Die mechanische Wärmetheorie hat nicht nur Fragen der reinen Wissenschaft in ein helleres Licht gerückt, sondern auch der Industrie ein weites Versuchsfeld eröffnet; und wenn auch die erstrittenen Erfolge nicht so blendend und damit auch nicht so allgemein bekannt sind, wie die der Elektricität, so hat doch auch auf dem Gebiete der Wärme der Gewerbefleifs Maschinen konstruiert, welche für das bürgerliche Leben von nicht geringer Bedeutung sind oder doch, vervollkommnet, noch werden können. Diese Maschinen, so verschieden im übrigen ihre Konstruktion sein mag, beruhen in letzter Instanz immer auf dem Satze von der Äquivalenz von Wärme und Arbeit und erfordern, ihrem einfachen Prinzipe entsprechend, nur eines von jenen Äquivalentien und aufserdem eine Materie, welcher Wärme resp. Arbeit zugeführt oder entzogen werden kann.

Von den Materien kommen in erster Reihe die Gase und von diesen wieder die atmosphärische Luft in Betracht. Solche Maschinen, die sich in ihrem Wesen als Luftmaschinen charakterisieren, haben wegen der allgemeinen Verbreitung der Luft von vornherein ein allgemeines Interesse für sich und sind deshalb wiederholt theoretisch erläutert und praktisch ausgeführt worden. Aus diesem Grunde werden im folgenden theoretische Erörterungen nur soweit beigebracht werden, als sie entweder dazu dienen, die Wirkungsweise von Kältemaschinen durch möglichst wenige Striche zu erläutern, oder zu einer interessanten Formel führen, mit welcher eine meines Wissens neue Methode zur experimentellen Bestimmung von $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ gegeben ist[1]). Ausführlicher wird in ihren praktischen Wirkungen die Kalt-Luftmaschine besprochen werden, da sie und ihr Prinzip in mehreren Zeitschriften, so z. B. in Dinglers Polytechnischem Journal, eine unzutreffende Darstellung erfahren hat.

Wir untersuchen zunächst die Zustandsänderungen der atmosphärischen Luft, wenn sie, unter einem hohen Drucke stehend, aus einem Gefäfse in die freie Atmosphäre ausströmt. Zu dem Zwecke nehmen wir zwei Gefäfse G_1 und G_2 an, in denen sich atmosphärische Luft befindet, und zwar in G_1 das Volumen V_1 cbm von k_1 kg Gewicht unter dem Drucke von p_1 Atmosphären und von der Temperatur T_1; in G_2 sind die entsprechenden Gröfsen V_2, k_2, p_2, T_2, wo T die absolute Temperatur bedeutet; aufserdem seien v_1 und v_2 die spezifischen Volumina der Gase in beiden Gefäfsen und $p_1 > p_2$. Bringt man beide Gefäfse durch ein Rohr von verhältnismäfsig geringer lichter Weite in Verbindung, so wird aus G_1 ein Gewicht von k_x kg Luft nach G_2 überströmen, zugleich werden sich in beiden Gefäfsen das spezifische Volumen, der Druck und die

*) Sollte sich diese Methode doch schon in der Litteratur vorfinden, so kann ich als entschuldigendes Moment für mich wohl den geringen Zeitraum in Anspruch nehmen, welcher für diese Arbeit mir übrig blieb, nachdem ich auf ein durch die letzte Naturforscherversammlung vorläufig erledigtes Thema längere Zeit und gröfsere Mühe verwandt hatte.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Temperatur ändern, während die absoluten Volumina dieselben bleiben. In G_1 sind $k_1 - k_x$ kg Luft von dem spezifischen Volumen v_{1x} unter dem Drucke p_{1x} und von der Temperatur T_{1x}, während für G_2 die entsprechenden Gröfsen $k_2 + k_x$, v_{2x}, p_{2x}, T_{2x} sind. Wir setzen nun voraus, dafs die Luft ein ideales Gas ist, was wir um so eher können, weil bei den gewöhnlichen Drucken und Temperaturen die aus jener Annahme entspringenden Fehler nur geringfügig sind. Es besteht dann das Mariotte-Gay-Lussacsche Gesetz:

$$(1) \qquad \frac{p_{1x} \cdot v_{1x}}{T_{1x}} = R \text{ und } \frac{p_{2x}\, v_{2x}}{T_{2x}} = R$$

Während der Zustandsänderungen soll dem System Wärme weder mitgeteilt noch entzogen werden. Nachdem also die Verbindung der Gefäfse aufgehoben und in beiden Teilen Gleichgewicht eingetreten ist, hat die in G_1 zurückgebliebene Luft auf Kosten ihrer Temperatur eine gewisse Arbeit geleistet. In G_1 sind geblieben $k_1 - k_x$ kg Luft, welche vor der Verbindung der Gefäfse das Volumen $\frac{V_1\,(k_1 - k_x)}{k_1}$ hatten und nach Aufhebung der Verbindung das Volumen V_1 bekommen haben, so dafs sie sich um $\frac{V_1\, k_x}{k_1}$ ausgedehnt haben. Da nun bei unserer Vorrichtung komprimierte Luft in die freie Atmosphäre strömen soll, so ist eben G_2 die Atmosphäre und V_2 ihr Volumen. Durch das Überströmen von k_x kg Luft aus dem Reservoir einer Maschine in die freie Luft wird nun nach Eintritt des Gleichgewichts an den Zuständen der Atmosphäre nichts geändert, so dafs $v_{2x} = v_2$, $p_{2x} = p_2$ und $T_{2x} = T_2$ bleibt, und wir nur die Zustände in G_1 zu untersuchen haben. Bezeichnen wir mit γ das Verhältnis der spezifischen Wärme bei konstantem Druck zu derjenigen bei konstantem Volumen, so dafs $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$, so besteht, da die Zustandsänderungen ohne Wärmezufuhr und -abfuhr vor sich gehen sollen, die adiabatische Gleichung für ideale Gase

$$\frac{p'}{p} = \left(\frac{v}{v'}\right)^{\gamma}$$

Aus (1) folgt nun $v = \frac{R\,T}{p}$ und $v' = \frac{R\,T'}{p'}$, folglich $\frac{v}{v'} = \frac{p'\,T}{p\,T'}$, wodurch die adiabatische Gleichung wird zu

$$\left(\frac{p'}{p}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = \frac{p'\,T}{p\,T'}, \text{ oder } \frac{T}{T'} = \left(\frac{p}{p'}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}.$$

Für das Gefäfs G_1 ist nun statt T, T', p, p', v, v' zu setzen T_{1x}, T_1, p_{1x}, p_1, $\frac{V_1}{k_1 - k_x}$ und $\frac{V_1}{k_1}$, so dafs wir bekommen

$$(2) \qquad \frac{T_{1x}}{T_1} = \left(\frac{p_{1x}}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}},$$

eine Gleichung, welche sagt, dafs es zur Hervorbringung einer niedrigen Temperatur nicht auf das Volumen oder Gewicht des komprimierten Gases, sondern nur auf das Verhältnis der benutzten Drucke ankommt. Es ergiebt sich ferner

