

viel niedriger wäre als  $0^{\circ}$  C, daß die Wärme von dem zu gefrierenden Wasser mit genügender Schnelligkeit auf die Arbeitsflüssigkeit übergeht.

**72. Umgekehrte Joulemaschine. Die Bell-Colemankältemaschine.** Es wurde bereits früher (§ 68) diese Umkehrung der Joulemaschine mit der Bemerkung erwähnt, daß nach diesem Arbeitsprinzip gebaute Maschinen an Bord von Ozeandampfern vielfach benützt wurden und auch heute noch benützt werden, um in den Räumen für die Aufbewahrung des Fleisches entsprechende Kälte zu erzielen. Die Maschine wirkt in der Weise, daß sie aus der Kältekammer Luft ansaugt, diese komprimiert, die Kompressionswärme durch einen Kühler so weit als möglich entzieht und dann die Luft auf die Spannung in der Kammer expandieren läßt; die Temperatur derselben ist nun niedriger wie jene der Luft in der Kammer, infolge der Wärmeabfuhr während der Kompression. Die auf diese Weise abgekühlte Luft wird in die Kammer zurückgeleitet und im Wege dieses kontinuierlich fortgesetzten Prozesses die Temperatur in der Kammer trotz der fortwährenden Wärmeleitung von außen hinreichend kalt erhalten. Die Wände der Kältekammer sind mit einer dicken Schicht eines schlecht wärmeleitenden Stoffes überzogen, um die für die Kälteerzeugung erforderliche Arbeit so weit als möglich zu reduzieren. Die Skizze Figur 36 zeigt den schematischen Zusammenhang der Organe einer solchen Maschine.  $C$  ist die kalte Kammer, deren Inneres atmosphärische oder eine hiervon wenig verschiedene Spannung besitzt.  $A$  ist der Kühler, bestehend aus einem System enger von zirkulierendem Wasser umgebener Röhren. Die Kompression findet in  $M$ , die Expansion in  $N$  statt.  $M$  nimmt Luft aus  $C$  von der Temperatur  $T_2$  während des Aushubes und komprimiert dieselbe während eines Teiles des Einhubes, bis die Spannung des Kühlers  $A$  erreicht ist. Diese beiden Operationen stellen die Linien  $fc$  und  $cb$  des Indikatordiagrammes Figur 37 dar. Die Kompression  $cb$  hat die Erhöhung der Temperatur über jene von  $A$  zur Folge; wenn nun die Pumpe  $M$  die komprimierte Luft während des restlichen Einhubes  $bc$  nach  $A$  schafft, fällt die Temperatur derselben und eine Wärmemenge

$$C_p(T_b - T_a)$$

wird an  $A$  abgegeben, wenn  $T_b$  die Endtemperatur der Kompression und  $T_a$  (statt  $T_1$ ) die Temperatur des Kühlers  $A$  ist. Während dieses Prozesses entnimmt der Cylinder  $N$  eine gleiche Luftmenge von der Temperatur  $T_a$  oder  $T_1$  aus  $A$  und expandiert dieselbe auf die Spannung der Kammer  $C$ ; diese beiden Operationen sind im Diagramm durch die Linien  $ea$  und  $ad$  dargestellt. Mit Ende der Expansion ist die Temperatur der

Luft  $T_a$  niedriger wie die Temperatur  $T_c$  oder  $T_2$  in der kalten Kammer  $C$ . Schließlich wird die in  $N$  abgekühlte Luft während des Rückhubes von  $N$  nach  $C$  geschafft; diese Operation ist durch die Linie  $df$  des Diagrammes ausgedrückt.  $fcbe$  ist daher das Diagramm der an die Pumpe  $M$  abgegebenen Arbeit;  $eadf$  ist das Diagramm der im Expansionscylinder  $N$  wiedergewonnenen Arbeit;  $badc$  ist daher das Diagramm der an die Maschine abgebenen Nettoarbeit. Der Nettobetrag der von der kalten

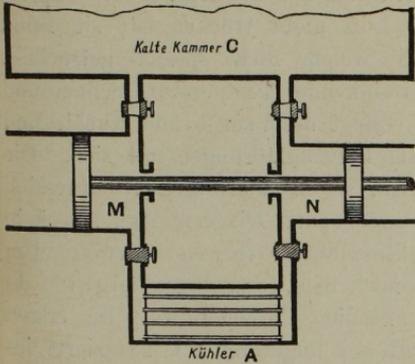


Fig. 36. Organe der Bell-Colemankältemaschine.

