

Zur Theorie der Kühlverfahren von Linde, Siemens und Mix mittels Kaltluftmaschine.

Von Dr. Paul Berkitz, Charlottenburg.

Die Theorie der Kaltluftmaschinen hat infolge des Erfolges, den *Linde* durch sein Luftverflüssigungsverfahren errungen hat, im Laufe der letzten Jahre eine erhöhte Bedeutung erlangt, da ja die Verwendung der flüssigen Luft in Wissenschaft und Technik, wenn auch nicht in so hohem Masse, wie man nach den ersten brauchbaren Versuchsergebnissen vielfach erwartet hat, so doch immerhin stetig und sicher zugenommen hat.

Die Früchte, welche *Linde* zeitigte, förderten die alten Luftverflüssigungsversuche von *Siemens* aus der Vergessenheit, der sie bereits anheimgefallen waren, wieder ans Tageslicht.

Gleichzeitig bezw. vor *Lindes* Versuchen wurde dagegen ein scheinbar ganz anderes Luftverflüssigungsverfahren, das sich von dem alten *Siemensschen* Verfahren nur durch Fortlassung des zur Gewinnung von mechanischer Nutzarbeit dienenden Expansionszylinders unterscheidet, von dem Naturwissenschaftler *Conrad Mix* in Berlin gefunden und auf Grund des ersten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie als richtig nachgewiesen.

Im Anschluss an die vorgenannten Kühlverfahren, insbesondere aber infolge des *Lindeschen* Kühlverfahrens, durch das die permanenten Gase, wie Stickstoff, Sauerstoff und selbst Wasserstoff, in grösseren Mengen verflüssigt worden sind, sind vielfach theoretische Arbeiten über die verschiedenen Kühlverfahren mittels der Kaltluftmaschine und über die Ausführbarkeit dieser Verfahrensarten in den Fachzeitschriften veröffentlicht worden. In solchen Arbeiten sind jedoch nicht selten Aussprüche enthalten, welche, insbesondere soweit sie sich auf das *Siemenssche* und das aus demselben abgeleitete Verfahren von *Mix* beziehen, unhaltbar sind bezw. irrige Vorstellungen über deren Durchführbarkeit erwecken. Da die Prüfung und Bewertung dieser drei wichtigsten Kühlverfahren mittels der Kaltluftmaschine auch über das Wesen des *Lindeschen* Verfahrens neues und klares Licht ausstrahlen dürfte, so soll dieser Gegenstand unter möglichster Benutzung der früheren Arbeiten hier eingehend besprochen werden; insbesondere sollen die von *Mewes* in „*Dinglers polytechn. Journal*“ sowie in der „*Zeitschrift für die gesamte Kälteindustrie*“ veröffentlichten theoretischen Arbeiten über das *Lindesche* Kühlverfahren berücksichtigt werden, in welchen eine Prüfung der Grundlagen der Theorie, nämlich der *Joule-Thomson'schen* Formel

$$\delta_0 = \frac{p_2 - p_1}{4} \cdot \left(\frac{289}{T}\right)^2$$

an der Hand der Grundgesetze der mechanischen Wärmetheorie versucht worden ist. Auch *Joules* Versuche selbst sollen eingehend besprochen werden.

Den bisherigen Standpunkt der Theoretiker und Praktiker kennzeichnet Professor *M. Schröter* in dem Vortrage, welchen er über „*Lindes* Verfahren der Sauerstoffgewinnung mittels verflüssigter Luft“ in der 36. Hauptversammlung des Vereins deutscher Ingenieure am 19. August 1895 zu Aachen gehalten und in der Zeitschrift des Vereins Bd. 39 H. 39 veröffentlicht hat, auch heute noch für weite Fachkreise als richtig geltend dahin, dass im Gegensatz zu den Kaltdampfmaschinen die Kaltluftmaschine ausschliesslich auf der durch äussere Arbeit — Nutzarbeit — zu erzielenden Abkühlung der Luft beruhe, welche zuvor in einem Kompressionszylinder auf den gewünschten Druck (6 bis 8 Atmosphären) gebracht und durch Kühlwasser auf ihre ursprüngliche Temperatur abgekühlt wurde. (Vgl. den Streit zwischen Prof. *Raoul Pictet* und *Linde* über die Sauerstoffgewinnung nach *Pictet'schem* Verfahren.)

