$$\frac{-Q_0}{T_0} = \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_3}{T_3} + \cdots,$$

und daraus folgt

$$\sum \frac{Q}{T} = 0, \tag{5}$$

wenn sich die Summation auf den ganzen umkehrbaren Kreisprozeß erstreckt. Es ist klar, daß dieses Resultat sofort auf alle Fälle ausgedehnt werden kann, wo Wärme bei verschiedenen Temperaturen abgeführt oder aufgenommen wird; Q wird positiv oder negativ, je nachdem Wärme aufgenommen oder abgegeben wurde.

In jenen Fällen, wo sich die Temperatur fortwährend ändert, während Wärme aufgenommen oder abgegeben wird, kann die Wärmeaufnahme oder -abgabe nicht wie oben in eine begrenzte Anzahl von Stufen geteilt werden. Die Gleichung (5) kann jedoch auch für diesen ganz allgemeinen Fall angewendet werden und zwar in der Form

$$\int \frac{dQ}{T} = 0, \tag{6}$$

wenn die Integration sich auf den ganzen Prozeß erstreckt.

54. Anwendung des Vorhergehenden auf den Fall, daß eine Dampfmaschine ohne Kompression, jedoch mit vollständig adiabatischer Expansion arbeitet. In § 46 betrachteten wir die Wirkungsweise einer idealen Dampfmaschine, in welcher der Dampf, gebildet bei der Temperatur T_1, adiabatisch bis zur Kondensatorspannung, entsprechend der Temperatur T_2 des Kondensators, expandierte und nach erfolgter Kondensation durch eine Speisepumpe nach dem Kessel zurückgeleitet und hier wieder zur Schließung des Kreisprozesses auf die Anfangstemperatur T_1 erhitzt wurde. Dieser Kreisprozeß ist von besonderer Bedeutung für die Untersuchung von Dampfmaschinen, denn er stellt die ideale, beste Leistung einer Maschine dar, welche mittelst Speisepumpe das Kondensat vom Kondensator direkt nach dem Kessel zurückbefördert, eine Leistung, welche von einer derartigen Maschine zustande gebracht werden könnte, vorausgesetzt, daß einerseits die Expansion so vollständig erfolgt, daß der Dampfaustritt ohne plötzlichen Spannungsausfall stattfindet und andererseits Cylinder und Kolben vollkommen wärmedicht hergestellt werden können.

Der Wirkungsgrad dieses Prozesses liegt sehr nahe an dem Grenzwert

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

ohne denselben jedoch zu erreichen, da während der vierten Periode die Erhöhung der Temperatur der Arbeitssubstanz von T_2 auf T_1 nicht durch adiabatische Kompression, wie dies Carnots Kreisprozeß (§ 43) verlangt, erfolgt, sondern durch Berührung mit dem Inhalte des Kessels, welcher beständig auf der Temperatur T_1 erhalten wird; infolgedessen nimmt die Arbeitssubstanz während dieses Stadiums Wärme durch einen nicht umkehrbaren Prozeß auf. In jeder anderen Hinsicht ist obiger Kreisprozeß jedoch umkehrbar.

Wir können jedoch auch diesen Prozeß als einen genau umkehrbaren ansehen, wenn wir von der Annahme ausgehen, daß das Speisewasser seine Wärme bei unendlich kleinen Abstufungen oder Intervallen einer Temperaturreihe T_2 bis T_1 aus einer Reihe von imaginären Wärmequellen aufnimmt, deren jede dieselbe Temperatur wie das Speisewasser in dem Momente besitzt, als es mit der betreffenden Quelle in Berührung kommt. Man könnte diesen Gedanken in der Weise verwirklichen, daß man sich das Speiserohr durch einen erhitzten Kanal geleitet denkt, dessen Temperatur unmittelbar am Kessel T_1 sei und sich allmählich auf die Temperatur T_2 des Kondensators verringert. Dadurch würde die Temperatur des Speisewassers allmählich erhöht und dasselbe an keiner Stelle mit einer Wärmequelle in Berührung gebracht, deren Temperatur von jener, welche das Speisewasser bis zum Momente der Berührung erreicht hat, verschieden wäre. Durch eine derartige Anordnung wird die Maschine zweifellos zu einer streng reversiblen Maschine, welche jedoch Wärme bei verschiedenen Temperaturen empfängt. Die Wirkungsweise der Maschine wird durch diese imaginäre Anordnung der Speiseleitung, ebenso wie die aufgenommene Gesamtwärme, in keiner Weise beeinflußt; die Idee der allmählichen Erhitzung des Wassers im Speiserohre wurde nur aus dem Grunde hervorgehoben, um zu zeigen, daß der Prozeß als umkehrbar gelten kann, wenn man mit dem Faktum rechnet, daß nicht alle Wärme am oberen Ende der Temperaturreihe, sondern Partien derselben auch bei niedrigeren Temperaturen aufgenommen werden. Jede Wärmemenge, welche die Arbeitssubstanz empfängt, wird nach ihrer Aufnahme in denkbar günstigster Weise ausgenützt, sodaß der Ausdruck

