

wenn sie gegen Wärmeaufnahme von außen geschützt ist; denn beim Übergange des Salzes aus dem festen in den flüssigen Zustand wird Wärme durch dasselbe gebunden, welche eben dem Wasser entzogen wird. Auf diese Weise sinkt die Temperatur der Lösung um so tiefer, je stärker der Salzgehalt derselben, also je gesättigter sie ist. Der „Kühler“ A , also der relativ warme Körper, wird gewöhnlich durch Wasserzirkulation so kühl als möglich erhalten, indem durch das Wasser die von der Arbeitsluft an A abgeführte Wärme aufgenommen wird. Dies ist dem Wesen nach der Prozeß der Eismaschinen, nur mit dem Unterschiede, daß der Kreisprozeß der einzelnen Operationen nicht eine Umkehrung des Carnotschen, sondern mehr angenähert des Kreisprozesses von Clausius ist und als Arbeitssubstanz nicht Luft, sondern eine verdampfbare Flüssigkeit (schweflige Säure, Ammoniak, Kohlensäure und Chlormethyl) verwendet wird.

Eine Maschine, welche atmosphärische Luft als Arbeitsflüssigkeit benützen und Carnots Prozeß befolgen würde, würde außerordentlich schwer und voluminös. Die Größe derselben kann jedoch dadurch wesentlich reduziert werden, daß man an Stelle der adiabatischen Zustandsänderungen des Carnotschen Prozesses einen Regenerator wie in Stirlings Maschine anwendet. Kältemaschinen dieser Art mit Luft als Arbeitssubstanz und Regenerator wurden zuerst von Dr. A. C. Kirk eingeführt und seinerzeit vielfach benützt*). Die Arbeitsluft war vollständig eingeschlossen, also durchaus im Zustande der Kompression, so daß selbst die kleinste Pressung derselben höher war als der Atmosphärendruck. Dies hatte zur Folge, daß eine größere Luftmenge bei jeder Umdrehung der Maschine den Kreisprozeß der Operationen passierte, wodurch die Leistungsfähigkeit einer Maschine von gegebenen Dimensionen erhöht wurde.

Diese Type von Kältemaschinen hat sich nicht dauernd bewährt und jene Maschinen, welche heute noch Luft als Arbeitsflüssigkeit benützen, arbeiten nach dem umgekehrten Kreisprozeß von Joule, wie in dem nachfolgenden § 72 beschrieben.

70. Verdampfungskältemaschinen mit Kompressor. Die Kältemaschinen moderner Bauart benützen, wie bereits erwähnt, als Arbeitssubstanz statt atmosphärischer Luft eine Flüssigkeit und deren Dämpfe und beruht die Wirkungsweise dieser Maschinen auf der abwechselnden Verdampfung der Flüssigkeit bei niedrigem Druck und Kondensation der-

*) Siehe Kirk, „*On the Mechanical Production of Cold*“, *Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol. XXXVII, 1874. Ebenso „*Lectures on Heat and its Mechanical Applications*“, daselbst 1884.

selben unter verhältnismäßig hohem Drucke; es wird somit die molekulare Zustandsänderung beim Übergang des Körpers aus der flüssigen in die Dampfform, wegen der großen dabei gebundenen Wärme, der Verdampfungswärme, benutzt. Man nennt diese Maschinen daher Verdampfungsmaschinen.

Am geeignetsten zur Erzeugung der Kälte in diesen Maschinen sind Flüssigkeiten mit tiefliegendem Siedepunkte; die Wirkung derselben beruht darauf, daß die zur Verdampfung erforderliche Wärme dem sie umgebenden Körper, der Kälteflüssigkeit, in der Regel entzogen, dieser hierdurch auf die erforderliche Kältetemperatur gebracht wird. Damit man die verdampfte Flüssigkeit in der Maschine wieder benutzen kann, dieselbe daher nicht als Dampf entweicht, ist es Aufgabe der Kältemaschine, den verdampften Körper wieder in den flüssigen Zustand zurückzuführen und die dabei freiwerdende latente Wärme mittelst Kühlwasser abzuleiten.

