

Altlasten der Physik (141): Der Carnot'sche Kreisprozess

F. Herrmann

Gegenstand

In der Experimentalphysikvorlesung lernen die Studentinnen und Studenten den Carnot'schen Kreisprozess kennen. Ein ideales Gas durchläuft eine Folge von vier Teilprozessen – zwei isothermen und zwei isentropen – und gelangt am Ende in seinen Ausgangszustand zurück. Es wird gezeigt, dass sich bei einem solchen Prozess nur ein bestimmter Anteil der Wärme in Arbeit verwandeln lässt. Oft wird die Rechnung noch auf einen beliebigen Kreisprozess (mit einem idealen Gas) verallgemeinert, indem man den Prozess in infinitesimale isotherme und isentrope Teilstücke zerlegt. Dargestellt wird der Prozess gewöhnlich im p - V -Diagramm.

Mängel

1. Carnots Werk besteht in der Darstellung und Begründung einer einzigen großartigen Idee: Das „Caloricum“ (im Original „Calorique“) gelangt in einer ideal arbeitenden Wärme-kraftmaschine von einer höheren zu einer niedrigeren Temperatur und verrichtet dabei Arbeit (bei Carnot *puissance motrice*, also etwa Antriebskraft). Die Arbeit ist proportional zur Temperaturdifferenz und zur Menge des umgesetzten Caloricums („Quantité de calorique“). Die Wärmekraftmaschine funktioniert nach Carnot ähnlich wie ein Wasserrad, bei dem das Wasser von einer größeren zu einer geringeren Höhe gelangt und dabei Arbeit verrichtet. Er stellt diese Idee am Anfang seines Werkes vor. Erst danach führt er aus, wie man sich den Aufbau einer thermischen Maschine im Einzelnen vorstellen kann. Heute sind die Rechnungen das einzige, was die Studierenden davon noch lernen. Von der Idee, die dahinter steckt, erfahren sie nichts.

2. Am Carnot'schen Kreisprozess sind zwei Energieformen beteiligt: $p dV$ und $T dS$. Wenn man den Kreisprozess unbedingt behandeln will, so stellt man ihn am besten sowohl in den Koordinaten der einen Energieform, als auch in denen der anderen graphisch dar, also im T - S -Diagramm und im p - V -Diagramm, Abb. 1. Das T - S -Diagramm zeigt, wie einfach der Prozess ist. Hier kommt die Carnot'sche Idee deutlich zum Ausdruck: Das Caloricum (heute nennen

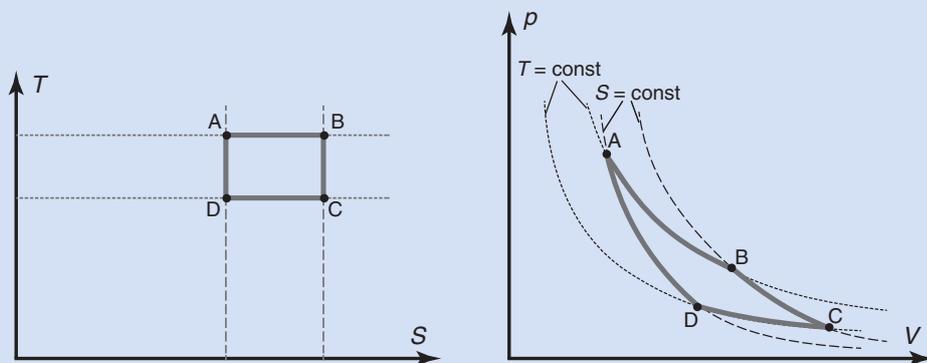


Abb. 1: T - S - und p - V -Diagramm des Carnot'schen Kreisprozesses. In einem Zyklus nimmt die Maschine Entropie auf hoher Temperatur auf und gibt sie auf niedriger Temperatur wieder ab.

wir es Entropie) wird bei konstanter hoher Temperatur von der Maschine aufgenommen (Prozessschritt A-B) und bei konstanter niedriger Temperatur wieder abgegeben (Prozessschritt C-D). Das T - S -Diagramm ist unabhängig davon, was für eine Arbeitssubstanz verwendet wird, das p - V -Diagramm nicht. Das ist eine wichtige Tatsache, die Carnot hervorhebt, noch bevor er das Beispiel „ideales Gas“ diskutiert.

Man kann aber auch, so wie Carnot selbst, auf beide Diagramme verzichten, denn das T - S -Diagramm ist trivial, das p - V -Diagramm uninteressant.

3. Ein Verständnis der Wärmekraftmaschinen erlangt man leichter, wenn man nicht eine zyklisch (also in einem Kreisprozess) arbeitende Maschine betrachtet, sondern eine kontinuierlich arbeitende (eine Strömungsmaschine), ähnlich wie man es bei anderen Energiewandlern auch tut.

Herkunft

1. Da man das Carnot'sche Caloricum in den fünfziger Jahren des 19. Jahrhunderts in der allgemeinen Euphorie, die die Entdeckung der Energie begleitete, als Energieform interpretierte, erschienen Carnots Überlegungen teilweise falsch. Sein Caloricum läuft durch die thermische Maschine hindurch. Auf dem Weg vom Wärmereservoir der hohen zu dem der niedrigen Temperatur ändert sich seine Menge nicht. Dieses Verhalten entspricht aus modernerer Sicht dem der Entropie. Man kann also Carnots Caloricum-Menge mit der später wiederentdeckten Entropie identifizieren. Wenn man es aber als Energie interpretiert, so entsteht eine falsche Aussage, denn im Reservoir mit der niedrigen Temperatur

kommt weniger Energie an als das Reservoir der hohen Temperatur abgegeben hat. (Die Differenz entspricht der von der Maschine geleisteten Arbeit.)

Die Verkennung oder misslungene Interpretation der Carnot'schen Idee, hat sich bis heute erhalten, obwohl im Laufe der weiteren Entwicklung mehrfach auf den Fehler hingewiesen worden war.

2. Damit hängt zusammen, dass die Entropie in der Physik als eine unanschauliche Größe überlebt. Man versucht, ihr wo es nur geht aus dem Weg zu gehen. Dabei bleibt gewöhnlich auch das einfachere T - S -Diagramm auf der Strecke.

3. Kreisprozesse erschienen zu Carnots Zeit im Zusammenhang mit thermischen Maschinen als die normalen Prozesse, denn die einzigen thermischen Maschinen, die man kannte, d.h. die Dampfmaschinen, arbeiteten zyklisch. Dampfturbinen gab es noch nicht. Das Wasserrad, das Carnot als Analogon anführt, ist auch eine kontinuierlich arbeitende Maschine.

Entsorgung

Was hat das das Thema in einer Schulzeitschrift zu suchen? Ist es nicht eindeutig ein Thema für die Universität? In der Tat: Wenn man es so kompliziert darstellt, wie es üblich ist, so ist es der Schule nicht zuzumuten, und es würde auch kaum eine Einsicht bringen. Wenn man es aber so klar darstellt, wie es Carnot getan hat, dann passt und gehört es in die Schule. ■

Anschrift des Verfassers

Prof. Dr. Friedrich Herrmann, Institut für Theoretische Festkörperphysik, KIT, 76128 Karlsruhe, E-Mail: f.herrmann@kit.edu