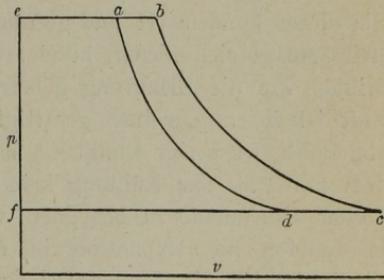


Fig. 37.

Kammer entnommenen Wärme ist  $c_p(T_c - T_a)$ . Nimmt man die Prozesse  $cb$  und  $ad$  als adiabatisch an, dann ist das Expansionsverhältnis in  $N$  gleich dem Kompressionsverhältnis in  $M$  und daher ist  $\frac{T_a}{T_d} = \frac{T_b}{T_c}$ , wie wir bereits bei Besprechung des Kreisprozesses von Joule (§ 68), von welchem vorliegender Fall nur eine einfache Umkehrung ist, gesehen haben. Es ist somit

$$\frac{Q_A}{Q_C} = \frac{T_a}{T_d}$$

und der Leistungskoeffizient

$$\frac{Q_C}{Q_A - Q_C} = \frac{T_d}{T_a - T_d'}$$

ein Wert kleiner als  $\frac{T_2}{T_1 - T_2}$ , weil Joules Maschine einen kleineren Wirkungsgrad ergibt als Carnots Maschine.

In Wirklichkeit ist die Kompression in  $M$  nicht adiabatisch, nachdem durch die Anwendung eines Wassermantels oder direkter Wasserspritzung in den Cylinder ein Teil der Kompressionswärme abgeführt wird, bevor die Luft in den Kühler  $A$  gelangt; die Kompression folgt

daher einer Kurve, welche zwischen einer Adiabate und Isotherme liegt. Dies bringt den thermodynamischen Vorteil mit sich, daß ein Teil der Wärme bereits bei einer niedrigeren Temperatur entzogen wird, als in dem Falle vollständiger Kompression vor Beginn der eigentlichen Kühlung in *A*. Dieser Vorteil gipfelt daher in einer Verminderung der abgegebenen Arbeit, nachdem die Kompressionslinie von *c* aus weniger steil ansteigt als die Adiabate *cb*.

Kältemaschinen dieser Type haben mit der Schwierigkeit zu kämpfen, daß die als Arbeitssubstanz benützte Luft **nicht trocken** ist; sie führt Wasserdampf mit sich, wie jede Luft, welche nicht speziell getrocknet ist; dieser kondensiert und gefriert bei sinkender Temperatur; Schnee und Reif schlägt sich nieder, besetzt und verlegt die Ventile und Kanäle und bringt, wie die Erfahrung gelehrt hat, Betriebsstörungen mit sich. Die Luft ist im allgemeinen gesättigt, wenn sie nach erfolgter Kompression abgekühlt wird (im Punkte *a* des vorstehenden Diagrammes), selbst in dem Falle, als zur Kühlung kein Injektionswasser verwendet wurde. Um diesem Übelstande zu begegnen, wird nach den Vorschlägen Lightfoots in London die Expansion in zwei Stadien durchgeführt. Im ersten Stadium wird die Temperatur der Luft auf ungefähr  $0^{\circ}$  C reduziert; infolgedessen schlägt sich der größte Teil des Dampfes als Wasser nieder und wird entfernt; im zweiten Stadium wird die Expansion vervollständigt, wobei sich nur mehr ein sehr geringer Niederschlag bildet. Baulich wird diese Teilung der Expansion durch zwei Compoundexpansionscylinder in der Weise durchgeführt, daß im ersten Cylinder die erste Periode, im zweiten Cylinder die zweite Periode der Expansion vollzogen wird. In diesen Lightfootschen Maschinen wird die Expansion im ersten Cylinder bis auf durchschnittlich  $5^{\circ}$  C, bei einem Drucke von ungefähr  $2-2\frac{1}{2}$  Atmosphären, im zweiten Cylinder bis nahe dem Atmosphärendruck bei einer Endtemperatur von  $-40$  bis  $-45^{\circ}$  C getrieben; bei neueren Konstruktionen wird nahezu absolute Trockenheit der Luft erzielt.