Bezüglich der Zurückführung des Gases in den flüssigen Zustand werden zwei Verfahren eingeschlagen: das Gas wird entweder durch Absorption verdichtet, d. h. durch Lösung desselben in Wasser oder einer anderen Flüssigkeit, oder es wird durch Kompression und Kühlung verflüssigt, d. h. es wird durch Ausübung mechanischen Druckes mittelst Kompressionspumpe in einen Kondensator gedrückt, in welchem es sich infolge des Druckes und unter dem Einflusse des Kühlwassers niederschlägt. Man unterscheidet demnach Verdampfungsmaschinen mit Absorptionsapparat und Verdampfungsmaschinen mit Kompressor.

Eine der zuerst verwendeten Flüssigkeiten war Schwefeläther; diese Maschinen waren jedoch sehr massig und konnten nicht zur Erzeugung großer Kälte benützt werden, weil der Überdruck des Schwefelätherdampfes bei 15° C. Kälte nur ca. 0,088 kg/qcm beträgt, und das Verdampfen dieser Flüssigkeit bei einer Temperatur, welche ungefähr so tief liegt, im Verhältnisse zur Leistung der Maschine ungewöhnlich große Cylinder erfordert. Hierdurch wird die Maschine nicht nur räumlich groß und schwer, somit teuer, sondern erfordert auch eine bedeutende Leergangsarbeit; andererseits ist bei so geringen Spannungen der Überdruck von außen, also das Bestreben der Luft, in den Cylinder etc. zu gelangen, sehr bedeutend, ein Umstand, der mit gegen die Verwendung dieser Maschinen spricht. Die heutzutage verwendeten Flüssigkeiten sind Kohlensäure, Ammoniak, schweflige Säure und Chlormethyl. Mit Ammoniak ist es leicht, so tiefe Temperaturen zu erreichen, als für die gebräuchlichen industriellen Zwecke der Kälteerzeugung erforderlich ist; die Spannungen sind hinreichend hoch, ohne übermäßig zu sein und der ganze Apparat ist sehr kompakt; das Ammoniak ist daher die am meisten verwendete Flüssigkeit und die Ammoniakverdampfungsmaschinen sind infolgedessen sehr beliebt geworden.

Wasserfreies Ammoniak siedet bei atmosphärischem Druck bei $-38,5^{\circ}\text{C}$.; die latente Wärme desselben beträgt bei atmosphärischem Druck 315 Cal., das spezifische Gewicht verglichen mit Luft = 1 ist 0,597. Die Spannung beträgt in Atmosphären Überdruck

| | | | | |
|--|-------|-------|-------|--------|
| 0,84, | 1,29, | 1,83, | 2,46, | 3,21, |
| bei Temperaturen in C° | | | | |
| - 20 | - 15 | - 10 | - 5 | und 0. |

Zur Erzeugung von Eis bedürfen diese Verdampfungsmaschinen einer bis unter 0°C . gekühlten Flüssigkeit mit tief liegendem Gefrierpunkte, in welche die Gefäße mit dem zu gefrierenden Wasser gestellt werden; man verwendet hierzu, wie an früherer Stelle erwähnt, eine Lösung aus Kochsalz oder Chlorkalcium in Wasser. Der Gefrierpunkt der Kochsalzlösungen beträgt bei Lösungen von

| | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----------------------------|
| 1, | 2, | 4, | 6, | 10 | und | 20 % an Kochsalz |
| - 0,8 | - 1,5 | - 3,0 | - 4,5 | - 7,4 | und | - 14,4 $^{\circ}\text{C}$; |

der Gefrierpunkt der Chlorkalciumlösungen liegt innerhalb dieser Mischungsgrenzen höher wie jener der Kochsalzlösungen.