$$\frac{T - T_2}{T}$$

den Wirkungsgrad der Umsetzung jeder einzelnen Wärmemenge in Arbeit bestimmt, wenn T die Temperatur der Arbeitssubstanz in dem Momente ist, als dieselbe diese Wärmemenge aufnimmt. Der einzige nicht umkehrbare Zug in der Wirkungsweise dieser Maschine ist der Wärmeabfluß aus einer Wärmequelle von der Temperatur T_1 in das Speisewasser, während die Temperatur desselben niedriger ist als T_1; wir beseitigen jedoch diese teilweise Nichtumkehrbarkeit dadurch, daß wir jene Temperatur als Aufnahmetemperatur jeder einzelnen Wärmemenge annehmen, welche die Arbeitssubstanz in dem Momente besitzt, in dem sie diese fragliche Wärmemenge aufnimmt.

Es ist klar, daß diese Bemerkungen allgemein anwendbar sind und daß, wenn obige Auffassung sowohl inbezug auf die Temperatur der Wärmeaufnahme, als auch inbezug auf die Temperatur der Wärmeabgabe als zutreffend angenommen wird, der Prozeß irgend einer Wärmemaschine als umkehrbar zu betrachten ist, vorausgesetzt daß die Expansion und Kompression dieses Prozesses im Sinne der an früherer Stelle (§ 26) gegebenen Erklärung selbst umkehrbar sind. Mit einer Wärmequelle von gegebener Temperatur kann Wärme somit nur dann möglichst ausgenützt werden, wenn alle Wärme aufgenommen wird, während die Arbeitssubstanz diese Temperatur besitzt; nur in diesem Falle kann der größte Wert des Wirkungsgrades, nämlich $\frac{T_1 - T_2}{T_1}$ erreicht werden. Die Maschine kann jedoch einen Teil ihrer Wärme auch bei Temperaturen kleiner als T_1 aufnehmen und trotzdem in der Umwandlung der so erhaltenen Wärme reversibel sein, in welchem Falle aber der Wirkungsgrad des ganzen Prozesses kleiner ist als $\frac{T_1 - T_2}{T_1}$, obgleich die allgemeine Formel $\frac{T - T_2}{T}$ trotzdem anwendbar bleibt inbezug auf jeden einzelnen Teilbetrag der gesamten Wärme, wenn für T geeignete Werte angenommen werden.

Die ideale Dampfmaschine, welche den Gegenstand dieser Betrachtung bildet, ist ein solcher Fall. Sie nimmt den größten Teil der Wärme bei der Temperatur T_1, den übrigen Teil jedoch bei Temperaturen zwischen T_1 und T_2 auf; soweit sich der Prozeß in der Maschine vollzieht, ist derselbe umkehrbar; die durch denselben in Arbeit verwandelte Wärmemenge berechnet sich nach der Formel

$$\sum \frac{\delta Q (T - T_2)}{T},$$

worin δQ irgend einen Teil der aufgenommenen Wärme und T die Temperatur bezeichnet, bei welcher diese Wärme aufgenommen wurde.

Die Gesamtwärme, welche pro Gewichtseinheit der Arbeitssubstanz aufgenommen wird, setzt sich zusammen aus jener Wärmemenge, welche erforderlich ist, um das Wasser von T_2 auf T_1 zu erhitzen, das ist $(h_1 - h_2)$, aufgenommen während die Temperatur veränderlich ist, und aus der latenten Wärme L, aufgenommen bei der konstanten Temperatur T_1. Die Arbeit, geleistet pro Gewichtseinheit Dampf, ist daher (ausgedrückt in Wärmeeinheiten)

$$W = \int_{h_2}^{h_1} \frac{dh (T - T_2)}{T} + \frac{L_1 (T_1 - T_2)}{T_1}$$

oder in anderer Weise geschrieben

$$W = \int_{h_2}^{h_1} dh - T_2 \int_{h_2}^{h_1} \frac{dh}{T} + \frac{L_1 (T_1 - T_2)}{T_1}.$$

Daraus ergibt sich

$$W = h_1 - h_2 - T_2 \cdot \log_e \frac{T_1}{T_2} + \frac{L_1 (T_1 - T_2)}{T_1}, \tag{7}$$

nachdem dh nahezu gleich dT angenommen werden kann und die spezifische Wärme des Wassers nahezu konstant und gleich der Einheit ist. Aus demselben Grunde kann man auch schreiben $h_1 - h_2 = T_1 - T_2$ und somit vorstehendes Resultat wie folgt ausdrücken

$$W = (T_1 - T_2)\left(1 + \frac{L_1}{T_1}\right) - T_2 \log_e \frac{T_1}{T_2}. \tag{8}$$

Dies ist die größte Arbeit, welche von einer Maschine unter den denkbar günstigsten Umständen pro Gewichtseinheit Dampf geleistet werden kann, welche Dampf vom Kessel bei der Temperatur T_1 entnimmt und das kondensierte Wasser bei der Temperatur T_2 in den Kessel zurückführt. Dieses Resultat ist von Interesse, weil es als Maßstab dienen kann zum Vergleiche der Leistungsfähigkeit wirklicher Dampfmaschinen (siehe Abschnitt V)*).

