

Für die Theorie einer Wärmemaschine ist es von der größten Wichtigkeit, den Kreisprozeß, welchen die Arbeitsflüssigkeit vollführt, als einen in sich geschlossenen zu betrachten; eine Bedingung, welche zuerst von Carnot 1824 aufgestellt wurde. Bei einem nicht geschlossenen, also unvollständigen Kreisprozesse sind die Verhältnisse komplizierter, weil sich die Arbeitsflüssigkeit mit Ende des Prozesses in einem andern Zustande befindet als zu Beginn desselben; somit die innere Energie derselben eine Veränderung während des Prozesses erfahren hat. Schließt der Kreisprozeß vollständig, dann muß mit Schluß desselben die innere Energie die gleiche sein wie zu Beginn desselben, nachdem die Beschaffenheit der Arbeitsflüssigkeit unverändert geblieben ist. Für einen vollständigen Kreisprozeß besteht demnach die Gleichung

$$\text{Zugeführte Wärme} = \text{Geleistete Arbeit} + \text{Abgeführte Wärme.}$$

**6. Vollkommene Gase als Arbeitsflüssigkeit.** Die Aufstellung einer Theorie der Wärmemaschine wird wesentlich erleichtert, wenn man von der Untersuchung einer Maschine ausgeht, deren Arbeitsflüssigkeit eines der sogenannten permanenten Gase oder eine Mischung derselben ist. Mit dem Ausdrucke „permanent“ bezeichnet man jene Gase, welche sehr schwer, d. h. nur unter Anwendung außerordentlich niedriger Temperaturen, zumeist in Verbindung mit hohen Pressungen, flüssig gemacht werden können. Auf solche Gase, welche somit von ihrem Kondensationspunkte so weit entfernt sind, daß sie sich in ihrem Verhalten unter Pressungs- und Temperaturänderungen von kondensierbaren Gasen wesentlich unterscheiden, können gewisse einfache Gesetze mit großer Wahrscheinlichkeit angewendet werden, welche streng genommen nur auf ideale Substanzen, sogenannte „vollkommene“ Gase Anwendung finden. — Nach Aufstellung dieser Gesetze soll der Wirkungsgrad einer Wärmemaschine, unter Voraussetzung irgend eines Gases als Arbeitssubstanz, untersucht und an der Hand der so gewonnenen Resultate gezeigt werden, daß dieselben auf alle Wärmekraftmaschinen allgemeine Anwendung finden. Die Gesetze, welche im folgenden entwickelt werden sollen, sind sehr nahe, wenn auch nicht absolut richtig für Luft, Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff und Kohlenoxyd, ausgenommen die Fälle ihrer Verwendung unter außergewöhnlich hohen Pressungen oder außerordentlich niedrigen Temperaturen. Wasserstoff kommt dem Ideal eines vollkommenen Gases, soweit die Erfahrungen reichen, noch am nächsten; vollkommen im Sinne dieser Bedeutung ist jedoch keines der bekannten Gase.

**7. Gesetze der vollkommenen Gase.** Die Gesetze, welche in ihrer Anwendung auf das ideale oder vollkommene Gas absolut richtig,

in ihrer Anwendung auf ein permanentes Gas jedoch nur sehr angenähert richtig sind, werden in der Physik das Boyle-Mariottésche und das Gay-Lussacsche Gesetz genannt.

1. Gesetz (Boyle-Mariotte). Das Volumen einer gegebenen Gasmenge ist bei konstanter Temperatur dem Drucke umgekehrt proportional.

Bezeichnet  $v$  das Volumen einer gegebenen Menge irgend eines Gases,  $p$  den Druck, dann besteht, so lange die Temperatur ungeändert bleibt, die Beziehung

$$pv = \text{constant},$$

oder wenn der Anfangszustand durch  $p_1$  und  $v_1$  gegeben ist,

$$pv = p_1 v_1.$$

Diese Beziehung stellt die Gleichung einer gleichseitigen Hyperbel dar, wenn  $v$  als Abscisse und  $p$  als Ordinate aufgetragen wird; da hierbei die Temperatur als konstant vorausgesetzt wurde, so ist in dem vorstehenden Ausdruck auch zugleich die Gleichung der durch den Anfangspunkt  $p_1 v_1$  gehenden „isothermischen“ Kurve speziell für Gase gegeben.

2. Gesetz (Gay-Lussac). Wird ein Gas unter konstantem Drucke erwärmt, dann ist die Volumzunahme der Temperaturzunahme proportional.

