

Über die Möglichkeit, Luftmaschinen für Heizzwecke zu verwenden.

Von

H. Mache, w. M. d. österr. Akad. d. Wiss.

Aus dem Physikalischen Institut der Technischen Hochschule Wien.

Mit 3 Abbildungen.

(Eingelangt am 8. Mai 1946. Vorgelegt in der Sitzung am 27. Juni 1946.)

Es wird die Frage behandelt, warum die hohen Wirkungsgrade, welche verkehrt durchlaufene Kreisprozesse errechnen lassen, bisher für Gase nicht realisiert werden konnten. Es wird die Meinung begründet, daß auch die Anwendung von Gasen bei Zugrundelegung geeigneter, möglichst Nicht-Carnotscher Kreisprozesse Aussichten bietet, die besonders für Heizzwecke praktisch noch nicht voll ausgeschöpft sein dürften.

Ist l die in einem rechtsläufigen Kreisprozeß gewonnene Arbeit und q' die bei einem Umlauf im Ganzen aufgenommene Wärme (beide je kg gerechnet), so nennt man $\eta = \frac{l}{q'}$ den Wirkungsgrad des Kreisprozesses. Er gibt das Verhältnis zwischen der in Arbeit verwandelten Wärme zur zugeführten. Analog kann man $\varepsilon = \frac{1}{\eta} = \frac{q'}{l}$ als den Wirkungsgrad oder die „Heizwirkung“ desselben, aber linksläufigen Kreisprozesses bezeichnen. Er gibt das Verhältnis zwischen der bei einem Umlauf abgegebenen Wärme und der im Wärmemaß gemessenen Arbeit, die hierbei verbraucht wird.

Was die Wahl des Kreisprozesses anlangt, so sind in thermodynamischer Beziehung an sich alle *reversiblen* Prozesse als vollkommen und als gleichwertig zu betrachten. Werden aber, wie das bei Heizmaschinen die Regel ist, die beiden Grenztemperaturen vorgeschrieben, zwischen denen der Kreisprozeß verlaufen soll — sie seien T' und T —, so hat unter allen rechtsläufigen Kreisprozessen der Carnotsche bekanntlich den höchsten Wirkungsgrad,¹ wie man das besonders im T 's-Diagramm ohne weiteres feststellt.

¹ Vgl. aber A. Loschge, Wärmekraft- und Wärmearbeitsmaschinen, im Handbuch der Experimentalphysik, Bd. IX/2, S. 25.

Je größer nun η ist, desto kleiner ist ε und umgekehrt. Da man aber im rechtsläufigen Kreisprozeß das Schema einer Wärmekraftmaschine und im linksläufigen das einer Heizmaschine zu erblicken hat, d. h. einer Maschine, die unter Arbeitsverbrauch einem kühleren Körper Wärme entzieht und auf höhere Temperatur hebt, so läßt sich auch folgendes sagen: Je mehr ein Kreisprozeß als Schema einer Wärmekraftmaschine geeignet erscheint, desto weniger eignet er sich für die Umkehrung zu einer linkslaufenden Maschine. Oder anders: Da unter allen zwischen zwei bestimmten Temperaturen verlaufenden rechtsläufigen Kreisprozessen der *Carnotsche* den höchsten Wirkungsgrad besitzt, so ist er unter allen möglichen der wenigst geeignete, wenn es sich um das Schema einer Heiz- oder Kältemaschine handelt. Dieser Schluß ist zwingend, aber offenbar so einfach, daß er im einschlägigen Schrifttum meines Wissens nicht zu finden ist.

Aber selbst dieser ungeeignetste unter den linksläufigen Kreisprozessen hat schon die Heizwirkung $\varepsilon = \frac{T'}{T' - T}$, was stets größer ist als der Wirkungsgrad $\eta = \frac{T' - T}{T'}$ des rechtsläufigen *Carnot*-Prozesses, der zwischen denselben Temperaturen T' und T beschrieben wird; und hierbei überwiegt die Wirkung des linksläufigen Prozesses die des rechtsläufigen um so mehr, je kleiner die Temperaturdifferenz ist, zwischen der die Prozesse sich abspielen. Es ist z. B. für $T = 290$ (17°C) und $T' = 300$ (27°C) die Heizwirkung $\varepsilon = 30$, d. h. es wird im linksläufigen Prozeß theoretisch 30mal so viel Wärme von 17 auf 27°C gehoben, als das Äquivalent der in diesem Prozeß verbrauchten Arbeit beträgt.

