

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

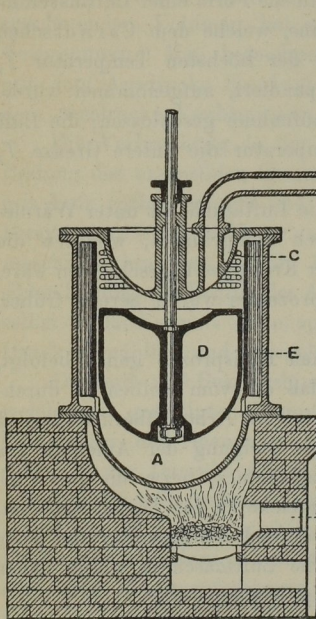
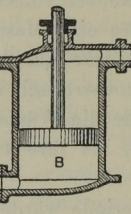


Fig. 244.

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.



mündendes Rohr mit dem Arbeitscyliner *B* verbunden ist. Unterhalb des Deckels befindet sich der Kühler *C*, ein dünnwandiges Schlangrohr mit Wasserzirkulation. In dem zylindrischen 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



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>1</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.