Für den Betrieb kleiner Kältemaschinen scheint sich speziell Chlormethyl besonders zu eignen; es ist nicht giftig, greift Metalle nicht an und hat mit der schwefligen Säure die Eigenschaft gemein, in verdichtetem Zustande schmierend zu wirken. Das Gas ist allerdings brennbar, aber keineswegs feuergefährlich wie Methyläther; die Spannung desselben beträgt in Atmosphären Überdruck

| | | | | | |
|--|-------|-------|------|-----|------|
| 1,20, | 1,78, | 2,57, | 2,62 | und | 5,00 |
| bei Temperaturen in C° | | | | | |
| - 20 | - 10 | 0 | + 10 | + | 20. |

Dieses Gas steht somit hinsichtlich des Zusammenhanges zwischen Spannung und Temperatur der schwefligen Säure nahe, aber für die bei der Eis-erzeugung vorkommenden Temperaturen sinkt die Spannung nicht unter jene der Außenluft, so daß also in der Maschine nie Luftleere entsteht. Die Verdampfungswärme ist bei 0° etwa 97 W. E./kg, also fast so groß wie die der schwefligen Säure (94,5 W. E.), hingegen ist das spezifische Volumen 0,44 cbm/kg, während jenes der schwefligen Säure nur 0,21 cbm/kg beträgt; infolgedessen werden die Cylinderabmessungen viel größer, als bei den sonst gebräuchlichen Arbeitsflüssigkeiten; bei kleinen Maschinen kömmt dies jedoch sehr wenig in Betracht.

Kompressormaschinen sind gewöhnlich so angeordnet, daß sie in nachstehender Weise arbeiten. Der Kreisprozeß derselben ist eine nahezu vollkommene Umkehrung des Kreisprozesses von Clausius (§ 54). Die

Organe einer solchen Maschine sind, wie aus der schematischen Skizze Figur 35 zu ersehen: erstens der Kompressionscyylinder, zweitens der kalte Körper C , welcher als Kessel für die flüchtige Arbeitssubstanz dient und vermittelt, daß die Wärme aus dem Wasser oder anderen Substanzen, welche gekühlt werden sollen, in die Wärmesubstanz übergeht; und drittens der Kühler A , bestehend aus einer Rohrspirale oder einem Bündel enger Rohre, umgeben von zirkulierendem Wasser, in welchem die Arbeitsflüssigkeit unter Druck kondensiert wird.

Der Kreisprozeß dieser Maschinen ist durch das Indikatordiagramm Figur 35 dargestellt. Während des Vorwärtshubes dc nimmt der Kompressionscyylinder Dampf von C bei gleichmäßigem Drucke, entsprechend der unteren Grenztemperatur T_2 , ein. Während des ersten Teiles des Kolbenrücklaufes cb findet die Kompression

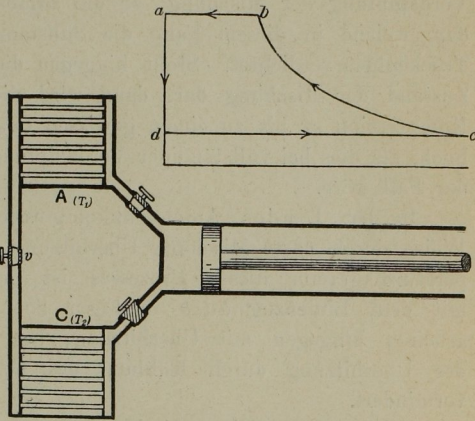


Fig. 35. Verdampfungskältemaschine mit Kompressor.

des Dampfes statt; während dieser Zeit sind die Ventile, welche zu den beiden Kammern A und C führen, geschlossen. Die Kompression wird soweit getrieben, bis die Spannung im Cylinder gleich ist der Spannung in A . Nun wird die Verbindung mit A geöffnet und während des restlichen Hubes die Flüssigkeit nach A befördert und dort kondensiert; Linie ba . Der Kreisprozeß wird dadurch geschlossen, daß die gleiche Quantität Arbeitsflüssigkeit durch das Ventil v von A direkt nach C zurückgelangt; Linie ad .

