kalte Receiver an denselben angefügt werde. Es macht jedoch keinen Unterschied, ob der Dampf im Cylinder oder in einem eigenen, separierten Gefäße kondensiert wird; dieselbe Arbeit wird in beiden Fällen geleistet, denn der Druck auf den Kolben ist der gleiche in dem einen Falle wie im anderen. Nachdem somit die Fläche des Entropie-Temperaturdiagramms hierdurch unberührt bleibt, mag $T_2$ welchen Wert immer besitzen, so bleibt auch der Verlauf der Kurve $cd$ oder $c'd$ ungeändert.

Die Kurve $cd$ oder $c'd$ konstanten Volumens kann auch durch Anwendung der Gleichung (3) § 51 gezeichnet werden. Stellt $U$ das Volumen der Mischung aus Dampf und Wasser in irgend einem Stadium des Kondensationsprozesses bei der Temperatur $T$ dar; sei ferner $\lambda$ jene Wärme, welche abgegeben würde, wenn die Kondensation der Mischung bei der Temperatur $T$ vollständig wäre, dann besteht nach § 51 die Gleichung

$$U - \omega = \frac{J\lambda}{T} \cdot \frac{dT}{dp},$$

worin noch $\omega$ das Volumen der Substanz darstellt, wenn dieselbe nur aus Wasser bestände.

Daher ist

$$\frac{\lambda}{T} = \frac{U-\omega}{J} \cdot \frac{dp}{dT}.$$

$\frac{\lambda}{T}$ ist in obigem Diagramm Fig. 29 die Länge $le$, wenn die Linie $le$ im Niveau der Temperatur $T$ gezogen ist; $U$ ist das Volumen des Cylinders, welches konstant ist. Es ist somit

$$\frac{\lambda}{T} \text{ proportional } \frac{dp}{dT},$$

eine Beziehung, mittelst welcher $le$ bei irgend einem Temperaturniveau bestimmt werden kann, sobald die Werte von $\frac{dp}{dT}$ für gesättigten Dampf bekannt sind. Diese Werte können entweder aus der Neigung der Drucktemperaturkurve oder näherungsweise aus einer Tabelle für $p$ und $T$ ermittelt werden, indem man kleine Druckunterschiede durch die korrespondierenden Temperaturunterschiede dividiert. Diese Methode mag in manchen Fällen bequemer anzuwenden sein, als die vorher erörterte Methode der graphischen Ermittlung der Kurve konstanten Volumens; letztere Methode wurde von Professor Cotterill in der zweiten Auflage seiner Schrift „*Treatise on the Steam-Engine*" angegeben.

Die beiden Figuren 28 und 29 sind im Maßstabe gezeichnet.

**65. Gesamtwärme des überhitzten Dampfes.** In § 39 wurde bereits auf Rankines Methode der Bestimmung der Gesamtwärme hoch überhitzten Dampfes, des sogenannten Dampfgases, hingewiesen und hierfür die Formel gegeben

$$H' = 606{,}50 + 0{,}48\, t',$$

mit dem Bemerken, daß die Begründung derselben in § 65 erfolgen werde.

Zu dieser Formel gelangt man nun auf folgende Weise. Nach den Versuchen Regnaults ist es als feststehend anzunehmen, daß Dampf von niedriger Spannung bei der Überhitzung sich wie ein vollkommenes Gas verhält; daß ferner die spezifische Wärme des bei $0^0$ C gesättigten und unter konstantem Druck überhitzten Dampfes als konstant und gleich 0,48 angenommen werden kann. Wenn man daher Wasser bei $0^0$ C verdampft und dann unter konstantem Druck auf irgend eine Temperatur $t'$ überhitzt, so ergibt sich die totale Wärme des Dampfes nach obiger Formel, nachdem 606,5 die totale Wärme des Dampfes bei $0^0$ C ist. Setzen wir nun voraus, $t'$ sei sehr hoch. Der Dampf wird sich in diesem Falle auch dann noch wie ein vollkommenes Gas verhalten, wenn sich dessen Druck ändert. Nehmen wir nun an, der Druck vergrößere sich isothermisch von dem Anfangswerte zu irgend einem anderen Werte, dann ist zu beweisen, daß hierdurch die totale Wärme des Dampfes nicht geändert wird oder mit anderen Worten, daß die totale Wärme überhitzten Dampfes unabhängig von der Spannung desselben ist, sobald sich der Dampf, genügend hohe Überhitzung vorausgesetzt, tatsächlich wie ein vollkommenes Gas verhält. Wenn dies der Fall ist, dann ist auch klar, daß der obige Ausdruck für $H'$ auch anwendbar ist auf Dampfgas irgend einer anderen Spannung, sobald die Überhitzungstemperatur $t'$ in beiden Fällen den gleichen Wert besitzt.

