Die calorische Maschine

Redtenbacher, Ferdinand

Mannheim, 1853

Notwendigkeit der Expansion

urn:nbn:de:bsz:31-266513

Leistungen der Maschine, wenn dieselbe ohne Expansion arbeiten würde.

Nothwendigkeit der Expansion.

Für eine ohne Expansion wirkende Maschine ist $\frac{L_1}{L} = 1$ und dann wird der Werth von $\left(\frac{W}{1}\right)$ vermöge (52):

$$\left(\frac{\overline{W}}{1}\right) = \frac{\mathfrak{A}}{s\gamma_0}\frac{T_0 - T_1}{T_0 - \varDelta}\left\{\frac{1 - \frac{r}{p}}{1 + M}\,\frac{1 + \alpha t_1}{t_1 - t_0} - \frac{1 + \alpha t_0}{t_1 - t_0}\,\text{lognat.}\,\frac{p}{\mathfrak{A}}\right\}$$

Zieht man diesen Ausdruck von (52) ab, so findet man:

$$\left(\frac{W}{1}\right) - \left(\frac{\overline{W}}{1}\right) = \frac{\mathfrak{A}}{s\gamma_0}\frac{T_0 - T_1}{T_0 - \varDelta}\left\{\begin{array}{l} + \dfrac{1 + \alpha t_1}{t_1 - t_0}\,\text{lognat.}\,\dfrac{L + ML}{L_1 + ML} \\[2ex] - \dfrac{1 + \alpha t_1}{t_1 - t_0}\,\dfrac{\left(\frac{r}{p} + M\right)\left(1 - \frac{L_1}{L}\right)}{\left(1 + M\right)\left(\frac{L_1}{L} + M\right)} \end{array}\right\}$$

oder:

$$\left(\frac{W}{1}\right) - \left(\frac{\overline{W}}{1}\right) = \frac{\mathfrak{A}}{s\gamma_0}\frac{T_0 - T_1}{T_0 - \varDelta}\,\frac{1 + \alpha t_1}{t_1 - t_0}\left\{\begin{array}{l} \text{lognat.}\,\dfrac{L + ML}{L_1 + ML} \\[2ex] - \dfrac{\left(\frac{r}{p} + M\right)\left(1 - \frac{L_1}{L}\right)}{\left(1 + M\right)\left(\frac{L_1}{L} + M\right)} \end{array}\right\}$$

Vernachlässigt man für diese Vergleichung die schädlichen Räume und die Reibungswiderstände der Maschine, und nimmt ferner für die Expansionsmaschine die vortheilhafteste Expansion an, so ist zu setsen:

$$M = o, \quad r = \mathfrak{A}, \quad \frac{L_1}{L} = \frac{r}{p} = \frac{\mathfrak{A}}{p}, \quad \left(\frac{W}{1}\right) = \left(\frac{\mathfrak{W}}{1}\right)$$

und dann wird der letzte Ausdruck:

$$\left(\frac{\mathfrak{W}}{1}\right) - \left(\frac{\overline{W}}{1}\right) = \frac{\mathfrak{A}}{s\gamma_0}\frac{T_0 - T_1}{T_0 - \varDelta}\,\frac{1 + \alpha t_1}{t_1 - t_0}\left\{\log.\,\frac{p}{\mathfrak{A}} - 1 + \frac{\mathfrak{A}}{p}\right\}$$

Dividirt man diese Gleichung durch die Gleichung (55), so findet man:

$$\frac{\binom{\mathfrak{W}}{1}-\binom{\overline{W}}{1}}{\binom{\mathfrak{W}}{1}}=\frac{1+\alpha\,t_1}{\alpha\,(t_1-t_0)}\left\{1-\frac{1-\frac{\mathfrak{A}}{p}}{\text{lognat.}\,\frac{p}{\mathfrak{A}}}\right\}$$