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

$$\frac{p_{1x}}{p_1} = \left(1 - \frac{k_x}{k_1}\right)^{\gamma}. \tag{3}$$

Durch Kombination von (2) und (3) folgt

$$\frac{T_{1x}}{T_1} = \left(1 - \frac{k_x}{k_1}\right)^{\gamma-1}, \tag{4}$$

wodurch die Temperatur T_{1x} im Inneren von G_1, nachdem k_x kg Luft in die freie Atmosphäre ausgeströmt sind, bestimmt ist. Das analoge Verhältnis des spezifischen Volumens der zurückgebliebenen zu der ursprünglich in G_1 vorhandenen Luft wird leicht auf folgende Weise gefunden. Es ist, da $k_1 - k_x$ kg Luft zurückbleiben, während das absolute Volumen V_1 sich nicht ändert, $v_{1x} = \frac{V_1}{k_1 - k_x}$ und $v_1 = \frac{V_1}{k_1}$ oder $V_1 = v_1 k_1$, woraus folgt

$$\frac{v_{1x}}{v_1} = \frac{1}{1 - \frac{k_x}{k_1}}.$$

Beträgt zum Beispiel das Volumen der komprimierten Luft $V_1 = 0{,}5$ cbm, und ist in G_1 der Druck $p_1 = 2{,}5$ Atm. und die Temperatur $+ 20°$ C, d. h. $T_1 = 293$, so ist, wenn aus G_1 soviel Luft entweicht, bis der Druck in G_1 gleich dem Atmosphärendruck, d. h. $p_{1x} = p_1 = 1$ Atm. geworden ist,

$$\frac{p_{1x}}{p_1} = \frac{1}{2{,}5} = 0{,}4, \text{ also}$$

$$T_{1x} = 293 \cdot 0{,}4^{\frac{41}{141}} = 224{,}5,$$

d. h. in G_1 ist die Temperatur um 68,5° erniedrigt worden, so dafs die zurückbleibende Luft die Temperatur — 48,5° C besitzt. Was das ausströmende Luftgewicht betrifft, so ist

$$\frac{k_x}{k_1} = 1 - \left(\frac{p_{1x}}{p_1}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = 1 - 0{,}4^{\frac{100}{141}} = 0{,}478,$$

d. h. unter den gegebenen Verhältnissen strömt fast die Hälfte des ursprünglich vorhandenen Gasgewichtes aus. Durch Logarithmierung ergeben die Gleichungen (3) und (4)

$$\gamma = \frac{\log\left(\frac{p_{1x}}{p_1}\right)}{\log\left(1 - \frac{k_x}{k_1}\right)} \text{ und}$$

$$\gamma = 1 + \frac{\log\left(\frac{T_{1x}}{T_1}\right)}{\log\left(1 - \frac{k_x}{k_1}\right)},$$

wodurch γ experimentell bestimmt werden kann.

Ebenso wie für G_1, so lassen sich auch für das zweite Gefäfs unseres ursprünglichen Apparates Druck und Temperatur berechnen. Es bestimmen sich

$$p_{2x} = p_2 \left[1 + \frac{k_1 T_1}{k_2 T_2}\left(1 - \left(1 - \frac{k_x}{k_1}\right)^{\gamma}\right)\right], \tag{6}$$

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

(6) $$T_{2x} = \frac{k_2\, T_2}{k_2 + k_x} + \frac{k_1\, T_1}{k_2 + k_x}\left[1 - \left(1 - \frac{k_x}{k_1}\right)^{\gamma}\right].$$

Ist nun in G_2 der Druck geringer als in G_1 und stellt G_1 die freie Atmosphäre vor, so wird aus G_1 Luft in G_2 strömen und dort eine Druck- und Temperaturerhöhung hervorrufen, während in der freien Atmosphäre ebensowenig wie im ersten Falle eine Druck- und Temperaturänderung eintreten wird; es ist demnach $T_{1x} = T_1$; $p_{1x} = p_1$; $v_{1x} = v_1$; $k_1 = \infty$; $V_1 = \infty$. Mit diesen Werten werden die Ausdrücke (6) für p_{2x} und T_{2x} unbestimmt, da für $k_1 = \infty$

$$k_1\, T_1 \left[1 - \left(1 - \frac{k_x}{k_1}\right)^{\gamma}\right] = \infty \,.\, 0$$

wird. Wir bestimmen den Grenzwert dieses Ausdruckes $f(k_1)$, indem wir Zähler und Nenner (1) durch k_1 dividieren, so dafs wir erhalten

$$f(k_1) = \frac{\varphi(k_1)}{\psi(k_1)} = \frac{T_1 \left[1 - \left(1 - \frac{k_x}{k_1}\right)^{\gamma}\right]}{\frac{1}{k_1}}$$

und nun $\frac{\varphi'(k_1)}{\psi'(k_1)}$ bilden, wodurch wir erhalten $f(k_1) = \frac{\varphi'(k_1)}{\psi'(k_1)} = T_1\, k_x\, \gamma \left(1 - \frac{k_x}{k_1}\right)^{\gamma-1}$.

Hierin nun $k_1 = \infty$ gesetzt, giebt $f(k_1) = T_1\, k_x \cdot \gamma$. Für diesen Wert gehen die Gleichungen (6) über in

(7) $$p_{2x} = p_2 \left[1 + \frac{T_1\, k_x\, \gamma}{k_2\, T_2}\right]$$
$$T_{2x} = \frac{k_2\, T_2 + T_1\, k_x \cdot \gamma}{k_2 + k_x}.$$

Aus der ersten dieser Gleichungen folgt

$$k_x = \frac{\left(\frac{p_{2x}}{p_2} - 1\right) k_2\, T_2}{T_1\, \gamma} = \frac{(p_{2x} - p_2)\, k_2\, T_2}{p_2\, T_1\, \gamma}.$$

Nun ist aber $p_2 = \frac{R\, T_2}{v_2}$ und $v_2 = \frac{V_2}{k_2}$, also $p_2 = \frac{R\, T_2\, k_2}{V_2}$, folglich ist

(7a) $$k_x = \frac{(p_{2x} - p_2)\, V_2}{T_1\, \gamma}$$

das Gewicht der eingeströmten Luft, während dasjenige der in G_2 unter dem Druck p_2 ursprünglich vorhandenen Luft

(7b) $$k_2 = \frac{p_2\, V_2}{R\, T_2}$$

ist. Durch Division der beiden letzten Gleichungen (7a) und (7b) ergiebt sich die Beziehung

$$\frac{k_2}{k_x} = \frac{\gamma\, T_1\, p_2}{T_2\, (p_{2x} - p_2)}.$$

Sind nun bei dem Versuche die Temperaturen in dem Gefäfse G_2 und im Freien dieselben, so folgt $\frac{k_2}{k_x} = \frac{\gamma\, p_2}{p_{2x} - p_2}$, woraus sich γ bestimmt als

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

(8) $$\gamma = \frac{k_2 (p_{2x} - p_2)}{k_x \cdot p_2}.$$

Ist z. B. $p_{2x} = p_1$, d. h. gleich dem Atmosphärendruck und $p_2 = \frac{1}{2} p_{2x} = \frac{1}{2} p_1$, so ist $\gamma = \frac{k_2}{k_x}$. Wenn $p_{2x} = p_1$ und $p_2 = \frac{1}{3} p_1, \frac{1}{4} p_1, \frac{1}{5} p_1 \ldots, \frac{1}{n} p_1$, so wird $\gamma = 2 \frac{k_2}{k_x}, 3 \frac{k_2}{k_x}$ $4 \frac{k_2}{k_x}$, oder allgemein

(9) $$\gamma = (n - 1) \frac{k_2}{k_x}.$$

Zur experimentellen Bestimmung von γ nach dieser Formel hat man ein doppelttubuliertes Glasgefäfs mit Thermometer und Manometer im Innern nötig. Man bestimmt das Volumen des Gefäfses, einer Kugel z. B., durch Wasser und berechnet das Gewicht k gr. eines gleichen Volumens Luft bei der vorhandenen Temperatur und dem gegebenen Druck; dies Gewicht k kann auch direkt ermittelt werden. Um in dem Ballon wasserdampffreie Luft zu haben, saugt man durch ihn mittels eines Aspirators oder Gebläses Luft, welche vorher eine mit Chlorcalciumstücken gefüllte Röhre passiert hat. Nun werden, wenn im Innern derselbe Druck wie aufsen herrscht, beide Tubuli durch Hähne geschlossen und das Gewicht des Apparates auf l gr bestimmt, dann ist das Gewicht des Apparates selbst ohne Luft gleich $l - k$ gr. Den einen Tubulus schraubt man in die Mutter eines Luftpumpentellers, öffnet den Hahn dieses Tubulus, verdünnt die Luft beliebig $\left(\text{auf } \frac{1}{n}\right)$, schliefst dann den Hahn wieder und bestimmt das nunmehrige Gewicht des Ballons auf m gr, nachdem die Temperatur im Innern der äufseren Temperatur wieder gleich geworden ist; dann ist das Gewicht der verdünnten Luft $k_2 = m - (l - k)$ gr. Nun öffnet man einen Tubulus und läfst von Wasserdampf gereinigte Luft einströmen, bis das Manometer der Kugel den äufseren Luftdruck anzeigt, unterbricht dann die Kommunikation mit der Atmosphäre und bestimmt das Gewicht des Ballons, nachdem die innere Temperatur bis auf die Temperatur der Umgebung gefallen ist. Ist das Gewicht des Ballons jetzt k' gr, so wiegt die nunmehr abgesperrte Luft $k' - (l - k)$ gr, so dafs das Gewicht der eingeströmten Luft

$$\begin{aligned} k_x &= k' - (l - k) - m + (l - k) \text{ gr} \\ &= k' - m \text{ gr} \end{aligned}$$

ist. Es ist also

$$\frac{k_2}{k_x} = \frac{m - (l - k)}{k' - m}$$

das Verhältnis der Gewichte der verdünnten und der eingeströmten Luft. Multipliziert man die erhaltene Zahl mit $n - 1$, wo n den Grad der Verdünnung angiebt, so hat man γ.