Diese letzte Periode des Prozesses ist nicht umkehrbar; dieser Weg, den Kreisprozeß zu vervollständigen, ist jedoch entschieden einfacher als der umkehrbare Weg der Expansion der Flüssigkeit in einem eigenen Expansionscyylinder unter Verrichtung von Arbeit; andererseits wäre der Arbeitsgewinn infolge der Expansion tatsächlich unbedeutend.

Die Wirkungsweise dieser Maschinen kann durch ein Entropie-Temperaturdiagramm nach Figur 25 dargestellt werden, wenn der Linienzug in umgekehrter Reihenfolge durchlaufen wird. Wäre die Verdampfung vollständig, dann würde die Linie af dieser Figur den Prozeß der Verdampfung darstellen, während dessen Wärme von dem zu kühlenden Körper aufgenommen wird. Gewöhnlich ist die Verdampfung jedoch nicht

vollständig, d. h. es wird eine Mischung aus Dampf und einer geringen Menge unverdampfter Flüssigkeit in den Cylinder aufgenommen und komprimiert; dadurch wird die infolge der Kompression auftretende Überhitzung reduziert; bei einem entsprechenden Mischungsverhältnisse, also bei genügendem Flüssigkeitsgehalte, kann die Überhitzung auch gänzlich vermieden werden. Die Linie ad in Figur 25 stellt die unvollständige Verdampfung der Mischung, dc die adiabatische Kompression derselben dar, welche in diesem Falle die Substanz eben bis zum Zustande der Trockenheit verdichtet. Stellt hingegen die Linie as den ursprünglichen Zustand der Mischung dar, dann wird dieselbe durch die adiabatische Kompression sr bis zu einem gewissen Grade überhitzt, jedoch nicht so hoch, als dies bei vollständiger Verdampfung vor Beginn der Kompression der Fall wäre.

In Dr. Lindes Ammoniakkompressionsmaschinen wird in dieser Weise durch nasse Mischung Überhitzung verhindert; das Entropie-Temperaturdiagramm dieses Prozesses ist der Wesenheit nach identisch mit dem Linienzug $adcb$ in Figur 25. Andere Ammoniakmaschinen arbeiten hingegen mit Überhitzung; bei einzelnen wird die Wirkung der Überhitzung durch Kühlung des Cylinders mittels Wassermantel vermindert.

Zeichnet man einen Kreisprozeß $adcb$ Figur 25 für eine spezielle Substanz und die derselben entsprechenden Temperaturen, so ersieht man, daß die Fläche unter ad dem gesamten Betrage der während der Verdampfung der Arbeitssubstanz aufgenommenen Wärme entspricht; während des Überganges vom Kondensator A nach dem Kühler C nimmt die Arbeitssubstanz jedoch eine Wärmemenge mit sich, welche der Fläche unter der Linie ba entspricht. Die Differenz dieser beiden Flächen entspricht daher dem wirklichen Betrage der Kühlung. Bei einer Substanz, deren latente Wärme im Vergleiche mit der spezifischen Wärme groß ist, nähert sich der Kühleffekt dem Gesamteffekt, d. h. mit anderen Worten, bei einer solchen Substanz ist der umkehrbare Clausiusprozeß von dem Carnotschen Prozeß, welcher dem idealen Wirkungsgrade eines derartigen Kühlprozesses entspricht, nicht sehr viel verschieden. Von diesem Gesichtspunkte aus betrachtet ist das Ammoniak die beste der bisher in Kältemaschinen benützten Arbeitsflüssigkeiten. Bei Kohlensäure bildet die Fläche unter ba und namentlich dann, wenn sich die obere Grenztemperatur dem kritischen Punkte des Gases nähert, einen verhältnismäßig großen Abzug des gesamten Kühleffektes.

71. Leistungskoeffizient der Kältemaschinen. Vom thermodynamischen Standpunkte aus kann das Verhältnis