Wir wollen nun, um obigen Beweis zu erbringen, einen imaginären Kreisprozeß betrachten, in welchem der Druck veränderlich sei von einem beliebigen Werte $p_1$ zu irgend einem anderen Werte $p_2$, während die Temperatur $t'$ konstant bleibt. Dampf werde zunächst bei dem Drucke $p_1$ gebildet und dann auf die Temperatur $t'$ (absolut $T'$) überhitzt, wobei $t'$ so hoch angenommen sei, daß sich der Dampf wie ein vollkommenes Gas verhalte, welches auch immer seine Spannung sei. Bezeichne $H_1'$ die während dieses Prozesses aufgenommene Wärme und $v_1$ das Volumen des überhitzten Dampfes von der Spannung $p_1$; die zur Erzeugung des Dampfes erforderliche Arbeit ist $p_1 v_1$, wenn man das geringe Anfangsvolumen des Wassers vernachlässigt. Nun lasse man den Dampf im Zustande der Überhitzung isothermisch expandieren auf irgend ein Volumen $v_2$ und eine Spannung $p_2$; während dieses Prozesses verhalte sich der Dampf, der früheren Annahme gemäß, gleichfalls wie ein vollkommenes Gas; es ist daher $p_1 v_1 = p_2 v_2$ und die während der Expansion aufgenommene Wärme äquivalent der geleisteten Arbeit

$$\int_{v_1}^{v_2} p\,dv \quad \text{oder} \quad R\,T_1' \log_e \frac{v_2}{v_1}.$$

Nun werde der Dampf unter dem konstanten Drucke $p_2$ kondensiert; die hierbei ausgegebene Wärmemenge sei $H_2'$; dies ist zugleich die totale Wärme des überhitzten Dampfes von der Temperatur $t'$, gebildet unter dem Drucke $p_2$. Die während der Kondensation abgeführte Arbeit beträgt $p_2 v_2$. Der Kreisprozeß werde schließlich durch die Erhöhung des Druckes von $p_2$ auf $p_1$ wieder geschlossen.

Für den ganzen Kreisprozeß ergibt sich

aufgenommene Wärme + auf das Gas übertragene Arbeit
= abgeführte Wärme + von dem Gase geleistete Arbeit,

oder

$$H_1' + R\,T' \log_e \frac{v_2}{v_1} + p_2 v_2 = H_2' + p_1 v_1 + R\,T' \log_e \frac{v_2}{v_1}.$$

Nachdem ferner

$$p_1 v_1 = p_2 v_2,$$

wird

$$H_1' = H_2',$$

das heißt, für gleiche Überhitzungstemperaturen ist die totale Wärme des Dampfgases die gleiche, unter welchen Drücken immer der Dampf gebildet wurde, beziehungsweise ob der Druck während der Dampfbildung konstant blieb oder nicht. Rankines Formel ist daher für hohe Überhitzungen anwendbar, vorausgesetzt, daß die experimentelle Grundlage, wonach sich gesättigter Dampf bei 0° C wie ein vollkommenes Gas verhält, sowie die Annahme der Konstanten richtig ist.