In der Maschine von Bell-Coleman wird die komprimierte Luft zuerst durch Wasser abgekühlt, indem sie den Kühler passiert und dann durch Röhren geleitet, welche außen dem Einflusse der kalten Luft aus der Kammer ausgesetzt sind; dadurch verliert die Luft ihren Feuchtigkeitsgehalt vor der Expansion. Bei den Luftexpansionsmaschinen wird somit durch die Abkühlung der Luft im komprimierten Zustande und die Expansion derselben in einem zweiten Cylinder die Luft auf jene hohen Kältegrade gebracht. Die zum Komprimieren der Luft erforderliche Arbeit wird zum Teil von einer Dampfmaschine (oder einer anderen Wärmekraftmaschine), zum Teil von der im Expansionscylinder arbeitenden Luft

geleistet, so daß also ein Teil der im Kompressionscylinder verwendeten Arbeit (ca. 60 %) im Expansionscylinder wieder nutzbar gemacht wird.

Die kalte Luft wird in gut isolierten Röhren den zu kühlenden Räumen zugeführt. Da der Kompressionscylinder die Luft wieder aus den Kühlräumen ansaugt, so entsteht in denselben ein beständiger starker Luftwechsel; die Luft wird durch das Einspritzen von Wasser in den Cylinder gewaschen, durch den hohen Kältegrad von jeder Feuchtigkeit befreit; den Kühlräumen wird daher nur nahezu absolut trockene, reine Luft zugeführt\*).

Die vorhin erwähnte Anordnung von in kalter Luft gekühlten Röhren behufs Trocknung der Arbeitsluft wird bei Colemanmaschinen von einzelnen Firmen angewendet, während andere Fabrikanten sich mit einer mechanischen Trennung der Luft von dem durch die Abkühlung derselben gebildeten Wasser begnügen. Wenn die in den Expansionscylinder gelangende Luft nur gesättigt ist und kein mechanisch beigemengtes Wasser enthält, dann ist auch der Niederschlag an Schnee nicht so bedeutend, daß daraus Belästigungen des Betriebes erwachsen würden.

Der wirkliche Leistungskoeffizient der Luftexpansionsmaschinen ist viel kleiner als der Koeffizient jener Maschinen, welche als Arbeitssubstanz eine verdampfbare Flüssigkeit wie Ammoniak u. dergl. benützen. Es ist dies einerseits durch den verhältnismäßig großen Arbeitsverlust der Luftexpansionsmaschinen infolge der bedeutenden Reibungen und andererseits durch den Umstand begründet, daß dieselben mit einem viel größeren Temperaturintervall arbeiten müssen, als der Abkühlung entspricht. Um die Dimensionen der Maschine innerhalb praktischer Grenzen zu erhalten, muß die Luft durch die Expansion auf eine Temperatur gebracht werden, welche viel tiefer ist als jene der kalten Kammer (wie vorhin bemerkt — 40 bis — 45° C), und umgekehrt muß die Kompression soweit getrieben werden, daß deren Endtemperatur beträchtlich höher liegt wie die Temperatur des Kühlwassers. Wird hingegen als Arbeitssubstanz eine Flüssigkeit benützt, welche abwechselnd verdampft und kondensiert wird, dann erfolgt die Wärmeaufnahme und Abgabe viel rascher. Der Wirkungsgrad der Verdampfungsmaschinen nähert sich daher viel mehr dem idealen Wirkungsgrad einer Kältemaschine und der Leistungskoeffizient einer

