

21. Umkehrbare Maschine. Eine Maschine, in welcher die Umkehrung der Arbeit von einer vollständigen Umkehrung jeder einzelnen Wärmeübertragung begleitet ist, nennt man vom Standpunkte der Thermodynamik eine umkehrbare Maschine. Eine umkehrbare Maschine ist daher, um andere Worte zu gebrauchen, jene Maschine, welche, wenn gezwungen, ihr Indikatordiagramm in entgegengesetztem Sinne zu durchlaufen, dieselbe Arbeit, welche sie bei direkter Bewegung nach außen abgegeben hätte, nun von außen empfangen muß; diejenige Wärmemenge, welche sie direkt arbeitend von der Wärmequelle aufgenommen hätte, giebt sie bei der Umkehr ihrer Wirkungsweise an diese ab und nimmt andererseits von dem Receiver dieselbe Wärmemenge auf, welche sie bei direkter Bewegung an denselben abgeführt hätte. Jede Maschine, welche den Carnotschen Kreisprozeß genau verfolgt, ist somit eine umkehrbare Maschine im Sinne dieser Erörterung. Die thermodynamische Umkehrbarkeit ist deshalb von größtem Interesse, weil keine Maschine einen höheren Wirkungsgrad ergeben kann als die reversible Maschine, sobald beide Maschinen zwischen denselben Temperaturgrenzen arbeiten, d. h. Wärme bei derselben Temperatur aufnehmen und Wärme unter gleicher Temperatur abgeben. Dieses Theorem, welches wir Carnot verdanken, ist von grundlegender Bedeutung für die Theorie der Wärmemaschinen.

22. Das Carnotsche Prinzip. Um nachzuweisen, daß keine andere Wärmemaschine wirksamer sein kann als die umkehrbare Maschine, sobald beide innerhalb derselben Grenztemperaturen arbeiten, denke man sich zwei Maschinen R und S , von welchen R reversibel sei und lasse dieselben arbeitend Wärme von demselben heißen Körper A aufnehmen und an denselben kalten Körper C abgeben. Ferner sei Q_A die Wärmemenge, welche die Maschine R für jede geleistete Arbeitseinheit von A aufnimmt und Q_C die Wärmemenge, welche sie an C abgibt.

Untersucht man nun die Folgen, die sich ergeben würden, wenn Maschine S wirksamer wäre als R , so ergibt sich zunächst, daß S für jede Arbeitseinheit weniger Wärme von A aufnehmen und daher auch weniger Wärme an C abgeben würde; bezeichne q diesen Minderbetrag, dann ist die von A aufgenommene Wärme $Q_A - q$, und die an C abgegebene Wärme $Q_C - q$.

Man denke sich nun die Maschine S arbeitend, d. h.: Wärme in Arbeit umsetzend; R hingegen Arbeit in Wärme umsetzend und von S angetrieben, so daß S gleichsam den Motor und R die Arbeitsmaschine (Wärmepumpe) darstellen würde. Für jede von der Maschine S auf R übertragene Arbeitseinheit würde durch die Maschine S die Wärmemenge $Q_A - q$ von A entnommen, hingegen die Wärmemenge Q_A durch

die Maschine R auf A übertragen werden, weil R , ob als Motor oder Pumpe funktionierend, in beiden Fällen dieselbe Wärmemenge von der Wärmequelle A entnehmen resp. an dieselbe zurückleiten würde. Der heiße Körper A würde daher für jede von der einen auf die andere Maschine übertragene Arbeitseinheit die Wärmemenge q gewinnen. Im Gegensatz zu A würde der kalte Boden C für jede übertragene Arbeitseinheit die Wärmemenge q verlieren, da die Maschine S an C die Wärmemenge $Q_c - q$ abgibt, während R von C die Wärmemenge Q_c entnimmt.

Die Kombination solcher Maschinen, deren eine als eigentliche Wärmemaschine direkt arbeitet, während die andere als Umkehrung derselben (Wärmepumpe) Arbeit in Wärme umsetzt, ergäbe das Resultat, daß Wärme von dem kälteren Körper C auf den heißen Körper A in unbeschränktem Maße übertragen werden könnte. Die beiden Maschinen bilden außerdem in ihrer Vereinigung ein vollkommen selbsttätiges System, denn die in der einen Maschine produzierte Kraft geht auf die andere Maschine über und genügt, dieselbe zu treiben; wenn man ferner von der Voraussetzung ausgeht, daß die Maschine reibungslos arbeitet, dann bedarf die Doppelmaschine keiner Kraft von außen.

