

Der Unterschied zwischen den Jouleschen Versuchen und der Annahme innerer Arbeitsleistung gegenüber dem vorstehenden Beweise lässt sich erklären oder der dadurch bedingte Widerspruch lässt sich beseitigen, wenn gezeigt werden kann, dass die beobachtete Temperaturerniedrigung nicht durch innere Arbeitsleistung, sondern entsprechend dem *Mayerschen* Aequivalentgesetze durch äussere Arbeit in ähnlicher Weise wie bei dem *Siemensschen* Kühlverfahren bewirkt wird.

Aus der *Joule-Thomson*schen Formel hat *Schröter* a. a. O. ohne weiteres den Schluss gezogen, dass angesichts einer so geringfügigen Abkühlung der oben erwähnte Ausspruch ganz zutreffend ist, dass nämlich eine Kaltluftmaschine ohne Expansionszylinder technisch vollkommen wertlos wäre. In der ganzen Untersuchung *Joules* ist jedoch nirgends der Nachweis geführt, dass thatsächlich nicht eine dem beobachteten Temperaturabfall gleichwertige äussere Arbeit bei den betrachteten Vorgängen geleistet wird; sondern es wird lediglich zur Erklärung der geringen Temperaturerniedrigung innere Arbeitsleistung angenommen.

Zur Prüfung des vorliegenden Gegenstandes müssen somit in erster Linie die Fragen entschieden werden, ob nicht beim Fortfall des Expansionszylinders, entsprechend der *Jouleschen* Versuchsanordnung, doch noch äussere Arbeit geleistet wird, daher die *Joule-Thomson*sche Formel hier garnicht in betracht kommt, und ob ferner, wenn gleichwohl äussere Arbeit geleistet — wohl verstanden nicht nutzbar gemacht — wird, diese Arbeit eine genügende Abkühlung bewirken kann, und nach welchem Gesetze dies geschieht, und ob schliesslich die Formel und die Versuche von *Joule* und *Thomson* unanfechtbar sind.

Von alledem findet sich in der ganzen Litteratur über Kühlverfahren und Kälteindustrie bis auf die Patentanmeldung von *Mix* — D. R. P. 124 376 Klasse 12a — und die von *Mewes* über dessen Kühlverfahren veröffentlichten theoretischen Arbeiten nichts. Im Gegenteil hat sogar *Helmholtz*, dem das *Mixsche* Kühlverfahren zur Begutachtung vorgelegen hat, am 24. Juli 1893 in einem Briefe ein dahingehendes Gutachten abgegeben, dass er das Verfahren zur gewerbmässigen Herstellung fester Luft für vollkommen aussichtslos halte und in diesem Briefe folgendes geschrieben:

„Auf ihre erneute Eingabe vom 18. d. M. vermag ich mich nur dahin zu erklären, dass ich das von Ihnen der Reichsanstalt unterbreitete Verfahren zur gewerbmässigen Herstellung fester Luft für vollkommen aussichtslos halte.

Ihre Ausführungen vom 19. v. M. erhalten Sie beifolgend zurück; der darauf befindliche Eingangsstempel lässt erkennen, dass das Schriftstück hier vorgelegen hat.

Der Präsident  
der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.  
v. Helmholtz.“

*Helmholtz* hat das vorstehende Urteil wohl nur mit Rücksicht auf die ihm sicher bekannten, oben erwähnten Versuche *Joules* und *Thomson*s gefällt.

Nunmehr ist der theoretische Nachweis zu führen, dass eine Kaltluftmaschine, welche den Expansionszylinder weglässt, lediglich infolge der durch Fortschieben der Atmosphäre geleisteten, allerdings verloren gehenden oder nicht mechanisch nutzbar zu machenden äusseren Arbeit ohne bzw. auch zusammen mit der nicht zu vermeidenden — eventuell — inneren Arbeit eine bedeutende Kühlwirkung nach dem *Mixschen* Verfahren hervorbringen kann. Um die theoretischen Formeln nicht zu verwickelt zu gestalten, soll die Abkühlung durch innere Molekulararbeit unberücksichtigt bleiben, da diese Abkühlung, wie sich zeigen wird, nur einen geringen Bruchteil der durch die verloren gehende, gegen die Atmosphäre geleistete äussere Arbeit bewirkten Abkühlung darstellt. Die von *Zeuner* in „Technische Thermodynamik“ Bd. 1, S. 40—44 u. ff. gegebenen Entwicklungen über diese Frage sollen, da die *Zeunersche* Darstellung ausserordentlich einfach und klar ist, hier, wie dies ja auch in der o. a. Arbeit von *Mewes* geschehen ist, möglichst wörtlich benutzt werden.

Es handelt sich im vorliegenden Falle um die Ausströmungsgesetze der atmosphärischen Luft unter Druck.