Ändert man den letzten Versuch derart ab, dafs das Gefäfs G_1 nicht zwar die freie Atmosphäre, aber doch im Verhältnis zu G_2 so grofs ist, dafs durch das Überströmen von Luft aus G_1 nach G_2 in den Zuständen von G_1 nichts Wesentliches geändert wird, so läfst sich in G_2 eine bedeutende Temperaturerhöhung hervorrufen, wenn in G_1 Luft von hoher Temperatur und von Atmosphärenspannung vor der Erhitzung und in G_2 Luft von sehr geringem Druck im Verhältnis zu dem in G_1 und von derselben Temperatur sich befindet. Ist z. B. $V_1 =$ cbm und $V_2 = 1$ cbdm, so werden die Abweichungen der nunmehrigen Verhältnisse von den vorigen nur unbedeutend

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

sein, und wenn in G_1 der Druck $k_1 = 1$ Atm. ist, reduziert auf die gewöhnliche Temperatur, so wird p_{2x} nahe gleich dem Atmosphärendruck werden. Nehmen wir ferner an, die Temperatur betrage in beiden Gefäfsen 1500° C, es sei also $T_1 = T_2 = 1773$, und in G_2 sei $p_2 = \frac{1}{100}$ Atm., so ist das Gewicht der in G_2 befindlichen vedünnten Luft nach (7b)

$$k_2 = \frac{p_2 \gamma_2}{R\, T_2} = \frac{\frac{1}{100} \cdot 10333}{29{,}272 \cdot 1773} \text{ gr}$$

und nach (7a) das Gewicht der überströmenden Luft

$$k_x = \frac{(p_{2x} - p_2)\, V_2}{R\, T_1\, \gamma} = \frac{\frac{99}{100} \cdot 10333}{29{,}272 \cdot 1773 \cdot 1{,}41} \text{ gr.}$$

Da hieraus die Werte

$$k_2 = 0{,}001991 \text{ gr},$$
$$k_x = 0{,}139794 \text{ gr},$$
$$k_x \cdot \gamma = 0{,}197109 \text{ gr},$$
$$k_2 + k_x \cdot \gamma = 0{,}199100 \text{ gr},$$
$$k_2 + k_x = 0{,}141785 \text{ gr}$$

folgen, so ergiebt sich für die Temperatur in G_2 aus (7)

$$T_{2x} = \frac{(k_2 + k_x \cdot \gamma)\, T_1}{k_2 + k_x} = \frac{0{,}199100 \cdot 1773}{0{,}141785} = 2489,$$

so dafs in G_2 die Temperatur um $T_{2x} - T_2 = 716°$ C. bis auf 2216° C. erhöht worden ist. Praktischen Versuchen mufs die Entscheidung vorbehalten werden, ob auf diese Weise so hohe Temperaturen erzielt werden können, wie sie zum Schmelzen bisher nicht schmelzbarer Körper erforderlich sind.

Das Prinzip eines zweiten Apparates zur Abkühlung von Luft, nach welchem F. Windhausen Kaltluftmaschinen ausgeführt hat, ist folgendes.

In einem Cylinder bewegt sich luftdicht ein Stempel, durch welchen der Cylinder in zwei Räume A und B, den Kondensations- und den Expansionsraum geschieden wird. Durch Bewegung des Kolbens in den Raum A hinein wird die Luft komprimiert und erhitzt. Die Temperatur dieser Luft wird nun auf später zu besprechende Weise erniedrigt und dann der Stempel durch die abgekühlte komprimierte Luft zurückgetrieben. Da diese Arbeit von der in A befindlichen Luft geleistet wird, so wird die dieser Arbeit gleichwertige Wärme auch der Luft in A entzogen werden und die Temperatur in A weiter sinken. Durch den nochmaligen Vorgang des Stempels nach A zu wird dann diese kalte Luft mittelst eines Ventils aus dem Cylinder ausgeworfen. Die Verhältnisse in dem Kompressionsraume A sind offenbar dieselben, als wenn die Luft durch Zusammendrücken nur auf diejenige Temperatur erhitzt wäre, welche durch die thatsächlich erfolgende Abkühlung erzielt wird, und nun ohne Wärmezufuhr und -abfuhr die Arbeit ihrer eigenen Expansion und diejenige des Rückschubes des Kolbens leistete. Man hat demnach wieder die adiabatische Gleichung

$$\frac{v_1}{v_x} = \left(\frac{p_x}{p_1}\right)^{\frac{1}{\gamma}},$$

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

woraus auch hier folgt

$$\frac{T_x}{T_1} = \left(\frac{p_x}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}},$$

worin p_1 und v_1 Anfangsdruck und -volumen, p_x und v_x Enddruck und -volumen der komprimierten Luft bedeuten.

Ist die Anfangstemperatur $t_1 = +20°$ C, d. h. $T_1 = 293°$ und ist $p_1 = 2{,}5$ Atm. $p_x = 1$ Atm., so ist

$$T_x = 293 \cdot 0{,}4^{\frac{41}{141}} = 224{,}5°, \text{ also } t_x = -48{,}5°\,\text{C}.$$

Durch diese Maschine wird demnach dieselbe Abkühlung hervorgerufen wie beim Ausströmen komprimierter Luft ins Freie bei gleichen Druckverhältnissen und Anfangstemperaturen. Hierin scheint auf den ersten Blick ein Widerspruch zu liegen, sofern in dem einen Falle die Luft sowohl Disgregationsarbeit als auch äufsere Arbeit durch Zurücktreiben des Kolbens verrichtet, während in dem andern Falle nur Disgregationsarbeit geleistet zu werden scheint. Der Widerspruch hebt sich aber, wenn man bedenkt, dafs auch die in die freie Atmosphäre strömende Luft beide Arbeiten und zwar in denselben Quantitäten leistet; denn einmal hat sie während des Ausströmens die atmosphärische Luft zurückzudrängen, und zwar genau um dasselbe Volumen wie beim Schube des Kolbens, zweitens dehnt sich die ausgeströmte Luft und der Rest, nämlich die in dem Cylinder zurückbleibende Luft bis auf Atmosphärenspannung aus. Aufserdem ist in unserer Darstellung der Kolben als ein idealer aufgefafst worden. Würde sein Gewicht und seine Reibung in Rechnung gezogen, so würde er auch von der komprimierten Luft nicht soweit zurückgeschoben werden, bis der Druck im Innern gleich dem Atmosphärendruck geworden wäre, so dafs wir bei dem praktischen Versuche mit dem zweiten Apparate bei gleichem Überdrucke wie im ersten im Innern einen höheren Druck und eine höhere Temperatur als Endresultat erhielten, abgesehen davon, dafs bei dem Zurückschieben des Kolbens durch die Reibung an den Wandungen Wärme entwickelt wird, welche sich zum Teil der abgekühlten Luft mitteilt. Der einzige Unterschied bei beiden Versuchen, der praktisch allerdings von grofser Bedeutung ist, liegt darin, dafs bei dem Ausströmen der Luft ins Freie das uns zur Verfügung bleibende Quantum abgekühlter Luft ein geringeres ist als bei der abgesperrten, Arbeit verrichtenden Luft.