Setzen wir: $t_0 = 10^0$, $t_1 = 300^0$, $\alpha = 0{\cdot}00375$, dann wird für

$\frac{p}{\mathfrak{A}}=\frac{L}{L_1}$ . . =	2	3	4	5
$\frac{\binom{\mathfrak{W}}{1}-\binom{\overline{W}}{1}}{\binom{\mathfrak{W}}{1}}$ =	0·54	0·77	0·90	0·98
$\frac{\binom{\overline{W}}{1}}{\binom{\mathfrak{W}}{1}}$. =	0·46	0·23	0·10	0·02

Hieraus ersieht man die Nothwendigkeit der expandirenden Wirkung der Luft. Denn selbst bei schwacher Verdichtung und schwacher Expansion ist die Wirkung einer calorischen Maschine zwei Mal so günstig, als jene einer nicht expandirenden Maschine.

Bestimmung der Querschnitte des Expansionscylinders und Luftverdichtungscylinders einer zu erbauenden Maschine.

Die Querschnitte dieser Cylinder ergeben sich aus den bereits aufgefundenen Gleichungen.

Es folgt erstens aus der Gleichung (49), Seite 42:

$$A=\frac{\frac{E_n}{V\,p}}{\left\{\begin{array}{l}+\frac{L_1}{L}+\left(\frac{L_1}{L}+M\right)\text{lognat.}\,\frac{L+M\,L}{L_1+M\,L}\\-\frac{r}{p}-\left(\frac{L_1}{L}+M\right)\frac{1+\alpha\,t_0}{1+\alpha\,t_1}\,\text{lognat.}\,\frac{p}{\mathfrak{A}}\end{array}\right\}}\quad . \; . \; . \; (58)$$

Hat man vermittelst dieses Ausdruckes A berechnet, so findet man ferner aus Gleichung (47), Seite 41:

$$a = A \frac{L}{l} \frac{p}{\mathfrak{A}} \frac{\left(\frac{L_1}{L} + M\right) \frac{1 + \alpha t_0}{1 + \alpha t_1}}{1 - m \left(\frac{p}{\mathfrak{A}} - 1\right)} \quad \ldots \ldots \quad (59)$$

Auch findet man die in jeder Sekunde zu erwärmende Luftmenge q. Es ist nämlich vermöge (50):

$$q = A\,V \left(\frac{L_1}{L} + M\right) \frac{p}{\mathfrak{A}} \frac{\gamma_0}{1 + \alpha t_1} \quad \ldots \ldots \quad (60)$$

Der Ausdruck für A zeigt zunächst, dass der Querschnitt des Expansionscylinders der Kolbengeschwindigkeit (welche in dem Ausdruck für $\left(\frac{W}{1}\right)$ Gleichung 52 nicht erscheint) umgekehrt proportional ist. Man wird also diese Geschwindigkeit so gross annehmen, als es praktische Verhältnisse nur immer erlauben. Bei den feststehenden und Schiffsdampfmaschinen ist die Kolbengeschwindigkeit in der Regel 1 bis 1·3 Meter, bei den Lokomotiven dagegen 2 bis 3 Meter. Diese letztere Geschwindigkeit ist jedoch sowohl für die Wirkung des Dampfes auf die Maschine, als auch für den soliden Fortbestand der Maschine nachtheilig; es scheint daher rathsam zu sein, bei der Luftmaschine vorläufig nur eine Kolbengeschwindigkeit von 1 bis 1·3 Meter anzunehmen.

Aus der Gleichung (58) ersieht man ferner, dass der Cylinderquerschnitt von dem Grad der Lufterhitzung abhängt. Ist t_1 sehr gross, so fällt A klein aus. Am deutlichsten erkennt man den Einfluss von $t_1 - t_0$ auf A, wenn man in den Ausdruck für A, $M = o$, $\frac{L_1}{L} = \frac{r}{p}$ und überdies $r = \mathfrak{A}$ setzt, also eine absolut vollkommene Maschine annimmt, dann wird:

$$A = \frac{E_n}{\alpha\, V\, \mathfrak{A} \log. \frac{p}{\mathfrak{A}}} \frac{1 + \alpha t_1}{t_1 - t_0} \quad \ldots \ldots \quad (61)$$

