten bleibt.

Eine andere geschlossene Heißluftmaschine, welche hinsichtlich der Bauart sehr viel Ähnlichkeit mit der Lehmannschen Maschine besitzt, ist die im Jahre 1877 bekannt gewordene Heißluftmaschine von O. Stenberg. Diese Maschine wurde gleichfalls in liegender, größtenteils jedoch in stehender Ausführung gebaut und unterschied sich im wesentlichen von der Lehmannschen Maschine nur durch die vereinfachte Verdrängerbewegung, sowie durch die zweckmäßigere Form des Feuertopfes. Verdränger und Arbeitskolben arbeiten auch hier in ein und demselben Cylinder, infolgedessen geht die Stange des Verdrängers wie bei der Lehmannschen Maschine durch eine Stopfbüchse des Arbeitskolbens hindurch. Zur Bewegung des Verdrängers dient ein Winkelhebel, dessen einer Arm an der Stange des Verdrängers angreift, während der andere Arm, als Coulisse ausgebildet, von einer excentrisch am Schwungrade befestigten Rolle auf- und abwärts bewegt wird, wobei die Rolle, welche die Stelle eines Zapfens vertritt, in der Coulisse hin- und hergleitet. Der Arbeitskolben ist an die über dem Cylinder gelagerte gekröpfte Kurbelwelle durch zwei Schubstangen angehängt, während die Verdrängerstange zwischen diesen beiden Schubstangen durch die Mitte des Kolbens hindurchgeht. Die obere Partie des Arbeitscylinders, in welcher sich der durch einen Lederstulp gedichtete Kolben bewegt, ist wie bei Lehmanns Maschine durch einen konzentrischen Wassermantel gekühlt.

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

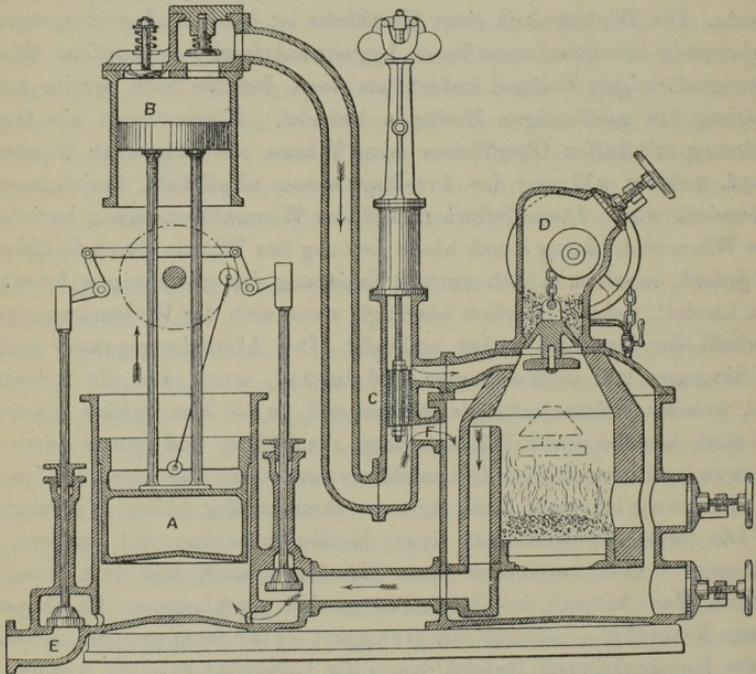


Fig. 247.

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 Cyylinderfüllung 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.