Nimmt man als Beispiel ein Gefäß, welches eine bestimmte Menge Luft enthält und erhitzt dieselbe, indem man im Wege des Experimentes Sorge trägt, daß sich die Luft ohne Änderung des Druckes ausdehnen kann, dann findet man, daß eine bestimmte Änderung des Volumens stattgefunden hat. Ersetzt man nun die Luft durch ein anderes permanentes Gas und wiederholt man den Versuch bei dem gleichen konstanten Druck, indem man dieses Gas von derselben Anfangs- auf dieselbe Endtemperatur wie vorher die Luft erhitzt, dann wird das Volumen dieselbe Änderung erfahren haben, welche bei dem Experimente mit Luft beobachtet wurde. Führt man ferner dasselbe Experiment unter Benützung größerer oder kleinerer Temperaturunterschiede durch, dann findet man auch in diesem Falle, daß die Änderung des Volumens der Luft oder irgend eines anderen anstelle derselben gesetzten Gases sehr nahe proportional ist der Größe des von der Skala eines gewöhnlichen Quecksilberthermometers abgelesenen Temperaturintervalles; oder in anderer Weise erklärt: Benützt man ein Luftthermometer (in welchem die Luft ohne Änderung des Druckes expandieren kann), welches somit jene Temperaturunterschiede als gleiche bezeichnet, welche gleicher Ausdehnung der Luft entsprechen, so erhält man eine Thermometerskala, welche wohl in wesentlicher aber nicht voll-



kommener Übereinstimmung mit der gewöhnlichen Quecksilberskala steht, welche jene Temperaturintervalle als gleiche bezeichnet, welche gleicher Ausdehnung des Quecksilbers im Glase entsprechen.

Durch Versuche ist erwiesen, daß sich die permanenten Gase bei einer Temperaturänderung um  $1^{\circ}\text{C}$  unter konstantem Druck um  $\frac{1}{273}$  ihres Volumens bei  $0^{\circ}\text{C}$  ausdehnen. — 273 Volumseinheiten Luft oder eines anderen permanenten Gases werden sich daher bei der Erwärmung von  $0^{\circ}\text{C}$  auf  $1^{\circ}\text{C}$  auf 274, bei der Erwärmung auf  $2^{\circ}\text{C}$  auf 275 Volumseinheiten u. s. f. ausdehnen. Kühlt man umgekehrt das Gas von  $0^{\circ}$  auf  $-1^{\circ}\text{C}$  ab, dann findet eine Volumsabnahme auf 272 Einheiten statt u. s. f. Unter der Annahme, daß diese Beziehung uneingeschränkt gelte, ergibt sich aus ihr bei allmählicher Volumsabnahme schließlich für das Volumen  $= 0$  eine Temperatur von  $-273^{\circ}\text{C}$ . Ein wirkliches (nicht ideales) Gas würde seine physikalischen Eigenschaften ändern, bevor es eine so tiefe Temperatur erreichen könnte.

**8. Absolute Temperatur.** Rechnet man somit die Temperatur nicht von dem gewöhnlichen Nullpunkte, sondern von einem um  $273^{\circ}$  unter dem Nullpunkte der Celsiusskala gelegenen Punkte, dann ist das Volumen einer gegebenen Gasmenge bei konstantem Drucke der von diesem Nullpunkte gerechneten Temperatur proportional. Die auf diese Weise gezählten Temperaturen nennt man absolute Temperaturen und den Punkt  $-273^{\circ}\text{C}$  den absoluten Nullpunkt der Temperatur. Bezeichnet  $t$  Grade die Temperatur der Celsiusskala,  $T$  die korrespondierende absolute Temperatur, dann ist

$$T = t + 273.$$

Rankine bestimmte den absoluten Nullpunkt mit  $-461^{\circ}\text{F}$  ( $-274^{\circ}\text{C}$ ), was einzelne Schriftsteller veranlaßte, diesen Wert als Grenzwert anzunehmen; diese Zahl ist begründet in dem Versuchsergebnisse, daß die Ausdehnung eines Gases von  $32^{\circ}\text{F}$  auf  $212^{\circ}\text{F}$  ( $0^{\circ}$  auf  $100^{\circ}\text{C}$ )  $0,365$  des ursprünglichen Volumens bei  $32^{\circ}\text{F}$  beträgt. Diese Zahl bezieht sich auf die Expansion verdünnter Luft unter einer Pressung von ca.  $\frac{1}{5}$  jener der Atmosphäre. Mit Luft von atmosphärischer Pressung ergaben die Versuchsergebnisse Regnaults eine Ausdehnung von  $0,3665$ . Dieser Wert ergibt pro  $1^{\circ}\text{F}$   $\frac{1}{491}$  des Volumens bei  $32^{\circ}\text{F}$ , oder  $\frac{1}{273}$  von dem Volumen bei  $0^{\circ}\text{C}$  pro  $1^{\circ}\text{C}$ . Daher wird der absolute Nullpunkt fast allgemein mit  $-459^{\circ}\text{F}$  oder  $-273^{\circ}\text{C}$  angenommen. Der Umstand, daß dieser Grenzwert allgemeinere Anwendung gefunden hat, ferner, daß die Annahme des einen oder anderen Grenzwertes nur sehr geringfügige Abweichungen in den Rechnungsresultaten zeigt, die bei technischen Untersuchungen