und man sieht hieraus deutlich, dass der Cylinderquerschnitt bei starker Lufterhitzung klein ausfällt. Bei schwacher Erhitzung würde der Cylinder und dadurch die ganze Maschine eine ganz unausführbare Grösse erhalten. Obgleich also, wie wir gesehen haben, die Temperatur der Luft auf die Nutzwirkung, welche aus jeder im Brennstoff enthaltenen Wärmeeinheit gewonnen werden kann, beinahe keinen Einfluss hat, daher in dieser Hinsicht beinahe gleichgültig ist, so muss man sich doch, damit die Maschine nicht übermässig gross ausfällt, eine starke Erhitzung der Luft gefallen lassen, was, wie wir später sehen werden, zu Schwierigkeiten führt, welche die allgemeine Anwendung der Maschine fast bezweifeln lassen.

Aus dem Ausdruck (61), der jedoch nur für eine vortheilhafte Expansion annähernd richtig ist, ersieht man auch die Nothwendigkeit einer starken Compression der Luft, indem dadurch der Cylinderquerschnitt abermals verkleinert wird.

Damit also die Maschine nicht zu gross ausfällt, muss die Luft stark verdichtet und stark erhitzt werden, und muss die Geschwindigkeit des Expansionskolbens gross sein. Dies sind aber Bedingungen, deren Erfüllung zu sehr grossen praktischen Schwierigkeiten führen wird.

Was die Grösse der Verdichtungspumpe betrifft, so belehrt uns die Gleichung (59), was man auch ohne alle Rechnung leicht einsehen kann, dass eine starke Verdichtung und heftige Erhitzung der Luft und eine grosse Kolbengeschwindigkeit vortheilhaft sein müssen; denn wenn die Luft wenig verdichtet und wenig erhitzt wird, ist zur Hervorbringung einer gewissen Wirkung natürlich eine sehr grosse Luftmenge und daher auch eine grosse Pumpe nothwendig. Dadurch ist nun abermals die Construktion der Maschine sehr erschwert; denn es ist keine leichte Sache, eine grosse Verdichtungspumpe herzustellen, welche für eine Spannung von 3 bis 4 Atmosphären einen dauernden Luftverschluss gewährt.

Vergleichung der calorischen Maschine mit einer Dampfexpansions-Maschine hinsichtlich des Brennstoffbedarfes.

Diese calorische Maschine könnte natürlich nur dann von einer praktischen Bedeutung werden, wenn dieselbe hinsichtlich des Brennstoffverbrauches ein bedeutend günstigeres Resultat erwarten liesse als eine gut angeordnete Dampfmaschine. Eine Vergleichung dieser Maschine hinsichtlich ihres Brennstoffverbrauches ist daher von entscheidender Wichtigkeit. Das Einfachste und Ueberzeugendste was man in dieser Hinsicht auf dem Papier thun kann, sind numerische Rechnungen.

Erstes Beispiel.

Es sei für den Heizapparat:

$$t_0 = 10^\circ \qquad \varDelta = 200^\circ \qquad \lambda = 2 \qquad k = \frac{1}{253}$$

$$t_1 = 200^\circ \qquad s = 0{\cdot}2669 \qquad \mathfrak{H} = 6000$$

Ferner für die Maschine:

$$E_n = 75\,N_n \qquad p = 3 \times 10330 \qquad v = 1{\cdot}3$$
$$V = 1 \qquad r = 1{\cdot}5 \times 10330 \qquad m = 0{\cdot}05$$
$$M = 0{\cdot}05 \qquad \frac{L}{l} = 1 \qquad \gamma_0 = 1{\cdot}29$$