Auf gleiche Weise läfst sich auch die Endtemperatur eines Luftquantums berechnen, welches durch eine Strömung aus der Tiefe in höhere Regionen geführt wird, vorausgesetzt, dafs ihm Wasser in keinerlei Form beigemengt ist. Denken wir uns 1 cbm Luft unter dem Druck von 1 Atm., eingeschlossen in eine gewichtslose adiathermane Hülle, — diese letzte Voraussetzung kann auch fortfallen, wenn wir dafür annehmen, dafs die Temperaturabnahme nach oben zu eine durchaus stetige, nur von der Höhe abhängige ist — um 2500 m gehoben, so kommt sie dadurch unter einen geringeren Druck, ihre Temperatur sinkt; und zwar wird diese Temperaturerniedrigung dieselbe sein, welche in einem Gefäfs von 1 cbm Inhalt hervorgebracht wird, wenn aus ihm Luft von 1 Atm. Druck ausströmt in eine Umgebung, welche unter einem Drucke steht, der dem Luftdrucke in der Höhe von 2500 m gleich ist; oder auch gleich der Temperaturabnahme, die das ganze Luftquantum von 1 cbm erfährt, wenn es sich von der Atmosphärenspannung ausdehnt bis zu dem in jener Höhe herrschenden Drucke unter Überwindung eines äufseren Druckes. Ist die Temperatur an der Erdoberfläche z. B. $+20°$ C, also $T_1 = 293$, so wird, da der Luftdruck in der Höhe von 2500 m ungefähr 555 mm ist,

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

$$T_x = 293 \cdot \left(\frac{555}{760}\right)^{\frac{44}{141}} = 267{,}4^\circ,$$

die Luft würde sich demnach um 25,6° C von + 20° auf — 5,6° C abkühlen. Für 7120 m, die Höhe bedeutender Berge, und 312 mm Druck und derselben Erdoberflächentemperatur + 20° C würde sich eine Abkühlung um 66,8° C von + 20° auf — 46,8 C ergeben.

Ergab sich für unsere beiden Apparate unter sonst gleichen Bedingungen auch dieselbe Temperaturabnahme für die gesamte resp. restierende Luft, so wird sich doch die in den Gefäfsen während der Expansion abgegebene Arbeit aus einfachen Gründen als verschieden herausstellen müssen. Wenn Luft von der Spannung $p_1 > 1$ Atm. sich ausdehnt, bis ihr Druck gleich dem Atmosphärendruck ist, so verrichtet sie eine äufsere Arbeit, deren Differential

$$d\,A = p_1\, d v_1$$

ist. Nun ist aber

$$p_1 = p_x \left(\frac{v_x}{v_1}\right)^{\gamma},$$

folglich ist

$$d\,A = p_x \left(\frac{v_x}{v_1}\right)^{\gamma} d\,v_1 = p_x\, v_x^{\gamma}\, \frac{d\,v_1}{v_1^{\gamma}},$$

also

$$A = \int_{v_1}^{v_x} p_x\, v_x^{\gamma}\, \frac{d\,v_1}{v_1^{\gamma}}$$

$$= p_x\, v_x^{\gamma} \left[\frac{v_x^{-\gamma+1}}{-\gamma+1} - \frac{v_1^{-\gamma+1}}{-\gamma+1}\right]$$

$$= \frac{p_x\, v_x}{\gamma-1}\left[\left(\frac{v_x}{v_1}\right)^{\gamma-1} - 1\right].$$

Danach läfst sich die Arbeit berechnen, wenn das Anfangs- und Endvolumen und der Enddruck bekannt sind. Der letzten Gleichung läfst sich auch die Gestalt geben

$$A = \frac{p_1\, v_1}{\gamma-1}\left[1 - \left(\frac{v_1}{v_x}\right)^{\gamma-1}\right],$$

oder auch, wenn v_1 nicht bestimmt worden ist,

$$A = \frac{p_1\, v_x}{\gamma-1}\left(\frac{p_x}{p_1}\right)^{\frac{1}{\gamma}}\left[\;-\left(\frac{p_x}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right].$$

Strömt dagegen aus einem Gefäfse Luft bei einem Drucke, der gröfser ist als 1 Atm., in das Freie, so ist bei Benutzung der früheren Zeichen das Differential der geleisteten Arbeit

$$d\,B = p_{1x}\,(k_1 - k_x)\, d\,v_{1x}.$$

Da das Volumen des Gefäfses während des Ausströmens der komprimierten Luft unverändert bleibt, so ist immer $V_{1x} = V_1$, und da, wenn man für $k_1 - k_x$ setzt k_{1x}, $v_{1x} = \frac{V_{1x}}{k_{1x}}$, $v_1 = \frac{V_1}{k_1}$ ist, so ist auch $v_{1x} \cdot k_{1x} = v_1\, k_1$, also $d\,v_{1x} = -\,v_1\, k_1\, \frac{d\,k_{1x}}{k^2_{1x}}$, also

$$d\,B = -\,p_{1x} \cdot k_{1x}\, v_1\, k_1\, \frac{d\,k_{1x}}{k^2_{1x}} = -\,v_1\, k_1\, p_{1x}\, \frac{d\,k_{1x}}{k_x}.$$

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Aus der adiabatischen Gleichung und der Beziehung $\frac{v_1}{v_{1x}} = \frac{k_{1x}}{k_1}$ erhält man

$$\frac{p_{1x}}{p_1} = \left(\frac{k_{1x}}{k_1}\right)^{\gamma}, \text{ daher wird}$$

$$d\,B = -\,v_1\,k_1\,p_1\left(\frac{k_{1x}}{k_1}\right)^{\gamma}\frac{d\,k_{1x}}{k_x}$$

$$= -\frac{v_1\,p_1}{k_1^{\gamma-1}}\cdot k_{1x}^{\gamma-1}\,d\,k_{1x},$$

woraus folgt

$$B = -\frac{v_1\,p_1}{k_1^{\gamma-1}}\cdot\frac{k_{1x}^{\gamma}}{\gamma}\Bigg|_{k_{1x}=k_1}^{k_{1x}=k_1-k_x}$$

oder

$$B = \frac{v_1\,p_1\,k_1}{\gamma}\left[1-\left(1-\frac{k_x}{k_1}\right)^{\gamma}\right].$$

Ersetzt man hierin k durch V_1 und v_1, so wird

$$B = \frac{V}{\gamma}\,(p_1 - p_{1x}).$$

Ist nun $V = 1$ cbm und $p_1 = 2{,}5$ Atm., $p_{1x} = 1$ Atm., so berechnet sich die Arbeit der Luft in dem Gefäfse während des Ausströmens auf 10993 kgm oder rund 26 Cal.

Es ist klar, dafs unsere beiden Apparate mit einigen Modifikationen zu Kaltluftmaschinen sich umgestalten lassen. Ebenso klar ist aber auch von vornherein, dafs eine Maschine, welche durch Ausströmen von Luft in die freie Atmosphäre kalte Luft liefert, wegen der geringen Masse der letzteren von sehr geringem Nutzeffekte sein würde. Das andere Prinzip hat, wie schon gesagt, F. Windhausen zur Konstruktion einer Kaltluftmaschine angewandt, deren Wirkungsweise im folgenden erläutert werden soll.

In einem Cylinder bewegt sich luftdicht ein Kolben K, durch welchen der Cylinder in einen Verdichtungsraum A und einen Verdünnungsraum B geteilt wird. Statt des einen Cylinders werden auch zwei, ein besonderer Kompressions- und ein eigener Expansionscylinder angewandt. In beiden Modifikationen ist der Expansionsraum mit schlechten Wärmeleitern umgeben, um zu verhindern, dafs die atmosphärische Luft der in ihm befindlichen kalten Luft Wärme mitteile. Wird der Kolben K (Fig. 1) nach M zu bewegt, so wird in dem Raume A die Luft verdünnt, infolge dessen das Saugventil a geöffnet und aus der Atmosphäre Luft eingesaugt. Wird nun der Stempel wieder zurückgeschoben, so schliefst sich das Ventil a und die Luft wird auf einige Atmosphären komprimiert. Bei einem bestimmten Druck öffnet sich das Druckventil b und die durch die Kompression stark erhitzte Luft strömt in einen Röhrenkondensator, dessen Röhren durch Kühlwasser umspült werden, welches durch die Öffnung 1 ein- und, nachdem es von der komprimierten Luft Wärme aufgenommen hat, durch 2 ausströmt. Während dessen ist der Kolben bis zur Schubhöhe vorgegangen und wird nun von einer Dampfmaschine zurückgezogen,