Wie *Lord Kelvin* schon 1852 bemerkt hat,² läßt sich das auch folgendermaßen auffassen: Eine Arbeit l erzeugt, irgendwie vollständig in Wärme verwandelt, einen vorher nicht vorhandenen äquivalenten Wärmebetrag von allerdings unbestimmter Temperatur. Es hängt vom Wasserwert des diese Wärmemenge aufnehmenden Systems ab, auf welche Temperatur die Wärme hierbei gelangt, und es ist wieder diese Temperatur, welche die Rückverwendbarkeit der erzeugten Wärme in Arbeit bestimmt. Handelt es sich aber nicht um die Erzeugung, sondern nur um die Hebung schon vorhandener Wärme von niedriger auf höhere Temperatur, so ist diese Art von Heizung, zu der natürlich auch die Wärmeezeugung durch den elektrischen Strom gehört, offenbar höchst unökonomisch. Wir können theoretisch 30mal mehr Wärme erhalten, wenn wir die zur Verfügung stehende Arbeitsmenge, statt sie durch Reibung oder den elektrischen Strom in Wärme zu verwandeln, etwa zur Durchführung eines linksläufigen *Carnot*-Prozesses verwenden; und dabei ist der *Carnot*-Prozeß der ungünstigste, denn er hat von allen zwischen den vorgegebenen

² Proc. Roy. Soc. of Glasgow, 1852.

Temperaturen verlaufenden die kleinste Wirkung. Jeder andere zwischen den gleichen Extremtemperaturen sich abspielende linksläufige Kreisprozeß vermag bei gleichem Arbeitsverbrauch eine noch größere Wärmemenge — wenn zum Teil auch nur auf niedrigere Temperatur — zu heben.

Betrachten wir z. B. mit *Lord Kelvin* (l. c.) eine Luftmaschine, deren Kreisprozeß aus Isotherme, Adiabate und Isobare besteht. Die Luft wird bei der Ausgangstemperatur T isotherm ausgedehnt (wobei sie die Wärmemenge q aufnimmt), dann adiabatisch zusammengedrückt (wobei sie sich

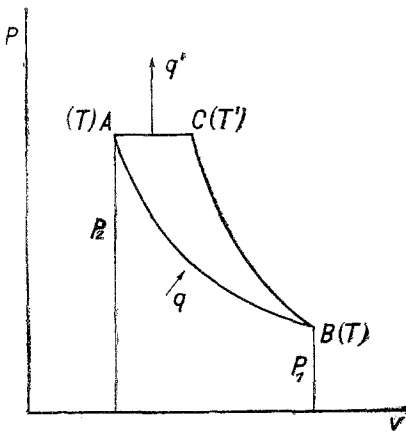


Abb. 1.

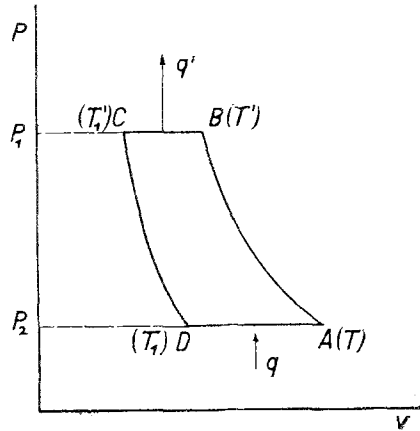


Abb. 2.