Es erscheint zweckmäßig, für diesen Kreisprozeß einen Namen oder eine Bezeichnung einzuführen; einem Brauche folgend, welcher sich bereits eingebürgert hat, sei derselbe „Clausius' Kreisprozeß" genannt.

Der Wirkungsgrad einer Dampfmaschine, welche ohne Kompression in dieser sonst denkbar günstigsten Weise arbeitet, ergibt sich durch Division obigen Ausdruckes für W durch die pro Gewichtseinheit aufgenommene Wärme

$$L_1 + h_1 - h_2.$$

Als ein numerisches Beispiel sei eine nach diesem Schema arbeitende ideale Maschine gewählt; dieselbe erhält Dampf von der absoluten Pressung $p_1 = 11{,}5$ kg/qcm und kondensiert denselben bei der Temperatur $t_2 = 15^0$ C bei vollständiger adiabatischer Expansion von der Anfangstemperatur $t_1 = 185^0$ C bis zur Kondensatortemperatur t_2. Es ist somit $T_1 = 458$, $T_2 = 288$ und $L_1 = 475{,}86$; diese Werte in Gleichung (8) eingesetzt, ergibt

$$W = (458 - 288)\left(1 + \frac{475{,}86}{458}\right) - 288 \log_e \frac{458}{288} = 213{,}3 \text{ W.-E.}$$

*) Um numerische Werte für W zu finden, kann die Größe $\frac{L}{T}$ aus der Tabelle II entnommen werden; sie ergibt sich aus der Differenz der Zahlen unter der Bezeichnung Φ_s und Φ_ω (siehe § 62).

Die Wärmeaufnahme pro 1 kg Dampf beträgt 645 W.-E. Daraus ergibt sich der Wirkungsgrad des Kreisprozesses mit $\frac{213,3}{645} = 0,330$.

Der Wirkungsgrad einer Maschine nach § 43, bei welcher der umkehrbare Kreisprozeß durch adiabatische Kompression geschlossen wird, beträgt nach früher

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1} = 0,371.$$

Die Abwesenheit der adiabatischen Kompression hat somit in diesem speziellen Falle den Wirkungsgrad um ca. 11 Prozent verringert.

Dieser Vergleich zeigt, welcher Arbeitsverlust durch die zum Teil unrichtige Verwendung der Wärme hervorgerufen wird, resultierend in unserem Falle aus dem Umstand, daß das Speisewasser kalt in den Kessel kommt und dort durch Berührung mit dem bereits vorhandenen heißen Wasser erhitzt wird, infolgedessen jener Teil der Wärme, welcher durch $h_1 - h_2$ ausgedrückt wird, bei Temperaturen aufgenommen wird, welche niedriger sind als die höchste Temperatur des Prozesses.

Der Ausdruck für W in Gleichung (8) gibt die denkbar größte Arbeit, welche man aus der Gewichtseinheit Dampf gewinnen kann, wenn die Temperaturen des Kessels und Kondensators gegeben sind. Diese Gleichung dient aber zugleich auch als ein Maß, mit welchem die Wirkung des Dampfcylinders für sich, ohne Beziehung zum Kessel oder Kondensator verglichen werden kann. Für diesen Zweck ist unter T_1 die Temperatur des Eintrittsdampfes und unter T_2 jene des Austrittsdampfes zu verstehen, welche Temperaturen von jenen des Kessels resp. Kondensators im allgemeinen verschieden sein werden.

Die in Rede stehende Gleichung gibt den Grenzwert der Arbeit, hinter welchem die wirkliche Leistung des Dampfes stets zurückbleibt und liefert zugleich eine nützliche Kontrolle der Resultate wissenschaftlicher Untersuchungen von Dampfmaschinen.

55. Ausdehnung auf den Fall anfänglich nicht trockenen Dampfes. Das im vorigen Paragraph erhaltene Resultat kann ohne weiteres auch auf solche Fälle ausgedehnt werden, wo der Dampf mit Beginn der adiabatischen Expansion nicht trocken ist. Sei q_1 die Trockenheit in diesem Stadium, das ist nach früher der Gehalt an trockenem Dampf in der Gewichtseinheit der Mischung, dann ist die während der Verdampfung aufgenommene Wärme $q_1 L_1$ pro Gewichtseinheit der Arbeitssubstanz; die während der Erhitzung des Wassers bis zur Temperatur T_1 aufgenommene Wärme bleibt jedoch dieselbe wie vorher. Der Ausdruck für die pro Gewichtseinheit des Speisewassers geleistete Arbeit (vollstän-