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

unmittelbar darauf schliefst sich auch das Druckventil wieder und die komprimierte Luft im Verein mit dem äufseren Motor treibt den Kolben zunächst so weit, bis in A Atmosphärendruck herrscht. In dem Momente wird nun wieder das Ventil a geöffnet und atmosphärische Luft wird in den Kompressionscylinder eingesaugt bis zu Ende des Hubes. Durch das Saugventil c ist die im Kühlapparat abgekühlte komprimierte Luft in den Expansionscylinder B gelangt und dort weiter expandiert, indem sie den Kolben nach A zu geschoben hat, wodurch ihre Temperatur weiter gesunken ist, da sie in dem von schlechten Wärmeleitern umgebenen Raume B einerseits von aufsen keine Wärme aufnehmen kann, andererseits aber Expansionsarbeit zu leisten hat. Inzwischen ist durch das Vorschieben des Kolbens das Ventil a wieder geschlossen und die Luft in A wieder komprimiert worden, bis b wieder geöffnet wird und das Spiel von neuem beginnt. Bei dem zweiten Rückgange des Kolbens aber wird die abgekühlte Luft von 1 Atmosphäre oder etwas gröfserem Druck, da dann das Ventil c geschlossen wird, durch das Druckventil d aus dem Cylinder ausgeworfen, und zwar entweder in einem Refrigerator, in welchem Wasser zum Gefrieren gebracht werden soll oder Gase abzukühlen sind, oder direkt in Räumlichkeiten, deren Temperatur erniedrigt werden soll. Im ersteren Falle wird die kalte Luft, nachdem sie den gröfseren Teil ihrer durch Expansion hervorgerufenen Kälte abgegeben hat, bei einer Temperatur von durchschnittlich —5° C zu dem Kondensator geleitet, wo sie im Verein mit dem Kühlwasser die aus dem Kompressionscylinder kommende komprimierte Luft abkühlt, so dafs in diesem Falle der Kondensator sich aus einem Wasser- und einem Luftkondensator zusammensetzt.

Mit einer Kaltluftmaschine, deren Cylinder einen Durchmesser von 0,785 m hatte, während der Hub 0,523 m betrug, und welche mit 2,5 kg Druck auf 1 qcm und 45 Hüben in 1 Minute arbeitete, die also bei einer Leistung von 70 % in einer Stunde

$$\frac{0{,}785^2}{4}\,\pi.\ 0{,}523.\ 45.\ 60.\ 0{,}7 = 478{,}4 \text{ cbm}$$

kalte Luft lieferte, wurden folgende Resultate erzielt.

Bei einem Versuche war die Temperatur der atmosphärischen Luft +6° C, die des einströmenden Kühlwassers +4°, die des ausfliefsenden +7° C. Die Temperatur der ausgeworfenen kalten Luft, dicht hinter dem Expansionscylinder gemessen, zeigte in den ersten Minuten eine der Zeit proportionale Abnahme, bis sie sich von der vierten Minute ab einer festen Grenze (—54°) näherte. Die Temperaturerniedrigung kann nicht momentan ihr Maximum erreichen, da erst die Wandungen des Expansionscylinders ihre Wärme an die durch Expansion abgekühlte Luft abgeben müssen. Erst allmählich nimmt dieser Teil der Maschine die Temperatur der kalten Luft an, und dann erst bleibt der Kältegrad der ausgeworfenen Luft konstant, was in diesem Falle nach 30 Minuten Arbeitszeit eingetreten sein wird. Die kalte Luft wurde durch ein Verbindungsrohr von 1,3 m Länge in einen Gefrierraum geleitet und hatte bei ihrem Eintritt in diesen noch —37°.

Ein zweiter Versuch wurde angestellt zur Abkühlung eines geschlossenen Raumes, in welchen das Austrittsrohr der kalten Luft geführt war. Die Dimensionen dieses Raumes waren 11,3 m Länge, 4,85 m Breite, 3,14 m Höhe, es hatte also rund 172 cbm Inhalt. Die Resultate sind aus nachstehender Tabelle ersichtlich; es bedeuten darin h die Beobachtungszeit, t_n die Temperatur und zwar t_1 im Ausströmungsrohr, 1,3 m von der Maschine entfernt, t_2 dicht unter der Decke, t_3 in der Höhe von 1,6 m, t_4 am Fufsboden in der Mitte des Raumes und t_m das Mittel von t_2, t_3 und t_4.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

h	t_1	t_2	t_3	t_4	t_m
10^{20}	+ 6	+ 8	+ 6	+ 4	+ 6
10^{40}	— 35	+ 3	0	— 3	0
11	— 40	+ 2	— 2	— 5	— 1,7
11^{20}	— 40	+ 2	— 2,5	— 6	— 2,2
11^{40}	— 43	+ 1,5	— 3	— 7	— 2,8
12	— 43	+ 1	— 4	— 7,5	— 3,5

Nachdem die Maschine von 12^h bis 2^h geruht, wurden die Versuche fortgesetzt:

h	t_1	t_2	t_3	t_4	t_m
2	0	+ 3,5	+ 3	+ 1	+ 2,5
2^{20}	— 35	+ 2	— 1	— 4,5	— 1,2
2^{40}	— 40	+ 2	— 2,5	— 6	— 2,2
2^{56}	—	+ 1	— 3	— 6	— 2,7

Bis 3^{30} wurde wieder pausiert. Die zuletzt gewonnenen Resultate waren:

h	t_1	t_2	t_3	t_4	t_m
3^{30}	— 4	+ 3	+ 2	— 0,5	+ 1,5
3^{40}	— 31	+ 2,5	+ 1,5	— 5,5	— 0,5
4	— 43	+ 1	— 4	— 7	— 3,3
4^{20}	— 45	+ 1	— 5	— 8	— 4
4^{40}	— 45	+ 0,5	— 5	— 8,5	— 4,3
5	— 49	0	— 5	— 8,5	— 4,5

Wie man sieht, ist nach jeder Pause eine nicht unerhebliche Temperaturerhöhung eingetreten, und zwar während 34 Minuten um 4,2° und während 3 Stunden um 6°. Diese Temperaturerhöhung läfst sich leicht erklären. Einmal ist der Raum wohl kaum luftdicht verschlossen gewesen, so dafs die äufsere Luft mit der im Zimmer befindlichen kommunizierte und ein Austausch von Wärme eintrat. Wenigstens hätte, wenn der Raum möglichst von der freien Luft abgesperrt gewesen wäre, in den Kompressionscylinder die Luft aus dem Zimmer, und zwar aus dem oberen Raume eingesaugt werden müssen — was in den Mitteilungen über die praktischen Wirkungen der Kaltluftmaschine nicht gesagt wird —, weil sonst nach einigen Hüben die Luft im Zimmer einen Druck von mehr als 1 Atmosphäre erhalten hätte und kalte Luft von Atmosphärenspannung nicht hätte eindringen lassen. Ferner gaben die Wandungen des Raumes und die in ihm befindlichen hölzernen Gegenstände einen Teil ihrer Wärme sofort ab, und wenn die Maschine nicht arbeitete, mufste sich infolge dessen sofort ein Steigen der Temperatur der Zimmerluft bemerkbar machen. Diese durch die Umfassungsmauern, Fufsboden und Decke abgegebene Wärme ist sehr beträchtlich. Es läfst sich berechnen das Gewicht der steinernen Wände und das Fufsbodens aus gleichem Material bei der Annahme, dafs die Kälte 0,3 m ein-