auf die Temperatur T' erwärmt) und schließlich bei konstantem Druck wieder auf T abgekühlt (wobei sie die Wärmemenge q' abgibt). Es sei P_2 der Druck auf der Isobare und P_1 der Druck, der am Ende der Isotherme und am Beginn der Adiabate erreicht wird. Man erhält:

$$\varepsilon = \frac{q'}{l} = \frac{q'}{q' - q} = \frac{1}{1 - \frac{q}{q'}} = \frac{1}{1 - \frac{R T \ln P_1/P_2}{c_P (T' - T)}}$$

oder wegen

$$\frac{R}{c_P} = \frac{\kappa - 1}{\kappa} \quad \text{und} \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{T'}{T} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}$$

auch

$$\varepsilon = \frac{1}{1 - \frac{T \ln T'/T}{T' - T}},$$

also wie im *Carnot*-Prozeß einen nur von den beiden Temperaturen, aber nicht von der Gasart abhängigen Ausdruck. Hierbei ist die Luft als ein vollkommenes Gas vorausgesetzt, das obendrein konstante spezifische Wärme besitzt. Mit den Werten $T' = 300$ und $T = 290$ ergibt

sich $\varepsilon = 58$. Es wird also hier zwischen den gleichen Temperaturen doppelt soviel Wärme bewegt als im linksläufigen *Carnot*-Prozeß.

Als zweites Beispiel wählen wir die Kaltluftmaschine, deren theoretischer Kreisprozeß aus zwei Adiabaten (zwischen den Temperaturen T' und T bzw. T_1' und T_1) und zwei Isobaren (P_1 bzw. $P_2 = \text{const.}$) besteht. Im linksläufigen Prozeß wird die Wärmemenge $q = c_P (T' - T_1)$ aufgenommen und die Wärmemenge $q' = c_P (T' - T_1')$ abgegeben. Man findet dann wegen $T/T_1 = T'/T_1'$ die Heizwirkung

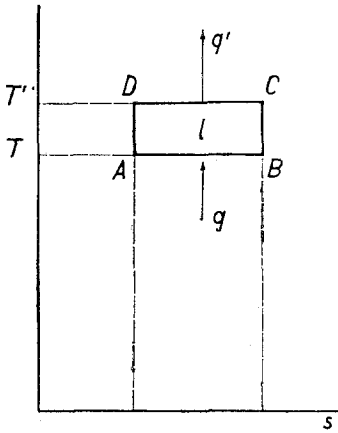


Abb. 3.

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{q'}{q' - q} = \frac{T' - T_1'}{T' - T_1' - (T' - T_1)} = \\ &= \frac{1}{1 - \frac{T - T_1}{T' - T_1'}} = \frac{1}{1 - \frac{T}{T'}} = \\ &= \frac{T'}{T' - T} = \frac{1}{1 - \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^\kappa} \end{aligned}$$

Hier ist also ε durch das Druckverhältnis P_1/P_2 und die Gasart bestimmt, und zwar ist ε um so größer, je kleiner das Druckverhältnis ist und je näher der Quotient κ der Eins liegt. Für die in diesem Kreisprozeß vorhandenen Extremtemperaturen T' und T_1 würde der *Carnot*-Prozeß $\varepsilon = \frac{T'}{T' - T_1}$

ergeben, also eine wegen $T > T_1$ unter allen Umständen *kleinere* Wirkung. Mit $P_1/P_2 = 1,2$ wird für Luft $\varepsilon = 20$ und für ein Gas, dessen Quotient κ den Wert 1,10 besitzt, $\varepsilon = 61$.

Die Mannigfaltigkeit der Kreisprozesse, die sich mit Gasen ausführen lassen, bietet also theoretisch sehr verschiedene Möglichkeiten zur Hebung großer Wärmemengen mittels verhältnismäßig kleiner Arbeitsbeträge. So hat man denn schon öfters die Frage gestellt, warum man diese Möglichkeiten praktisch noch nicht benützt, aber, wie es scheint, noch keine allgemein einleuchtende Antwort gefunden. Es gibt aber tatsächlich keine Luftmaschine, welche diese bei kleiner Temperaturdifferenz so großen Wirkungsgrade zur Erwärmung der Luft geschlossener Räume verwenden würde, wie naheliegend das auch scheint. Desgleichen hatte die Kaltluftmaschine einen nur beschränkten Erfolg und wird kaum mehr gebaut.