Für diese Annahmen geben zunächst die Gleichungen (D) Seite 27

$$T_0 = 1221\,,\quad T_1 = 305\,,\quad Q = 0{\cdot}207\,q\,,\quad B = \frac{q}{106}\,,\quad F_g = 21{\cdot}8\,q$$

und die Gleichungen (58), (59) und (60) geben dann ferner, wenn man die vortheilhafteste Expansion annimmt, für welche ist:

$$\frac{L_1}{L} = \frac{r}{p} = \frac{1{\cdot}5}{3} \;\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\; 0{\cdot}5$$

$$\frac{L_1}{L} + \left(\frac{L_1}{L} + M\right) \text{lognat.} \frac{L + M\,L}{L_1 + M\,L} = 0{\cdot}5 + 0{\cdot}55 \text{ lognat. } 1{\cdot}99 \;\ldots\; = 0{\cdot}8786$$

$$\text{lognat. } \frac{p}{\mathfrak{A}} = \text{lognat. } 3 \;\ldots\ldots\ldots\ldots\; = 1{\cdot}0986$$

$$\left(\frac{L_1}{L} + M\right) \frac{1 + \alpha\,t_0}{1 + \alpha\,t_1} = 0{\cdot}55\, \frac{1 + 0{\cdot}00375 \times 10}{1 + 0{\cdot}00375 \times 200} \;\ldots\ldots\; = 0{\cdot}3261$$

$$A = \frac{75\,N_n}{30990 \left\{ 0{\cdot}8786 - 0{\cdot}5 - 0{\cdot}3261 \times 1{\cdot}0986 \right\}} \;\ldots\ldots\; = \frac{N_n}{8{\cdot}4}$$

$$a = \frac{N_n}{8{\cdot}4}\; 3\; \frac{0{\cdot}3261}{1 - 0{\cdot}05 \times 2} \;\ldots\ldots\ldots\ldots\; = \frac{N_n}{7{\cdot}72}$$

$$q = \frac{N_n}{8{\cdot}4} \times 1 \times 0{\cdot}55 \times 3 \times \frac{1{\cdot}29}{1{\cdot}75} \;\ldots\ldots\ldots\ldots\; = \frac{N_n}{6{\cdot}9}$$

und wenn man diesen Werth von q in die obigen Ausdrücke für B und F_g einführt:

$$B = \frac{N_n}{6{\cdot}9}\, \frac{1}{106} \;\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\; = \frac{N_n}{731}$$

$$F_g = 21{\cdot}8\, \frac{N_n}{6{\cdot}9} \;\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\; = 3.1\,N_n$$

Diese Resultate sind nun in jeder Hinsicht sehr ungünstig und praktisch ganz unausführbar. Der Cylinderquerschnitt würde z. B. für eine Maschine von 100 Pferdekräften $\frac{100}{8{\cdot}4} = 12$ Quadratmeter werden und der Brennstoffverbrauch wäre in einer Stunde für jede Pferdekraft $\frac{3600}{731} = 5$ Kilogramm, also so gross, als bei einer sehr mittelmässigen Dampfmaschine. Man sieht hieraus, dass man mit schwachen Verdichtungen und schwachen Erhitzungen das Ziel nicht erreichen kann.

Machen wir nun ferner folgende Annahme:

$$t_0 = 10^\circ \qquad \varDelta = 300 \qquad s = 0{\cdot}2669 \qquad \mathfrak{H} = 6000$$
$$t_1 = 300 \qquad T_1 = \frac{1}{3} T_0 \qquad \lambda = 2 \qquad k = \frac{1}{253}$$

$$E_n = 75\,N_n \qquad p = 4 \times 10330 \qquad v = 1{\cdot}3$$
$$V = 1{\cdot}3 \qquad r = 1{\cdot}5 \times 10330 \qquad m = 0{\cdot}05$$
$$M = 0{\cdot}05 \qquad \frac{L}{l} = 1 \qquad \gamma_0 = 1{\cdot}29$$

so geben die Gleichungen D und (58), (59), (60), vorausgesetzt, dass abermals die vortheilhafteste Expansion angewendet wird:

$$T_0 = 1321\,, \quad T_1 = 440\,, \quad Q = 0{\cdot}330\,q\,, \quad B = \frac{q}{66{\cdot}6}\,, \quad F_g = 28{\cdot}8\,q$$

$$\frac{L_1}{L} = \frac{r}{p} = \frac{1{\cdot}5}{4} = \ldots\ldots = 0{\cdot}3750$$