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

dringt, auf 79 175 kg, das Gewicht der hölzernen Decke auf 770 kg und das der Holzgegenstände auf 6000 kg. Wenn man nun die spezifische Wärme des Holzes gleich 0,6 und die des Ziegelsteines gleich 0,215 annimmt, so sind zur Abkühlung der Wandungen und der Geräte des Raumes um je 1° C erforderlich $6770 . 0{,}6 + 96175 . 0{,}215 = 24740$ Cal. Die Nutzarbeit der Maschine während der Arbeitszeit von 4 Stunden 6 Minuten in welcher Zeit

$$\frac{0{,}785^2}{4} \pi . 0{,}523 . 45 . 246 . 0{,}7 = 1961{,}4 \text{ cbm}$$

Luft um durchschnittlich $46\frac{2}{3}$° abgekühlt wurden, ist, da 1 cbm Luft 1,293 kg wiegt und die spezifische Wärme gleich 0,2374 anzunehmen ist, gleich

$$1961{,}4 . 1{,}293 . 0{,}2374 . \frac{140}{3} = 28097{,}5 \text{ Cal.}$$

Zur Abkühlung der Umfassungen des Raumes um dieselbe Anzahl von Graden sind aber $24740 . \frac{140}{3} = 1154533$ Cal. erforderlich. Daraus folgt, dafs die Maschine lange Zeit, ungefähr 7 Tage arbeiten müfste, bis die ausgeworfene Luft die Temperatur von $-46\frac{2}{3}$° C behalten und von den umgebenden Wänden keine Wärme mehr aufnehmen würde, ganz abgesehen davon, dafs die Umfassungen von den umgebenden Mitteln, der freien Atmosphäre und dem Boden immer wieder Wärme in beträchtlichen Mengen stetig aufnehmen. Aber auch zur Abkühlung der Umfassungen bis nur —3,6° wären noch 237504 Cal. nötig, zu deren Leistung die Maschine ungefähr 1 Tag 10½ Stunde in Betrieb bleiben müfste. Jedenfalls ist hieraus klar, dafs nach den kurzen Arbeitszeiten von $1^h 40^m$, 56^m und $1^h 30^m$ bei Eintritt einer Pause im Betriebe infolge der Abgabe von Wärme von seiten der Wände die Temperatur der eingeschlossenen Luft nicht unerheblich steigen mufs.

In der folgenden Tabelle sind die Resultate eines weiteren Versuches gegeben, der mit einer zweicylindrigen Maschine, deren Kompressionscylinder einen Durchmesser von 1,1 m und einen Hub von 1 m, deren Expansionscylinder einen Durchmesser von 1 m und dieselbe Hubhöhe hatte, angestellt wurde; h bedeutet die Zeit, t_0 die Temperatur der abgekühlten komprimierten Luft bei ihrem Eintritt in den Expansionscylinder, t_1 die Temperatur der kalten expandierten Luft bei ihrem Austritte aus dem Expansionsraume und p den Überdruck in Atmosphären.

h	t_0	t_1	p
11^{35}	—	—	—
11^{45}	+ 10	— 45	2,19
12	+ 10	— 50	2,12
1	+ 11	— 50	2,12
2	+ 12	— 50	2,16
3	+ 12	— 50	2,12
4	+ 12,25	— 50	2,02
5^{10}	+ 12,25	— 50	2,05
6	+ 13	— 50	2,05
7	+ 13	— 50	2,09

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Diese Kaltluftmaschinen sind in drei Ausführungen hergestellt worden, als Kaltluft-Hochdruckmaschinen, Kaltluft-Mitteldruckmaschinen und Eis- und Warmluft-Niederdruckmaschinen. Die beiden erstgenannten Maschinen unterscheiden sich lediglich durch die Höhe des angewandten Druckes, von welcher die erzielten Temperaturen abhängen; während bei der ersten — 50° erreicht werden, bringt die zweite es nur bis höchstens — 25°. Dementsprechend ist auch die bei der ersten verbrauchte Kraft eine bedeutend gröfsere, während die zweite grofse Massen mäfsig kalter Luft zu liefern im stande ist. Die dritte Variation der Maschine arbeitet umgekehrt. Zuerst wird Luft bis auf 0,5 Atm. expandiert, wodurch sie auf rund — 30° abgekühlt wird. Darauf wird sie in einen geschlossenen Raum geleitet, wo sie Wasser gefrieren macht. Nachdem sie den gröfsten Teil ihrer Kälte abgegeben, wird sie durch einen Saugapparat wieder in die Maschine geschafft, dort komprimiert und bei einer Temperatur von + 60° ausgeworfen. Diese Maschine erfordert kein Kühlwasser und soll per Pferdekraft 10 kg Eis in einer Stunde liefern.

Unsere Kaltluftmaschinen haben vor anderen Kältemaschinen erstens den Vorteil, dafs die abgekühlte Luft, wenn sie unter einem Drucke von etwas mehr als 1 Atm. steht, mit Leichtigkeit in jeden beliebigen Raum geschafft werden und dort entweder nur die Temperatur erniedrigen oder feste und flüssige Gegenstände, die letzteren eventuell bis zum Gefrieren, abkühlen kann. Zweitens arbeiten diese Maschinen nur mit Luft, werden dort also mit Vorteil zu verwenden sein, wo Chemikalien schwer und damit zugleich sehr teuer zu haben sind. Dagegen haben sie den Nachteil, dafs sie für gewöhnliche Verhältnisse zu kostspielig arbeiten und dafs ihre Dimensionen bei erheblicheren Leistungen sehr grofs werden, so dafs sich von vornherein das Anlagekapital zu hoch stellt. Zweifel an der vorteilhaften Verwendung erheben sich aufserdem schon bei genauem Verfolg der Wirkungsweise der Maschine. Es mufs nämlich bei dem kontinuierlichen Gange der Maschine der Druck in dem Expansionsraume nicht viel geringer sich herausstellen als in dem Röhrenkondensator. Nun ist zwar nach dem Vorhergehenden klar, dafs die überhaupt zu ermöglichende Temperaturerniedrigung auch in diesem Falle erreicht wird und vollständig ausgenutzt werden kann, wofern nur die bis zu einem gewissen Grade durch das Kühlwasser abgekühlte Luft in einen geschlossenen Raum geschafft wird, worin sie durch ihre Expansion, wie früher gezeigt, dieselbe Temperaturabnahme erfährt, als wenn sie in einem abgesperrten Raume durch Überwindung eines äufseren Druckes in Gestalt eines sie von der freien Atmosphäre abschliefsenden Stempels expandiert wird. Der besondere Vorteil der vorgeführten Kaltluftmaschine soll aber darin bestehen, dafs die komprimierte und zu gleicher Zeit etwas abgekühlte Luft einen erheblichen Teil der Kompressionsarbeit übernimmt, und diese Forderung kann sie eben bei der Einrichtung der Maschine nicht gut erfüllen. In Europa werden aus diesem Grunde die Kaltluftmaschinen für Eisproduktion oder Zwecke der Bierbrauerei nicht mehr hergestellt, sie werden höchstens noch auf Schiffen geführt zum Kühlhalten des frischen Fleisches oder in grofsen Fleischhandlungen zum Einfrieren des für den Schiffstransport bestimmten Fleisches. Mehr Aussicht haben sie in heifsen und vom Verkehr abseits gelegenen Ländern, — in Kairo z. B. ist eine in Betrieb —, zumal wenn in der Nähe Flüsse mit starkem Gefälle oder grossen Wassermassen vorhanden sind, um die teuren Dampfmaschinen oder Rofswerke und andere, grosse Kosten erfordernde Betriebe ersparen zu können.

Nachdem man in neuerer Zeit aus diesen Gründen die theoretisch hochinteressanten Kaltluftmaschinen verlassen hat, sucht man augenblicklich die von Perkins erfundene Kaltdampf-