Bei jenen Spannungen, welche in der Dampfmaschinenpraxis gewöhnlich vorkommen, müßte die Überhitzung, damit sich der Dampf wie ein vollkommenes Gas verhält, viel weiter getrieben werden, als dies tatsächlich erfolgt; Rankines Formel ist daher nur in den seltensten Fällen zur Bestimmung der Gesamtwärme überhitzten Dampfes anwendbar; in gewöhnlich vorkommenden Fällen sind die mit dieser Formel berechneten Werte ungebürlich groß, wie aus nachstehendem Beispiel zu ersehen.

Gesättigter Dampf von 100° C werde unter konstantem Druck um 60°, somit auf 160° C überhitzt. Nach obiger Formel wäre somit $H' = 606{,}50 + 0{,}48\,t'$ oder gleich 683,3; im gesättigten Zustande (100° C) wäre die Gesamtwärme nach der Formel $H = 606{,}50 + 0{,}305\,t = 637$; es würde daher die während der Überhitzung aufgenommene Wärme 46,3 Wärmeeinheiten oder pro Grad der Überhitzung 0,77 Einheiten betragen, somit wesentlich größer sein, als die für gewöhnlich angenommene Konstante 0,48. In einem solchen Falle geringer Überhitzung gibt Rankines Formel entschieden zu große Werte für die totale Wärme. Für eine höhere Überhitzung, z. B. $t' = 300^0$ C (eigentliche Überhitzung um $200^0$ C) ergibt sich $H' = 750{,}5$ und $H = 637$; somit die Überhitzungswärme pro Grad der Überhitzung 0,57 Wärmeeinheiten, falls Rankines Werte für $H'$ ein richtiges Maß für die Beurteilung der totalen Wärme wären. Wie man sieht, ist diese Formel auch für solche Fälle hochgehender Überhitzung nicht mit hinlänglicher Genauigkeit anwendbar; für höhere Spannungen würden die Abweichungen noch größer werden. Es scheint daraus hervorzugehen, daß die gebräuchliche Annahme der Unveränderlichkeit der spezifischen Wärme überhitzten Dampfes wahrscheinlich falsch ist und es dürfte im Wege des Experimentes nachweisbar sein, daß in dem anfänglichen Stadium der Überhitzung mehr Wärme pro Grad verbraucht wird, als im weiteren Verlaufe derselben*).

Es sei hier bemerkt, daß Regnaults Versuche nur die Differenz der totalen Wärme stark und schwach überhitzten Dampfes behandeln, sich jedoch auf die spezifische Wärme schwach überhitzter Dämpfe, selbst bei geringen Spannungen, nicht erstrecken.

**66. Entropiediagramm einer Maschine, arbeitend mit Dampf, gesättigt durch die ganze Expansion.** Dieser Fall wurde bereits in § 47 als Grenzfall einer mit Dampfmantel arbeitenden Maschine erwähnt, unter der Voraussetzung, daß infolge des Mantels der Dampf während der ganzen Expansion trocken erhalten wird. Das Entropiediagramm ist für vollständige Expansion durch den Linienzug *abcf* Fig. 23 dargestellt; die Sättigungskurve *cf* repräsentiert den Prozeß der Expansion und die Fläche *pcfl* ist die vom Dampfmantel gelieferte Wärmemenge $H_m$. Die geleistete Arbeit $W$ ist aus der Fläche des Diagramms leicht zu berechnen, wenn man berücksichtigt, daß die Breite derselben in irgend einer Höhe $\frac{L}{T}$ ist.

$$W = \int_{T_2}^{T_1} \frac{L}{T}\, dT.$$

Um diesen Ausdruck integrieren zu können, müssen wir die latente Wärme $L$, wie in § 35, Gleichung (7) ausdrücken in der Form

$$L = a - bT.$$

*) Bezüglich dieses Gegenstandes sei auf die Publikation von Professor Osborne Reynolds *„On methods of determining the dryness of steam and the condition of steam-gas“* in Proc. of the Manchester Phil. Soc. Nov. 1896 hingewiesen; ferner auf die Arbeit von Prof. Ewing und Dunkerley *„On the specific heat of superheated steam“*, Rep. Brit. Association 1897.