Man ersieht daraus, daß die Annahme, die nicht umkehrbare Maschine S könnte wärmeökonomischer arbeiten als die umkehrbare Maschine R , zu einem Resultate führt, welches im direkten Gegensatze steht zu dem zweiten Gesetze der Thermodynamik, denn diese Annahme hat zur Konstruktion einer ideellen selbsttätigen Maschine geführt, durch welche Wärme in beliebiger, somit auch unbegrenzter Menge von einem kälteren nach einem wärmeren Körper übertragen werden könnte. Das zweite Gesetz besagt, daß dies im direkten Widerspruche steht zu allen diesfälligen Erfahrungen. Wir müssen daher aus obiger Darlegung den Schluß ziehen, daß keine Maschine wirtschaftlicher arbeiten kann als die umkehrbare (reversible) Maschine, sobald beide innerhalb derselben Temperaturgrenzen arbeiten, oder mit anderen Worten, wenn Wärmequelle und Wärmereceiver gegeben sind, arbeitet die umkehrbare Maschine so wärmeökonomisch, als eine Maschine innerhalb dieser gegebenen Temperaturgrenzen überhaupt arbeiten kann.

Nachdem endlich, wenn zwei reversible Maschinen zusammen arbeiten würden, aus denselben Gründen die eine nicht wirtschaftlicher sein könnte als die andere, so folgt, daß alle umkehrbaren Maschinen, welche Wärme innerhalb derselben Temperaturgrenzen aufnehmen beziehungsweise abgeben, gleich wirtschaftlich sind.

Dieses Resultat besagt, daß Umkehrbarkeit im Sinne der Thermodynamik das Kriterium einer vollkommenen Wärmemaschine ist; vollkommen insofern, als dieselbe hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit nicht

übertroffen werden kann; keine andere Maschine wäre imstande, bei denselben Temperaturverhältnissen einen größeren Teil der aufgenommenen Wärme in Arbeit zu verwandeln. Sobald die Bedingung der Umkehrbarkeit erfüllt ist, ist hinsichtlich des Wirkungsgrades die Natur der Arbeitsflüssigkeit sowie die Arbeitsmethode der Maschine selbst vollkommen belanglos.

23. Wirkungsgrad einer vollkommenen Wärmemaschine.

Nachdem, wie wir gesehen, alle reversiblen Maschinen gleich wirtschaftlich sind, sobald sie innerhalb derselben Temperaturgrenzen arbeiten, so wird auch ein Ausdruck für den Wirkungsgrad einer Maschine auf alle übrigen volle Anwendung finden. In § 19 wurde der Wirkungsgrad für eine den Carnotschen Kreisprozeß genau befolgende Maschine bestimmt; diese mit Gas als Arbeitsflüssigkeit arbeitende Maschine ist ein Beispiel einer reversiblen Maschine; es ist daher der in § 19 gefundene Ausdruck für den Wirkungsgrad dieser Maschine

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

zugleich der Wirkungsgrad aller reversiblen Wärmemaschinen, welche Wärme bei der Temperatur T_1 aufnehmen und bei der niedrigeren Temperatur T_2 abgeben. Nachdem ferner, wie früher nachgewiesen, keine Maschine wirtschaftlicher arbeiten kann als eine reversible Maschine, so ist obiger Ausdruck zugleich der höchste Wirkungsgrad, welcher von einer Wärmekraftmaschine erwartet werden kann. Aus dem Gesagten resultiert somit die hochwichtige Tatsache, daß keine Wärmemaschine von der ihr zugeführten Wärme einen größeren Teil in Arbeit umsetzen kann, als durch das Verhältnis des Temperaturüberschusses der zugeführten und abgeführten Wärme zur Temperatur der zugeführten Wärme ausgedrückt ist.

24. Kurze Zusammenfassung der Argumente. Die Beweismittel, welche zu diesem eminent wichtigen Resultate führten, sind in gedrängter Kürze wiederholt die folgenden. Nach Feststellung der experimentellen Gesetze, welchen sich alle Gase anpassen und Bestimmung der absoluten Temperatur, wurde die Wirkungsweise einer Wärmemaschine untersucht, deren Arbeitssubstanz Wärme aufnahm, sobald deren Temperatur jene der Wärmequelle erreicht hatte und umgekehrt Wärme bei der Temperatur des Receivers abgab; der Übergang von der oberen zur unteren Temperatur und umgekehrt wurde durch adiabatische Expansion und Kompression vermittelt. Für den speziellen Fall eines permanenten Gases als Arbeitsflüssigkeit wurde hierauf der Wirkungsgrad nach Gleichung (15) mit $1 - \frac{T_2}{T_1}$ bestimmt und konstatiert, daß diese Maschine