$$\frac{L_1}{L} + \left(\frac{L_1}{L} + M\right) \text{lognat.}\,\frac{L + M\,L}{L_1 + M\,L} \ldots\ldots = 0{\cdot}7594$$

$$\text{lognat.}\ \frac{p}{\mathfrak{A}} \ldots\ldots = 1{\cdot}3863$$

$$\left(\frac{L_1}{L} + M\right) \frac{1 + \alpha\,t_0}{1 + \alpha\,t_1} \ldots\ldots = 0{\cdot}2074$$

$$A = \frac{75\,N_n}{41320 \times 1{\cdot}3\,\{0{\cdot}7594 - 0{\cdot}375 - 0{\cdot}2074 \times 1{\cdot}3863\}} \ldots\ldots = \frac{N_n}{69{\cdot}4}$$

$$a = \frac{N_n}{69{\cdot}4}\,4\,\frac{0{\cdot}2074}{0{\cdot}85} \ldots\ldots = \frac{N_n}{71}$$

$$q = \frac{N_n}{69{\cdot}4}\,1{\cdot}3 \times 0{\cdot}425 \times 4 \times \frac{1{\cdot}29}{2{\cdot}125} \ldots\ldots = \frac{N_n}{51{\cdot}7}$$

$$F_g = 28{\cdot}8\,\frac{N_n}{51{\cdot}7} \ldots\ldots = \frac{N_n}{1{\cdot}79}$$

$$B = \frac{N_n}{51{\cdot}7}\,\frac{1}{66{\cdot}6} \ldots\ldots = \frac{N_n}{3443}$$

Brennstoff in einer Stunde für eine Pferdekraft = 1·05 Kilogrammen.

Hier ist nun das Resultat hinsichtlich des Brennstoffverbrauches ein äusserst günstiges, denn die allerbesten Dampfmaschinen brauchen für jede Pferdekraft in einer Stunde wenigstens 2 Kilogramm Steinkohlen, also zwei Mal so viel, als wir für die calorische

Maschine gefunden haben. Was die Grösse der Maschine betrifft, so erscheint diese zwar ausführbar, aber doch noch immer zu bedeutend. Denn für eine Maschine von 100 Pferdekräften müsste der Expansionscylinder 1·44 Quadratmeter und der Pumpencylinder 1·4 Quadratmeter Querschnitt erhalten; wo hingegen der Cylinderquerschnitt einer 100pferdigen *Watt'schen* Niederdruckmaschine nur 1·13 Quadratmeter beträgt.

Berechnen wir nun noch für folgende Annahmen:

$t_0 = 10^\circ \qquad \Delta = 400 \qquad s = 0{\cdot}2669 \qquad \mathfrak{H} = 6000$

$t_1 = 400 \qquad T_1 = \frac{1}{3} T_0 \qquad \lambda = 2 \qquad k = \frac{1}{253}$

$E_n = 75\, N_n \qquad p = 5 \times 10330 \qquad v = 1{\cdot}3$

$V = 1{\cdot}3 \qquad r = 1{\cdot}5 \times 10330 \qquad m = 0{\cdot}05$

$M = 0{\cdot}05 \qquad \frac{L}{l} = 1 \qquad \gamma_0 = 1{\cdot}29$

Die Gleichungen D, (58), (59), (60) geben:

$T_0 = 1421\,,\ T_1 = 473\,,\ Q = 0{\cdot}419\, q\,,\ B = \frac{q}{52{\cdot}6}\,,\ F_g = 38{\cdot}4\, q$

$$\frac{L_1}{L} = \frac{1{\cdot}5}{5} \quad \ldots\ldots \quad = 0{\cdot}3$$

$$\frac{L_1}{L} + \left(\frac{L_1}{L} + M\right) \text{lognat.} \frac{L + M L}{L_1 + M L} \quad \ldots\ldots \quad = 0{\cdot}6751$$

$$\text{lognat.} \frac{p}{\mathfrak{A}} \quad \ldots\ldots \quad = 1{\cdot}6094$$

$$\left(\frac{L_1}{L} + M\right) \frac{1 + \alpha\, t_0}{1 + \alpha\, t_1} \quad \ldots\ldots \quad = 0{\cdot}1453$$