\*) Ausführliche Beschreibungen der Konstruktion dieser Maschinen, sowie der Art und Weise ihrer Anwendung siehe Coleman, *Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol. LXVIII, 1882, S. 146, sowie Lightfoot, *Proc. Inst. Mech. Eng.* 1881 und 1886. Ferner *Eis- und Kälteerzeugungsmaschinen* von G. Behrend, Halle, 1900; *Howards Lectures on the Mechanical Production of Cold*, von Prof. Ewing, *Journ. Society of Arts*, 1897, sowie die an früherer Stelle erwähnte Publikation von Dr. Kirk. Dr. Lorenz, *Neuere Kühlmaschinen*, München 1896; sowie zahlreiche Arbeiten in der *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, etc.

Ammoniakmaschine ist nach den Erfahrungen der Praxis ungefähr fünfmal so groß wie jener der Luftexpansionsmaschinen.

**73. Umkehrung der Wärmemaschine zur Erzeugung von Wärme.** Lord Kelvin hat bereits im Jahre 1852 nachgewiesen, daß der umgekehrte Kreisprozeß der Wärmemaschine nicht nur als ein Mittel zur Erzeugung von Kälte, sondern auch zur Erzeugung von Wärme benützt werden kann\*), z. B. um die Temperatur eines Zimmers höher zu erhalten, als die Temperatur der umgebenden Luft. Dies kann durch eine Maschine der Bell-Colemantype dadurch erreicht werden, daß dieselbe aus der Atmosphäre Luft ansaugt und diese zunächst soweit expandiert, daß die Temperatur etwas vermindert wird; die Temperatur wird sodann durch Wärmeleitung von außen wieder erhöht und die Luft durch Kompression auf atmosphärische Spannung gebracht; hierdurch steigt die Temperatur derselben über jene der Außenluft. Die auf diese Weise erwärmte Luft wird nun in den Raum geleitet, welcher geheizt werden soll. Das Resultat gipfelt also darin, daß durch Ausgabe mechanischer Arbeit eine gewisse Wärmemenge von der kalten Atmosphäre in einen wärmeren Raum geschafft wird, eine Wärmemenge, welche viel größer sein kann, als das Wärmeäquivalent der zum Betriebe der Maschine verbrauchten Arbeit; denn die an den Raum  $A$  abgegebene Wärme  $Q_A$ , eine reversible Maschine vorausgesetzt, verhält sich zu der der Atmosphäre entzogenen Wärme  $Q_C$  wie die absolute Temperatur  $T_1$  zu  $T_2$  und

$$\frac{Q_A}{W} = \frac{Q_A}{Q_A - Q_C} = \frac{T_1}{T_1 - T_2},$$

wenn  $W$  die in Wärmeeinheiten ausgedrückte ausgegebene Arbeit bedeutet. Bei geringem Temperaturunterschied kann  $Q_A$  das Vielfache von  $W$  sein, d. h. die Erwärmung einer großen Luftmenge um ein geringes Maß erfordert verhältnismäßig wenig mechanische Arbeit; es kann somit bei Verwendung einer Wärmemaschine die zum Erwärmen einer gegebenen Luftmenge erforderliche Arbeit durch eine geringere Wärmemenge erreicht werden, als zum direkten Erwärmen jener Luftmenge erforderlich sein würde, vorausgesetzt, daß die Temperaturdifferenzen der Erwärmung kleiner sind als jene, innerhalb welcher die Wärmemaschine behufs Erzeugung der erforderlichen Leistung arbeitet. Die Erwärmung von Räumen um wenige Grade durch direkte Heizung ergibt eine äußerst mangelhafte Ausnützung des Brennmaterials, selbst wenn vorausgesetzt werden könnte,

\*) *Proc. of the Phil. Soc. of Glasgow*, Vol. III, S. 269 oder *Gesammelte Schriften*, Vol. I, S. 515.