Die Grundformeln für die strömende Bewegung und für den Ausfluss der Gase ergeben sich aus den allgemeinen Strömungsformeln für eine Flüssigkeit. Nehmen wir an, dass irgend eine Flüssigkeit ohne Einwirkung äusserer Kräfte im Beharrungszustande durch ein Rohr mit horizontaler Achse, aber veränderlichem Querschnitt hindurchströmt, sodass in der Zeiteinheit durch jeden Querschnitt die gleiche Gewichtsmenge *G* hindurchfliesst. Geht nun durch den vorderen Querschnitt die Flüssigkeit mit überall gleicher Geschwindigkeit *w* parallel hindurch, so ist das in der Zeiteinheit durchgeströmte Flüssigkeitsvolumen gleich *Fw* und entsprechend das durch den hinteren Querschnitt *F<sub>1</sub>w<sub>1</sub>*.

Ist *v* das spezifische Volumen und *p* der Druck im vorderen Querschnitt und entsprechend *v<sub>1</sub>* und *p<sub>1</sub>* die Werte für den Querschnitt *F<sub>1</sub>*, so ist im Beharrungszustande

$$G v_1 = F_1 w_1 \text{ und } G v = F w \dots\dots\dots 1)$$

Bezeichnet man mit *U* den ganzen Betrag der inneren Arbeit und mit *H* denjenigen Teil der Gesamtenergie der Flüssigkeit, welcher der offenen fortschreitenden, mit der Geschwindigkeit *W* erfolgenden Bewegung entspricht, so ist die in der Gewichtseinheit enthaltene Arbeit gleich *U + H*, worin die Arbeit der fortschreitenden Bewegung *H* gleich deren lebendigen Kraft, also

$$H = \frac{W^2}{2g} \text{ ist.} \dots\dots\dots 2)$$

Beim Uebergang vom Querschnitt *F<sub>1</sub>* zum Querschnitt *F* wird bei entsprechender Bezeichnung eine Arbeit gleich

$$(U + H) - (U_1 + H_1)$$

aufgewendet oder verbraucht.

Die Differenz *H - H<sub>1</sub>* bezeichnet man als die Zunahme der Strömungsenergie. Ist nun die Summe der Widerstände, welche die Flüssigkeit auf dem Wege *F<sub>1</sub>* nach *F* zu überwinden hat, gleich *W*, so wird die ganze auf diesem Wege verbrauchte Arbeit

$$L = (U + H) - (U_1 + H_1) + W \dots\dots\dots 3)$$

Während des Strömens der Flüssigkeit legt die Hinterfläche *F<sub>1</sub>* in dem Zeitelement *dt* den Weg *w<sub>1</sub> dt* und die Vorderfläche den Weg *w dt* zurück. Es ist *F<sub>1</sub> p<sub>1</sub>* der hinter dem Querschnitt *F<sub>1</sub>* auf den Flüssigkeitskörper ausgeübte Druck, so dass auf die Flüssigkeit die Arbeit *F<sub>1</sub> w<sub>1</sub> p<sub>1</sub> dt* übertragen wird, während die Vorderfläche *F* ganz entsprechend die Arbeit *F w p dt* noch vorwärts in Richtung der Strömung abgibt. Die vom Flüssigkeitskörper in der Zeit *dt* aufgenommene Arbeit ist somit mit Rücksicht auf Gleichung 1)

$$F_1 w_1 p_1 dt - F w p dt = (p_1 v_1 - p v) G dt$$

Da wegen des Beharrungszustandes in der Zeit *dt* das Flüssigkeitsgewicht *G dt* sowohl in den Raum *F<sub>1</sub> F* ein — als auch aus demselben durch die Fläche *F* ausgetreten ist und eine Aenderung des Bewegungszustandes nicht stattfindet, so stellt der vorstehende Ausdruck die Arbeit dar, welche das Flüssigkeitsgewicht *G dt* während seiner Bewegung *F<sub>1</sub>* nach *F* aufgenommen hat. Für die endliche Zeit *t* ist diese Arbeit gleich  $(p_1 v_1 - p v) G t$ , für die Gewichtseinheit also, indem man *G t = 1* setzt, gleich *p<sub>1</sub> v<sub>1</sub> - p v*. Wird der Gewichtseinheit Flüssigkeit während der Bewegung durch *F<sub>1</sub>* und *F* von aussen her die Wärmemenge *Q* zugeführt, so ist, da die Widerstandsarbeit *W* in Wärmemass *A W* ist, die zugeführte Wärmemenge

$$Q + A W, \text{ worin } A = \frac{1}{425} \text{ ist,}$$

so dass die gesamte Arbeitsleistung in mechanischem Masse

$$L = p_1 v_1 - p v + \frac{Q}{A} + W \dots\dots\dots 4)$$

wird. Durch Gleichsetzen mit Gleichung 3) erhält man die Grundgleichung des vorliegenden Problems

$$Q = A [p v - p_1 v_1 + (U + H) - (U_1 + H_1)] \dots\dots\dots 5)$$

oder, wenn man zum Differential übergeht

$$dQ = A [d(p v) + dU + dH] \dots\dots\dots 6)$$

Liegt der Kanal nicht horizontal, sondern der Querschnitt *F<sub>1</sub>* um *h<sub>1</sub>* und der Querschnitt *F* um *h* unter der Hori-