Auf ein solches Kühlverfahren, bei welchem gleichzeitig noch das Gegenstromprinzip benutzt wurde, hat *William Siemens* im Jahre 1857 ein englisches Patent, No. 2064,

genommen. Die Ausführung dieses theoretisch günstigsten Verfahrens scheiterte damals an praktischen Schwierigkeiten.

Da die Kompression möglichst isothermisch und die Expansion unter äusserer Arbeitsleistung in einem Zylinder adiabatisch erfolgt, so gelten für die Kompression und Expansion des *Siemensschen* Verflüssigungsverfahrens die bekannten thermodynamischen Grundformeln erstens für die Kompressionsarbeit in Wärmemass

$$AL = Q = AB T l u \frac{p_1}{p_0} \dots \dots \dots (1)$$

worin

$$A = \frac{1}{425}, B = 29,269 \text{ (für Luft), } T = 289,$$

p_0 der Atmosphärendruck, p_1 der Höchstdruck ist, zweitens für die Expansionsarbeit

$$AL_1 = Q_1 = c_v (T - T_x) \dots \dots \dots (2)$$

also theoretischer Arbeitsaufwand

$$Q - Q_1 = AB T l u \frac{p_1}{p_0} - c_v (T - T_x) \quad (3)$$

drittens für die Beziehung zwischen Temperatur, Volumen und Druck

$$\frac{T}{T_x} = \left(\frac{v_1}{v_0}\right)^{k-1} = \left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \dots \dots \dots (4)$$

Infolge der Vorkühlung der erzeugten Pressluft nach dem Gegenstromprinzip sinkt die Temperatur T immer mehr, so dass, wie Gleichung 2 erkennen lässt, die Expansionsarbeit stetig abnimmt und somit die verbrauchte Arbeit in dem Arbeitsprozess bis zu einem dem stationären Zustande entsprechenden Grenzwert zunimmt.

Ferner bemerkt *Schröter* a. a. O., dass man in allen technischen Lehrbüchern den Satz findet, dass eine Kaltluftmaschine vollkommen unwirksam werden müsste, wenn man nach dem Beispiel der Kaltdampfmaschine den Expansionszylinder weglassen und die Luft einfach durch ein Drosselventil ausströmen lassen wollte; diese Anschauung gründe sich darauf, dass man mit einer für technische Zwecke genügenden Genauigkeit die Luft als ein vollkommenes Gas betrachtet, bei welchem zwischen den einzelnen Molekülen gar keine Kräfte wirken, und dass daher die gesamte innere Arbeit durch die zur Veränderung der Temperatur erforderliche Wärme geleistet wird.

Die hier von *Schröter* vertretene Anschauung älterer Kühlmaschineningenieure ist nicht nur theoretisch unhaltbar, sondern auch längst experimentell durch die Versuche von *de Saint-Venant* und *Wantzel* (*Mémoire et expériences sur l'écoulement de l'air, déterminé par des différences de pressions considérables*; *Journal de l'École polytechnique* Bd. 16, 1839) und von *Weissbach* (*Lehrbuch der Ingenieur- und Maschinenmechanik*, 3. Auflage, 1855 Bd. 1, S. 820) als unrichtig nachgewiesen worden.

Auch in der neuesten Ausgabe von *Zeuners* Thermodynamik Th. I, S. 163 und Th. II, S. 290 und 291, wird jene Anschauung *Schröters* vertreten und durch eine angebliche Beobachtung *Joules* begründet, nach welcher die in einem Gefässe eingeschlossene hochgespannte atmosphärische Luft keine Temperaturänderung erleidet, wenn man dieselbe nach einem zweiten Gefässe, welches vorher luftleer gepumpt wurde, expandieren lässt, vorausgesetzt, dass man die Temperatur nach der Druckausgleichung und nach dem Uebergange in den Ruhezustand beobachtet und eine Wärmeabfuhr von aussen nicht stattfand.

Zeuner hat leider die Stelle nicht angegeben, wo *Joule* diesen Versuch veröffentlicht hat. Die einzige Stelle, welche ich über diese Frage in *Joules* Abhandlungen (*On the Thermal Effects experiment W. ced by air in rushing through small Apertures. By J. P. Joule and Thomson. Phil. Mag., 4th Series, Suppl. vol. p. 481, Joule, Scientific Papers, Bd. II.*