Das wird aber verständlich, wenn man bedenkt, daß ε durch Verkleinern des Temperaturintervalls, innerhalb welchem der Kreisprozeß verläuft, sich wohl ohneweiters groß machen läßt, daß dann aber (bei Beibehaltung der Druck- und Volumenbereiche, innerhalb deren der Kreisprozeß verläuft) die bei einem Umlauf beschriebene Fläche, d. h. die

bei einem Umlauf verbrauchte Arbeit zugleich entsprechend kleiner wird. Das ist im Wärmediagramm und für den *Carnot*-Prozeß besonders einfach ersichtlich zu machen (Abb. 3). Vermindert man nämlich die Temperaturdifferenz zwischen den Isothermen *AB* und *DC* des *Carnot*-Prozesses etwa durch Erhöhung der unteren Temperatur *T*, so nimmt $l = \frac{q'}{T'}(T' - T)$ mit $T' - T$ ab, während gleichzeitig $\varepsilon = \frac{q'}{l} = \frac{T'}{T' - T}$ im gleichen Maße zunimmt, so daß das Produkt εl , also die auf höhere Temperatur gehobene Wärmemenge tatsächlich konstant bleibt. Ähnlich liegen die Verhältnisse bei Nicht-*Carnotschen* Kreisprozessen. Immer wird ε mit abnehmender Temperaturdifferenz größer, zugleich aber die bei einem Umlauf verbrauchte Arbeit kleiner, so daß $q' = \varepsilon l$ ungefähr ebenso groß ist wie bei höherer Temperaturdifferenz. So bedeutet die Erhöhung des Wirkungsgrades nur einen beschränkten Vorteil. Es wird wohl Arbeit erspart, aber die gehobene Wärmemenge kaum gesteigert. Will man die je Zeiteinheit gehobene Wärmemenge, also die *Leistung* der Heizmaschine vergrößern, so bleiben hierfür nur zwei Möglichkeiten: Entweder man erhöht die Zahl der Umläufe, oder man vergrößert die bei einem Umlauf aufgewendete Arbeit durch Steigerung der Expansions- und Druckverhältnisse. Beides hat seine Schwierigkeiten! Gerade bei kleiner Temperaturdifferenz läßt sich nämlich die Zahl der Umläufe wegen des langsamen Wärmeüberganges nur schwer erhöhen. Freilich hat man in neuerer Zeit in der Konstruktion von Wärmeaustauschern Fortschritte gemacht. Ist es doch bei Regeneratoren gelungen, in einem Raum von 1 m³ Inhalt bis zu 2000 m² Regeneratoroberfläche unterzubringen,³ was auch auf dem hier behandelten Gebiete zu neuen Versuchen ermutigen könnte. Andererseits bedeutet großes Expansionsverhältnis die Ausdehnung auf großes Volumen bzw. die Kompression auf hohen Druck. Man müßte den Rauminhalt des Arbeitszylinders so groß machen, daß die Erhöhung der Leistung durch die gesteigerten Reibungsverluste in Frage gestellt würde. Die Verhältnisse liegen hier ähnlich wie bei dem Versuch, den rechtsläufigen *Carnot*-Prozeß für Gase zu verwirklichen.

So wie dort und aus gleichen Gründen führte auch hier die Anwendung gesättigter Dämpfe zu praktischen Erfolgen. Kaltdampfmaschinen sind als Kältemaschinen überall im Gebrauch. Man hat sie aber auch bereits als „Wärmepumpen“ zum Eindampfen von Lösungen und in besonderen Fällen auch zur Heizung von Gebäuden verwendet.⁴

Es sollte aber im vorhergehenden darauf hingewiesen werden, daß bei Erhöhung der Umlaufzahl und bei Zugrundelegung Nicht-*Carnotscher* Kreisprozesse auch die Anwendung von Luft in Heizmaschinen Möglichkeiten bietet, die praktisch vielleicht noch nicht völlig ausgenützt sind.

³ *W. Meissner*, Die Physik in regelmäßigen Berichten 4, 3 (1936).

⁴ Vgl. z. B. *W. Krüger*, Z. Ver.dtsch. Ing. 83, 654 (1939).