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

maschine — diese Bezeichnung hat ihr Zeuner gegeben, s. Civilingenieur 1881 p. 450 — zu modifizieren und zu verbessern. Diese Maschinen sind nun entweder Vacuum- oder Kompressionsmaschinen. Das Prinzip der Vacuum-Eismaschine ist durch den gewöhnlichen Versuch des Gefrierens von Wasser unter dem Rezipienten der Luftpumpe bei Anwesenheit konzentrierter Schwefelsäure gegeben. Bei den ausgeführten Eismaschinen, die von Carré in Paris und später von Eigel und Lesemeister in Köln konstruiert und von Windhausen in Berlin 1877 verbessert sind, ist der Schwefelsäurebehälter von der Luftpumpe getrennt. Die Verbesserungen beziehen sich hauptsächlich auf den kontinuierlichen Gang der Maschine, der durch eine zweicylindrige Luft- resp. Dampfpumpe erreicht wird. Für die Kaltdampfmaschinen sind als kälteerzeugende Medien angewandt oder in Vorschlag gebracht worden die Dämpfe von Äther, schwefliger Säure, Methyläther, Chlormethyl, Schwefelkohlenstoff, Ammoniak und Kohlensäure. Die Schwefelkohlenstoff- und Äthermaschinen scheiden aus zwei Gründen aus der Konkurrenz aus. Einmal ist der Druck im Arbeitscylinder bei den zur Anwendung kommenden Temperaturen sehr gering (0,06 bis 0,4 Atm.), so dafs ein Einströmen atmosphärischer Luft in den Dampfraum kaum zu vermeiden ist, ein Umstand, der einen korrekten Gang der Maschine besonders durch Erhitzen der Cylinderwandungen und Herabmindern der Schnelligkeit und Intensität des Verdampfens des flüssigen Mediums erschwert oder unmöglich macht. Sodann stellen sich, wie sich durch rein theoretische Rechnungen nachweisen läfst, die Dimensionen des Arbeitscylinders als sehr grofse heraus, so dafs z. B. der Cylinder einer Äthermaschine das 15fache Volumen von dem einer Ammoniakmaschine haben mufs, wenn die Leistungen beider im übrigen dieselben sein sollen, während eine Kohlensäuremaschine nur den 6. Teil dieses Volumens beansprucht. Ammoniakmaschinen sind in grofser Zahl hergestellt worden. In der Brauerei von Sedlmayer in München können durch eine solche Kaltdampfmaschine täglich 800 Centner Eis geliefert werden. In der neuesten Zeit hat man sich jedoch auf die mit Kohlensäure arbeitenden Kaltdampfmaschinen gelegt, mit deren Herstellung sich augenblicklich in Berlin zwei Erfinder beschäftigen, Raoul Pictet, bekannt durch die ihm zuerst gelungene Flüssigmachung von Wasserstoff und Sauerstoff, der seine Maschine mit einer zweiten verband, die mit schwefliger Säure arbeitete, und F. Windhausen, welcher soeben eine vielversprechende „Maschine zum Komprimieren von Kohlensäure und zur Kälte-Erzeugung mittelst derselben“ konstruiert hat. Von der letztgenannten Maschine gebe ich, da sie unzweifelhaft eine bedeutende Zukunft hat, eine ausführlichere Beschreibung.

Die Hauptteile der Maschine sind der Refrigerator oder Verdampfer, die Kompressionspumpe und der Kondensator. In der Kompressionspumpe werden Kohlensäuredämpfe bei z. B. $+20°$ C auf 59 Atm. komprimiert, worauf sie in Schlangen oder Spiralen geleitet werden, welche von Kühlwasser umgeben sind. Durch die Abkühlung der Dämpfe im Kondensator wird ein Teil der Dämpfe flüssig, die flüssige Kohlensäure durchläuft in Schlangen einen zweiten Raum, welcher mit einer Flüssigkeit angefüllt ist, deren Gefrierpunkt unter Null liegt. In diesem zweiten Raume, dem Refrigerator, verdampft die Flüssigkeit wieder und entzieht die dazu nötige Wärme der umgebenden Flüssigkeit, einer Chlorcalcium- oder Alkohollösung. Das Spiel der Maschine wird durch Figur 2 anschaulicher werden. P_1 ist die Kompressionspumpe, K der Kondensator, R der Refrigerator. Die Kompressionspumpe ist ein U-förmiger Cylinder, der zum Teil mit einer Flüssigkeit, welche Kohlensäure nicht oder nur wenig absorbiert, angefüllt ist. In dem Teile A_1 dieses Cylinders befindet sich über der sogenannten Druckflüssigkeit — Glycerin — die

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

zu komprimierende Kohlensäure. Beim Niedergange des Kolbens B in dem anderen Schenkel A der Pumpe wird die Flüssigkeit in A_1 emporgehoben, wodurch der für die Flüssigkeit zu Gebote stehende Raum verringert wird, bis bei einem Drucke von 60 bis 70 Atm. die Kohlensäure durch das Druckventil b in den Raum C und von da durch die starkwandige Röhre P in den Kondensator K entweicht. Die Schlangen, welche die stark komprimierte Kohlensäure umschliefsen, werden von kaltem Wasser umspült, welches durch die Röhre S ein- und durch T ausfliefst. Bei dem hohen Drucke wird nun durch diese Abkühlung ein Teil der Kohlensäure flüssig, der sich unten ansammelt und durch einen Kanal, welcher durch ein Schraubenventil und einen Dreiwegehahn geöffnet und geschlossen werden kann und der nach dem Refrigerator R führt, in den letzteren übergeleitet werden kann. Hier, wo der Druck bedeutend geringer ist als im Kondensator, verdampft die Kohlensäure wieder. Durch das Verdampfen entzieht sie zunächst sich selbst und dann dem umgebenden Mittel, den Röhren und der Salz- (Chlorcalcium-), Glycerin- oder Alkohollösung Wärme, bis sie in Dampfform bei 17 bis 20 Atm. und einer Temperatur von —20° bis —25° durch die Kompressionspumpe angesaugt wird. Nachdem nämlich die komprimierte Kohlensäure durch das Druckventil b zum gröfsten Teil aus A_1 entwichen ist, geht der Stempel b zurück, infolge dessen sich das Ventil b von selbst schliefst. Bei weiterem Rückgange des Stempels wird der Druck in A_1 von 60 bis 70 Atm. bis auf 10 und weniger verringert; sobald nun der Druck in A_1 kleiner wird als in den Schlangen des Refrigerators, strömt die unter einem Druck von noch 17 Atm. stehende Kohlensäure durch das Rohr Q nach A_1 zu, treibt das Saugventil a zurück, strömt in A_1 ein, um beim abermaligen Vorgange des Kolbens von neuem komprimiert zu werden.

Da in dem Cylinder der Pumpe ein enormer Druck herrscht, so müssen besondere Vorsichtsmafsregeln getroffen werden, damit nicht Druckflüssigkeit zwischen Cylinderwand und Kolben hindurch aus der Pumpe austrete und so nach kurzer Zeit ein Nachfüllen von Flüssigkeit und damit eine Unterbrechung des Betriebes nötig werde. Zu diesem Zwecke befindet sich zwischen Kolbenstange und der Wand des Cylinders ein Ringraum A_2, welcher durch den Gang h mit dem Raume h_1 in Verbindung steht; h_1 wiederum kann durch Öffnen des Saugventils g mit dem Kompressionsraume A in Verbindung treten. Ist nun Druckflüssigkeit durch die Mikroporen zwischen Kolben und Cylinderwand hindurch getreten, so sammelt sie sich in A_2 und tritt durch h in den Raum h_1. Beim Rückgange des Kolbens vermindert sich der Druck in A bis auf ungefähr 10 Atmosphären, während er in dem Ringe A_2 durch die Verkleinerung des Raumes sich vergröfsert. Sobald nun der Druck in A_2 gröfser als in A geworden ist, wird das Rückschlagventil g geöffnet und die Flüssigkeit tritt in den Raum A. Sollte aber doch noch Flüssigkeit aus A_2 durch die Liderung i der Kolbenstange hindurchtreten, so mufs sich diese in einem zweiten Ringraume m, der zwischen der ersten und einer zweiten Liderung k der Stange angebracht ist, ansammeln. Beim Niedergange des Kolbens geht nun diese Flüssigkeit durch den Kanal p, das geöffnete Absperrventil o und das Saugventil n in den Ringraum A_2, aus dem sie beim Aufgange des Kolbens in den Raum A gelangt. Durch diese Vorrichtungen wird ein Verlust an Druckflüssigkeit und Kohlensäure durch die Dichtungen des Kolbens und der Kolbenstange hindurch vermieden; aufserdem geht, da die Druckflüssigkeit Glycerin ist, Kolben und Kolbenstange stets in Öl, so dafs ein besonderes Schmieren erspart wird. Der Kanal q und der Hahn r dienen zum Füllen der Pumpe. Sollte beim Niedergange des Stempels aufser der komprimierten Kohlen-

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

säure auch Druckflüssigkeit durch das Druckventil b austreten, so sammelt sich diese in dem Raume C, von dem aus ein Kanal e in denselben Raum führt, in welchem das aus dem Refrigerator kommende Rohr Q mündet. Wird nun beim Aufgange des Kolbens Kohlensäure durch das Ventil a eingesaugt, so strömt zugleich die Flüssigkeit durch a in A^1 ein.