$$A = \frac{75\, N_n}{51650 \times 1{\cdot}3 \left\{ 0{\cdot}67451 - 0{\cdot}3 - 0{\cdot}1453 \times 1{\cdot}6094 \right\}} \quad \ldots\ldots \quad = \frac{N_n}{126}$$

$$a = \frac{N_n}{126}\, 5\, \frac{0{\cdot}1453}{1 - 0{\cdot}05 \times 4} \quad \ldots\ldots \quad = \frac{N_n}{141{\cdot}5}$$

$$q = \frac{N_n}{126}\, 1{\cdot}3 \times 0{\cdot}35 \times 5 \times \frac{1{\cdot}29}{2{\cdot}5} \quad \ldots\ldots \quad = \frac{N_n}{107{\cdot}7}$$

$$F_g = 38{\cdot}4 \frac{N_n}{107{\cdot}7} \quad \ldots\ldots \quad = \frac{N_n}{2{\cdot}8}$$

$$B = \frac{N_n}{107{\cdot}7} \frac{1}{52{\cdot}6} \quad \ldots\ldots \quad = \frac{N_n}{5665}$$

Brennstoff in einer Stunde für jede Pferdekraft . . . = 0·7 Kilg.

Diese Resultate sind nun in jeder Hinsicht sehr günstig. Der Cylinderquerschnitt A ist nun etwas kleiner, als der einer *Watt'schen* Maschine von gleicher Kraft. Die Heizfläche beträgt beinahe nur den dritten Theil von der eines Dampfkessels, und der Brennstoffverbrauch ist ebenfalls drei Mal kleiner, als bei der besten Dampfmaschine, die mit Condensation und mit Expansion arbeitet.

Wenn also diese Rechnungsresultate wenigstens annähernd richtig sind, und wenn es ferner praktisch möglich ist, die für einen günstigen Effekt aufgefundenen Bedingungen zu realisiren, so unterliegt es keinem Zweifel, dass diese calorischen Maschinen von bedeutendem praktischen Werth werden, dass sie sogar in sehr vielen Fällen die Dampfmaschinen mit Vortheil ersetzen könnten. Diese Resultate sind so viel versprechend, dass es als nothwendig erscheint, die Genauigkeit und Realisirbarkeit derselben auf das sorgfältigste zu prüfen, was in den folgenden Nummern geschehen soll.

Prüfung der entwickelten Theorie.

Die Rechnungsmethode, durch welche wir zu den Resultaten gekommen sind, beruht auf den allgemeinen Prinzipien der Mechanik, die ein für alle Mal feststehen, und durch keine neue Erfindung umgestossen werden. Die Durchführung der Rechnung ist sicherlich fehlerfrei, sie ist mehrmals wiederholt worden. Wenn also die Resultate unrichtig sind, so kann dies herrühren, theils von ungenauen Coeffizienten, theils von nicht ganz naturgemässen Voraussetzungen, theils endlich von verschiedenen in der Rechnung vernachlässigten Einflüssen.

Die Coeffizienten, welche in der Rechnung vorkommen, sind: 1) $s = 0{\cdot}2669$ die spezifische Wärme der Luft; 2) der Ausdehnungscoeffizient für Gase $\alpha = 0{\cdot}00375$; 3) $k = \frac{1}{253}$ der Wärmeleitungscoeffizient; 4) $\lambda = 2$ die Zahl, welche angibt, wie oftmals die in den Feuerungsraum einströmende Luft grösser ist, als die zum vollkommenen Verbrennen nothwendige kleinste Luftmenge; 5) $\mathfrak{H} = 6000$ die Heizkraft der Steinkohlen.

Der obige Werth von s ist derjenige, welchen die Physiker für die spezifische Wärme der Gase bei mässigen Temperaturen gefunden haben. Sollte s mit der Temperatur bedeutend veränderlich und für hohe Temperaturen bedeutend grösser sein, als wir angenommen haben (z. B. noch ein Mal so gross), so würden die aufgefundenen numerischen Resultate viel zu günstig sein.