Wenn man mittelst dieser Kohlensäure-Kaltdampfmaschine nur Kälte erzeugen will, so läfst man die im Refrigerator abgekühlte Salz- oder Alkohollösung durch das Rohr T_1 in die abgekühlten Räume oder einen Eisgenerator abfliefsen. Nachdem sie dort einen grofsen Teil ihrer Kälte abgegeben, kehrt sie relativ erwärmt durch das Rohr S_1 in den Refrigerator zurück, um dort von neuem abgekühlt zu werden. Von den Leistungen dieser Maschine, die in einem Exemplare schon in einer Augsburger Bierbrauerei arbeitet, giebt nachstehende Tabelle ein Bild.

Nummern der Maschine	I	II	III	IV	V	
Kälewirkung in Calorieen per Stunde	2500	6000	35000	70000	280000	Cal.
Eisproduktion per Stunde in kg	25	50	250	500	2000	kg
Eisproduktion per Tag à 24 Stunden in Ctr. à 50 kg	12	24	120	240	960	Ctr
Kondensationswasser von 8° C. per Stunde in cbm (bei höherer Temperatur entsprechend mehr)	0,4	0,8	4,5	9	36	cbm
Arbeitskraft in Pferdestärken ca.	2	3	10	18	68	
Preis der Maschine zum Kühlen von Salzwasser bis event. — 18° C.		6500	16000	24000	67000	M.
Preis der Maschine mit Eisapparat	5000	8000	19000	30000	90000	M.
Preis der Dampfmaschine excl. Kessel { ohne Kondensation	1000	1400	3500	5000	9600	M.
Preis der Dampfmaschine excl. Kessel { mit "				6000	15000	"

Dieselbe Maschine läfst sich auch zur Gewinnung von flüssiger Kohlensäure verwenden. Für diesen Zweck wird das Rohr Q mit einem Kohlensäure-Entwicklungsapparat verbunden, und Kondensator sowohl wie Refrigerator sind beide mit Kühlwasser angefüllt, welches durch S und S_1 ein- und durch T und T_1 ausströmt, es fungiert also auch der Refrigerator als Kondensator. Die flüssige Kohlensäure gelangt in den Verbindungskanal von K und R und von da durch den Dreiweghahn in den Raum M, aus welchem sie durch eine Röhre hindurch, die mittelst eines Schraubenventils gesperrt werden kann, auf Flaschen gezogen wird.

Zum Schlusse bringe ich eine von Zeuner a. a. O. gegebene schematische Darstellung, soweit sie sich für den ersten physikalischen Unterschied verwerten läfst, die in sehr übersichtlicher Weise den Zusammenhang von Heifs- und Kaltdampfmaschinen mit den Heifs- und Kaltluftmaschinen vorführt. Der Röhrenkomplex A in Figur 3 ist, wenn die ganze Anlage eine Kaltdampfmaschine ist, mit einem Gemische von Flüssigkeit und Dampf eines von den früher genannten Stoffen, z. B. von Kohlensäure, angefüllt; der dort herrschende Druck ist so niedrig, dafs Flüssigkeit in Dampf übergeführt wird, wodurch die Flüssigkeit B, welche die Zwischenräume

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

der Röhren und den ganzen Röhrenkomplex umgiebt, es ist meistens eine Salzlösung, Wärme entzogen wird. A ist also unser Refrigerator R in Figur 2, der auch Verdampfer oder Dampfkessel genannt wird. Damit die Salzlösung möglichst Wärme abgiebt, wird sie durch eine Vorrichtung in der Richtung der Pfeile in Umlauf gebracht. Der Raum B kann entweder direkt als Eisgenerator verwandt werden, indem man Blechzellen, die mit gewöhnlichem oder destilliertem Wasser angefüllt sind, in die abgekühlte Salzlösung stellt, oder die abgekühlte Flüssigkeit wird in andere Räume geleitet, aus denen sie erwärmt wieder in den Raum B zurückkehrt, um dort die unterwegs aufgenommene Wärme abzugeben. Die Dämpfe der Kohlensäure oder einer anderen intensiv verdampfenden Flüssigkeit werden nun aus den Röhren A in den Dampfcylinder C gesaugt, welcher der Kompressionspumpe in Figur 2 entspricht, und zwar durch das Saugventil a beim Hingange des Kolbens. Bei seinem Rückgange wird a geschlossen und der Dampf bis zu einer bestimmten Atmosphärenzahl komprimiert. Bei dieser Zahl wird das Druckventil b geöffnet, und der Dampf strömt durch den Kanal k in das Röhrensystem E. Die Röhren E sind von Kühlwasser umgeben, und da aufserdem der Druck in E ein sehr hoher ist, wird der Dampf in Flüssigkeit übergeführt, E ist also der Kondensator der Figur 2. Diese Flüssigkeit wird durch das Saugventil c in den Cylinder D gesaugt und dort abgesperrt, worauf sie bis zu Ende des Kolbenganges expandiert und dabei zu einem Gemische von Flüssigkeit wird; beim Rückgange des Kolbens wird sie aus D, dem Speisecylinder, durch das Ventil d in den Verdampfer A geschafft, womit der Kreis geschlossen ist. Die Anlage des Cylinders D wird von einer theoretisch vollkommenen Kalt-Dampfmaschine gefordert, um die Expansionsarbeit der Flüssigkeit nichts verloren gehen zu lassen. Bei wirklich ausgeführten Maschinen spart man, wie wir in Figur 2 sehen, die Anlage, da der Arbeitsgewinn ein nur geringer ist, und die Flüssigkeit begiebt sich unter Dampfbildung direkt in den Verdampfer oder Refrigerator.

Die Kaltdampfmaschine geht in eine Heifsdampfmaschine, welche gewöhnlich kurzweg Dampfmaschine genannt wird, über, wenn die Flüssigkeit B unter Atmosphärendruck eine Temperatur von über 100° C. besitzt, wodurch sie in den Stand gesetzt wird, die in den Röhren A befindliche Flüssigkeit, gewöhnlich Wasser, bis zum Verdampfen zu erhitzen. In der Praxis jedoch ersetzt man diese Flüssigkeit durch Feuergase, welche die Röhren A umspülen. Der in A entwickelte Wasserdampf geht nun durch das Ventil a_1 in den Cylinder C, welcher jetzt Arbeits- oder Dampfcylinder genannt wird, und treibt den Kolben nach der entgegengesetzten Seite. Bei dem Rückgange des Kolbens, der auf verschiedene Weise, jenachdem die Maschine eine Nieder- oder Hochdruckmaschine ist, bewerkstelligt wird, wird der Dampf durch b_1 hindurch in den Kondensator E geschoben, in welchem, umgekehrt wie vorhin, jetzt der Druck geringer ist als in A. Von dort wird Wasser und Dampf durch den Cylinder D angesaugt und, nachdem durch die Expansion der Dampf teilweise flüssig geworden, beim Rückgange des Stempels die ganze Masse in den Kessel A zurückgeführt. Während also bei den Kaltdampfmaschinen in dem Cylinder C Arbeit verbraucht und in D Arbeit gewonnen wird, wird bei den Heifsdampfmaschinen umgekehrt Arbeit in C gewonnen und in D verbraucht. Bei den ausgeführten Heifsdampfmaschinen fehlt der Cylinder D; dafür ist eine Speisepumpe eingeschaltet, welche Wasser ansaugt und in den Kessel A drückt.

Dasselbe Schema als Kaltluftmaschine betrachtet, stellt C den Kompressionscylinder vor. Die in C stark komprimierte und erhitzte Luft geht nach E, dem Kühlapparat, von wo sie in

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

den Cylinder D, den Expansionscylinder gelangt; dort expandiert sie unter Repulsion des Kolbens und wird bei dessen Vorgang in den Kessel A geschafft, wo sie Wasser zum Gefrieren bringt. Durch die Aufnahme von Wärme aus dem abzukühlenden Mittel etwas erhitzt, wird sie wieder in den Kompressionscylinder geschafft und der Kreisprozess ist geschlossen. Wird die abgekühlte Luft aus dem Expansionscylinder direkt in andere Räume geleitet, so fällt der Kessel A fort und in den Cylinder C wird die Luft aus der freien Atmosphäre eingesaugt.

Die Kaltluftmaschine endlich wird zur Heifsluftmaschine, wenn gerade umgekehrt der Kessel A mit stark komprimierter und durch Feuergase sehr erhitzten Luft angefüllt ist; im übrigen ist der Prozess hier derselbe wie bei der Heifsdampfmaschine.

Druck von W. Pormetter in Berlin.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf