

Die

# Wärmeausnutzung

## bei der Dampfmaschine.

Von

**W. Lynen,**

Professor an der techn. Hochschule in Aachen.

Mit 24 in den Text gedruckten Figuren.



Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg GmbH  
1901.

Die

# Wärmeausnutzung

## bei der Dampfmaschine.

Von

**W. Lynen,**

Professor an der techn. Hochschule in Aachen.

Mit 24 in den Text gedruckten Figuren.



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1901

ISBN 978-3-662-39315-4

ISBN 978-3-662-40355-6 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-40355-6

---

**Sonderabdruck  
aus der  
Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure  
1901.**

## Vorwort.

---

Die nachstehende Abhandlung über die Ziele und die Erfolge in der Wärmeausnutzung bei der Dampfmaschine — ein Sonderabdruck aus der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure — ist ursprünglich als Vortrag auf Anregung des M.-Gladbacher Dampfkessel-Revisionsvereines vor den Industriellen des dortigen Bezirkes gehalten worden.

Mehrfach an mich ergangenen Wünschen, die Abhandlung einem weiteren Kreis zugänglich zu machen, glaubte ich entsprechen zu sollen, und die Verlagsbuchhandlung hat mit großer Bereitwilligkeit die Schrift in würdiger Weise gestattet.

Ich hoffe, dass das kleine Buch manchem im Industriebetrieb Stehenden oder in dasselbe Eintretenden eine willkommene Gabe ist, und dass er aus seinem Inhalt gewünschte Belehrung schöpfen kann, wenngleich die Sprache der Figuren nicht so eindringlich zu wirken vermag, wie die vom gesprochenen Wort unterstützte Vorführung der körperlichen Modelle.

Aachen, im Mai 1901.

W. Lynen.

---

Der Fortschritt zeigt sich im Dampfmaschinenbetrieb durch immer weiter gehende Einführung von solchen Arbeitsweisen, wie z. B. die mehrstufige Expansion und die Dampfüberhitzung, welche geeignet sind, die im Dampf enthaltene Wärme besser auszunutzen, und durch die sich unsere Maschinen der vollkommenen Maschine immer mehr nähern. Es ist aber mit jedem Fortschreiten in der Ausnutzung der Wärme eine Erschwerung des Betriebes verbunden, und ein guter Erfolg in einer Dampfanlage wird immer mehr nicht allein vom guten Willen, sondern auch vom guten Verständnis der mitarbeitenden Menschen abhängig gemacht.

Die bessere Ausnutzung der uns von der Natur gebotenen Wärmeschätze hat aber eine so große wirtschaftliche Bedeutung, und durch größere Sparsamkeit in dem weit ausgedehnten Dampfmaschinenbetriebe kann eine so bedeutende Vermehrung unseres Nationalvermögens erzielt werden, dass es sich wohl lohnt, die Fortschritte in der Wärmeausnutzung immer mehr zu steigern. Das kann z. T. dadurch erreicht werden, dass die Kenntnis der Grundlagen allgemein verbreitet wird, auf denen sich dieser Fortschritt aufbaut, dass das Verständnis der Wärmevorgänge in der Dampfmaschine und der Mittel, die wir in der Hand haben, um sie zu unserem Vorteil zu leiten, allgemeiner geweckt wird.

Die Wärme ist wie die Elektrizität so flüchtig und fein, dass wir uns keine klare Vorstellung von ihr machen können. So kommt es, dass die wichtigen Sätze der mechanischen Wärmetheorie und das eigenartige Verhalten der Wärme bei ihrer Umwandlung in mechanische Arbeit nicht so allgemein bekannt sind, wie es wohl wünschenswert wäre.

Es ist zu bedenken, dass es sehr viele Menschen giebt, die mit Dampfmaschinen zu thun haben und doch keine Ma-

schineningenieure sind. Das Maschinenwesen durchwächst und durchsetzt immer mehr alle möglichen Betriebe, die Dampfergie macht sich immer mehr beliebt und unersetzlich als ein Mittel, um eine Ersparnis in den Gesteungskosten herbeizuführen, namentlich seitdem ihre Schwester Elektrizität sich als eine angenehme und überall brauchbare Gehülfin erwiesen hat. Es giebt daher viele Leute in den allgemeinen technischen Kreisen, wie städtische Ingenieure, Chemiker usw., die vor wichtige Fragen aus dem Dampfmaschinenwesen gestellt werden. Weiter kommen die meisten Dampfmaschinen in chemischen Fabriken, auf Hüttenwerken, in der Textilindustrie vor und sind dort Betriebsleitern unterstellt, deren eigentlicher Beruf sie nicht in innige Bekanntschaft mit den naturwissenschaftlichen Grundlagen der Dampfmaschine gebracht hat. Eine Neigung zur Erlangung der fehlenden Kenntnisse ist bei diesen Betriebsleitern stets und in hohem Maße vorhanden; leider kann die Neigung oft nicht befriedigt werden, weil sie ein zu großes Opfer an Zeit auferlegt. Auch das Arbeiterpersonal muss sich oft mit Einrichtungen abgeben, für die ihm das Verständnis fehlt. Eine jede mechanische, der Klarheit über Weg und Ziel entbehrende Thätigkeit führt aber leicht zur Gleichgültigkeit und Nachlässigkeit, wenn nicht gar zu Fehlern.

Für alle diese Menschen ist ein Vorteil erreicht, wenn es gelingt, die Wärmevergänge anschaulich zu machen, was am besten geschieht, wenn die Wärme körperlich dargestellt, gewissermaßen handgreiflich gemacht wird. Durch das sinnliche Erfassen der Wärmevergänge kann ihr Verständnis erleichtert und in kurzer Zeit herbeigeführt werden.

Es braucht wohl nicht näher darauf eingegangen zu werden, welche Vorteile aus einem solchen Erkennen der für unser wirtschaftliches Dasein hochwichtigen Wärmevergänge erwachsen. Wenn den Besitzern von Maschinenanlagen die Ziele bekannt sind, denen wir zustreben können, so macht sie dies eifrig, diese Ziele zu erreichen; denn jedem Menschen ist das Streben nach Vervollkommenung tief und fest eingewurzelt. Wenn die Grenzen erkenntlich gemacht sind, über die wir in unserem Streben nicht hinauskommen können, so wird mancher geschickten, mit der weitverbreiteten Unkenntnis in Wärmeverhältnissen rechnenden Reklame der Boden entzogen. Wenn die mit Rücksicht auf die ganze Anlage vorgenommene Prüfung der einzelnen zur Anwendung gelangenden Mittel ergibt, dass kein Mittel, welches zur Verbesserung der Dampfausnutzung angewandt wird, ein Universalmittel

ist, welches überall und ausschließlich mit Erfolg angewandt werden kann, dass vielmehr in Dampfanlagen der Grundsatz gilt: »Viele Wenig machen ein Viel«, so regt dies zur Gewissenhaftigkeit im anscheinend Kleinen und Unwichtigen an.

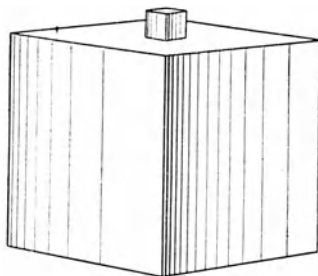
Wie in der großen Natur, so giebt es auch im wirtschaftlichen Leben der Menschen und in der Ausnutzung der Naturkräfte durch den Menschen kein allgemein gültiges Schema. Die einzelnen Umstände, die berücksichtigt werden müssen, sind so mannigfaltig, die Kräfte, welche sich fördernd und hemmend im einzelnen Fall einstellen, treten so unregelmäßig und verschiedenartig auf, dass jeder Gesamterfolg auf einer Anzahl von Teilerfolgen beruht. Ebenso wenig, wie ein besonders starkes, einzelnes Glied die Tragkraft einer Kette erhöht, wird eine einzelne, besonders gute Einrichtung, wie eine gute Steuerung oder eine Ueberhitzeranlage, eine sonst mangelhaft angelegte oder geführte Maschinenanlage herausreißen können. Die allseitige Prüfung der in Dampfanlagen angewandten Mittel ist also wichtig; sie kann aber durch Veranschaulichung der Wärmevorgänge auch Nichtfachleuten ermöglicht werden.

Die Elektrotechnik hat, obwohl sie jünger ist als die Dampftechnik, viel allgemeiner zu einer guten Veranschaulichung der von ihr benutzten Naturvorgänge beigetragen, was wohl für das Verständnis der Monteure für die Installationseinrichtungen und zur Erwerbung von Freunden der neu angebotenen Energie in Abnehmerkreisen notwendig war. Bei Dampfanlagen war ein Bedürfnis nach unbedingtem Verständnis der Anlage nicht so vorhanden. Sehr dankenswert ist die Art, wie in Herrmann: »Die graphische Behandlung der mechanischen Wärmetheorie«, das zeichnerische Verfahren angewandt ist, um einen Einblick und Ueberblick über das Gebiet der Wärmeenergie zu gestatten. Wenn ich im Nachstehenden von der zeichnerischen Darstellung auf die plastische übergehe und — teilweise in Anlehnung an die Herrmannsche Arbeit — eine Verkörperung der Wärme vornehme, so hoffe ich, mit meinen Auseinandersetzungen denen, die in die Kenntnisse von der mechanischen Wärmetheorie eingeführt sind, eine kurze Unterhaltung darzubieten, und denjenigen, denen der Gegenstand fern gelegen hat, das Verständnis für das eigenartige Verhalten der Wärme bei Arbeitsvorgängen schnell zu erwecken und die Ergebnisse ihrem Gedächtnis fest einzuprägen, wenn ich auch keine vollen Beweise für die Auseinandersetzungen bringe.

Zur Beurteilung der Wärme ist zu beachten, dass sie,

wie jede Energie, als ein Produkt aus zwei Faktoren anzusehen ist. Wie die mechanische Arbeit das Produkt aus Kraft  $\times$  Weg, die Elektrizität gleich Spannung  $\times$  Stromstärke, so ist eine gegebene Wärmemenge  $Q$  als das Produkt  $\frac{Q}{T} \times T$  anzusehen, worin  $T$  die absolute Temperatur bedeutet, unter welcher diese Wärmemenge vorkommt. Wenn man die Wärme als eine Bewegung des die Moleküle des heißen Körpers umgebenden Aethers auffasst, so ist eine gegebene Wärmemenge anzusehen als das Produkt aus der in Bewegung befindlichen Menge vom Betrage  $\frac{Q}{T}$  und der Heftigkeit der Bewegung, die man proportional der absoluten Temperatur  $T$  annehmen kann.

Fig. 1.

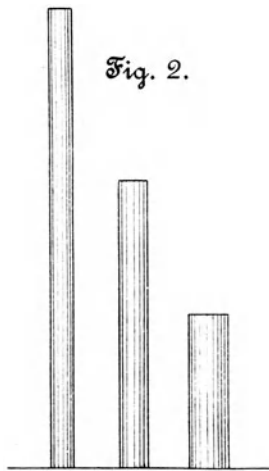


Arbeit und Wärme sind unzerstörbar; es kann aber wohl das eine in das andere verwandelt werden. Wegen ihres Wertes für uns wollen wir uns eine gewisse Wärmemenge durch eine bestimmte Silbermenge dargestellt denken. Es werden sich bei einer solchen Darstellungsart alle Wärmeverluste unwillkürlich dem Gedächtnis schärfer einprägen, denn der Wert dieses Silbers ist auch für uns groß und unzerstörbar. Wir können für Silber Waren kaufen, aber auch Waren in Silber umsetzen, ähnlich wie wir Wärme in Arbeit und Arbeit in Wärme umwandeln können. Die Währung der Wärme ist nach dem ersten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie unveränderlich, und zwar ist 1 Wärmeeinheit, d. i. die Wärmemenge, die wir aufwenden müssen, um 1 kg Wasser von  $0^{\circ}\text{C}$  um  $1^{\circ}\text{C}$  zu erwärmen, gleich 424 Arbeitseinheiten, d. i. gleich der Arbeit, die wir leisten, wenn wir 424 kg 1 m hoch heben.



Das Verhältnis der beiden Einheiten kann sehr gut erfasst werden durch die Betrachtung der beiden Würfel in Fig. 1, von denen der eine 1 ccm, der andere 424 ccm Inhalt hat.

Wie nun dieselbe Silbermenge in verschiedenen Münzen ausgeprägt werden kann, so kann auch eine bestimmte Wärmemenge bei verschiedenen Temperaturen vorkommen. Je kleiner die Münze ist, um so höher ist eine Geldrolle, die man durch Aufeinanderlegen der Geldstücke erhält, welche einen



gewissen Geldbetrag ausmachen. In je größerer Münze man den Betrag hat, um so niedriger fällt die damit aufzubauende Rolle aus.

Bei der Verkörperung der Wärme durch Silber entspricht die Münzsorte dem Ausdruck  $\frac{Q}{T}$  und die Höhe der Geldrolle der Temperatur  $T$ .

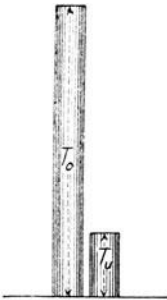
Die drei Rollen der Figur 2 haben denselben Rauminhalt, in Silber ausgeführt also den gleichen Wert; sie sind in Münzen von je 50 Pfg., 1  $\mathcal{M}$  und 1 Thaler gedacht.

Eine Arbeitsleistung durch Vermittlung einer Wärmeumwandlung kann verglichen werden mit dem Abtragen einer Geldrolle unter Verwendung der einzelnen Geldstücke zum Ankauf entsprechender Werte.

Eine besondere Bedeutung hat unter allen möglichen Umwandlungsprozessen der sogenannte Carnotsche Kreisprozess, bei welchem alle zuzuführende Wärme dem vermittelnden Körper bei der oberen Temperatur  $T_o$  zugeführt und alle aus dem Prozess wieder ausscheidende Wärme bei der unteren Temperatur  $T_u$  abgeführt wird.

Die Ergebnisse der rechnerischen Behandlung eines Carnotschen Kreisprozesses lassen sich nun so deuten, dass sich die ganze Umwandlung von Arbeit und Wärme in einer einzigen Münzsorte abspielt, wie durch Fig. 3 veranschaulicht. Bei diesem Prozess ist die Arbeitsleistung des vermittelnden Körpers bei der isothermischen Expansion während des Hinganges

Fig. 3.



des Kolbens in ihrer Wirkung gleich dem Abtragen der ganzen Silberrolle von der Höhe  $T_o$ . Zur Durchführung des »Kreis«-Prozesses, zur fortlaufenden Umwandlung von Wärme in Arbeit, ist es aber unerlässlich, eine isothermische Kompression des die Arbeitsleistung vermittelnden Körpers vorzunehmen, welche sich in unserer Veranschaulichung nach Fig. 3 als das Aufbauen einer neuen Silberrolle von der Höhe  $T_u$  darstellt. Die adiabatischen Volumenänderungen des vermittelnden Körpers, die sich im Carnotschen Kreisprozess zwischen die beiden oben genannten isothermischen Volumen-

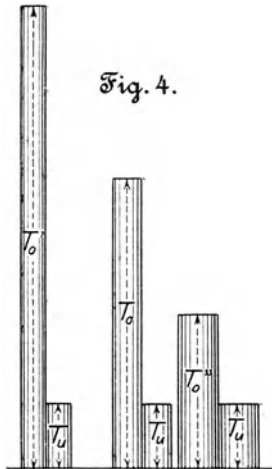
änderungen einschieben und den Arbeitsprozess zu einem geschlossenen, in sich zurückkehrenden Kreisprozess gestalten, heben sich in ihrer Wirkung gegenseitig auf, ähnlich wie das Spannen und Entspannen einer Spiralfeder keinen Zuwachs an Arbeit mit sich bringt, und sie brauchen daher hier nicht betrachtet zu werden, da das Endergebnis des Carnotschen Kreisprozesses ohne weiteres bei der gewählten Veranschaulichung begriffen werden kann. Die Arbeit  $L$ , welche bei einem zwischen den Temperaturen  $T_o$  und  $T_u$  sich abspielenden Carnot-Prozess gewonnen werden kann, wird dargestellt durch die Gesamtheit der Silberstücke, die in den Geldrollen nach Fig. 3 zwischen den Höhen  $T_o$  und  $T_u$  liegt.

Es ist die erzielbare Arbeit  $L = \frac{Q}{T_o} (T_o - T_u)$ , also gleich der

in Bewegung gewesenen Aethermenge  $\frac{Q}{T_o} \times$  Differenz in der Intensität der Bewegung  $T_o - T_u$ . Dieses Ergebnis

kann auch ohne rechnerische Behandlung schon durch einfache Ueberlegung erkannt und durch die Betrachtung der Figur 3 verstanden werden, wenn die Aethermenge  $\frac{Q}{T_0}$  durch die Münze und die Intensität durch die Höhe der Geldrolle dargestellt wird. Die wissenschaftliche Fassung dieser Verhältnisse nennt man den zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie.

Die praktische Bedeutung dieses Satzes kann sofort erkannt werden, wenn wir uns noch zwei andere Carnotsche Kreisprozesse denken, die mit den Münzen der beiden andern Silberrollen aus Fig. 2 veranschaulicht werden können. Bei der isothermischen Expansion im Carnotschen Kreisprozess



wird jedesmal eine Arbeit geleistet entsprechend der ganzen bei der oberen Temperatur zugeführten Wärme, welche durch das vollständige Abtragen der beiden ganzen Silberrollen von der Höhe  $T'_0$  bzw.  $T''_0$  in Fig. 4 veranschaulicht wird. Bei der späteren isothermischen Kompression muss aber eine neue Arbeit geleistet und in Form von Wärme bei der Temperatur  $T_u$  nach außen abgeleitet werden, von einem solchen Betrage, dass sie durch eine in gleicher Münze bis zur Höhe  $T_u$  aufgetragene Geldrolle dargestellt wird. Diese Rolle hat einen um so größeren Wert, je größer die Münzsorte ist, in welcher sie aufgebaut ist. Da wir aber den dieser Rolle ent-

sprechenden Wärmebetrag an die uns umgebende Natur abliefern müssen, so bedeutet er für uns einen Verlust.

Aus den beiden Gleichungen: Wärmemenge = bewegte Aethermenge  $\times$  Intensität der Bewegung  $Q = \frac{Q}{T} \times T$ , und: Erzielbare Arbeit = bewegte Aethermenge  $\times$  Differenz in der Intensität der Bewegung  $L = \frac{Q}{T_o} (T_o - T_u)$ , ergibt sich ohne weiteres, dass wir umso vorteilhafter arbeiten, je mehr wir die obere Intensität der Bewegung steigern, da uns die untere Intensität der Bewegung durch die uns umgebende Natur gegeben ist. Es ist dies eine hochwichtige durch die Fig. 4 veranschaulichte Erkenntnis, welche uns anzeigt, auf welchem Wege wir vorgehen müssen, um eine möglichst vollkommene Ausnutzung der Wärme bei der Umwandlung in Arbeit zu erhalten.

Da wir nach Fig. 4 Geldrollenstümpfe von der Höhe  $T_u$  an die Natur abliefern müssen, so müssen wir darnach trachten, den Inhalt derselben möglichst klein zu machen.

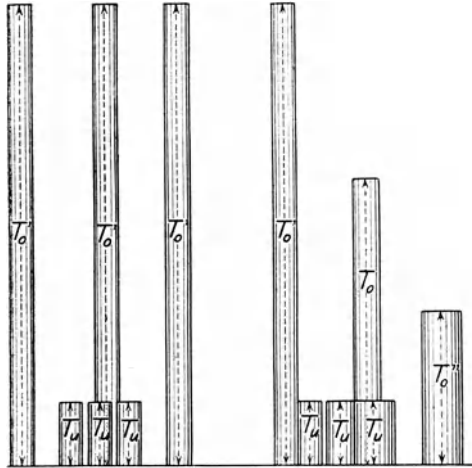
Zunächst macht uns diese Erkenntnis klar, dass wir bei gegebenem Temperaturgefälle  $T_o' - T_u$  mit einer gegebenen Wärmemenge am günstigsten bei dem Carnotschen Kreisprozess arbeiten, weil sie in der für den gegebenen Fall kleinstmöglichen Münze mit der größtmöglichen Differenz  $(T_o' - T_u)$  auftritt. Leiteten wir einen Teil der gesamten Wärme bei einer kleineren Temperatur  $T_o$  oder  $T_o''$  ein, oder bei einer höheren Temperatur als  $T_u$  ab, so würde für diesen Teil im ersten Fall das  $\frac{Q}{T}$  größer, im zweiten Fall das  $(T - T_u)$  kleiner sein, sodass der nicht ausnutzbare Rest in jedem Fall größer ausfiele, als wenn wir alle Wärme bei der oberen Temperatur  $T_o'$  eingeleitet und bei der unteren Temperatur  $T_u$  abgeleitet hätten. In Fig. 5 stellt bezüglich der gesamten veranschaulichten Wärme das linke Modell einen Carnot-Prozess, das andere Modell einen andern Arbeitsprozess dar. Der Unterschied im Inhalt der Rollen von der Höhe  $T_u$  links und rechts lässt die Ueberlegenheit des Carnot-Prozesses erkennen.

Sodann brauchen wir uns nur die in einer gewissen Dampfmenge enthaltene Wärmemenge in die Faktoren  $\frac{Q}{T}$  und  $T$  zerlegt aufzutragen, um sofort nach dem zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie angeben zu können, wie weit wir die Wärme bestenfalls ausnutzen können.

Die in einer gewissen Dampfmenge enthaltene Wärmemenge müssen wir nach drei Einzelbeträgen unterscheiden, nämlich:

1) als Flüssigkeitswärme, d. i. die Wärme, welche aufgewandt werden musste, um das Wasser auf die Temperatur zu bringen, bei welcher es zu verdampfen anfing. Diese Temperatur ist abhängig vom Druck, unter welchem das verdampfende Wasser steht. Bei 6 at ist sie z. B.  $157,9^{\circ}$  C. Wir müssen fast genau 1 WE zuführen, um 1 kg Wasser um  $1^{\circ}$  C zu erwärmen. Zu  $157,9^{\circ}$  C brauchen wir z. B.  $159,6$  WE;

Fig. 5.



2) als innere Verdampfungswärme, d. i. die Wärmemenge, welche aufgewendet werden musste, um die Wassermoleküle so von einander zu lockern, dass aus dem flüssigen Aggregatzustand der dampfförmige entsteht. Dazu sind bei 6 at  $450,4$  WE für je 1 kg Wasser erforderlich;

3) als äußere Verdampfungswärme, d. i. die Wärme, welche der Arbeit entspricht, die zum Zurückschieben der das Wasser bzw. den Dampf einschließenden Wände notwendig ist, damit Platz für den sich bildenden Dampf frei gemacht wird. Bei 6 at sind dies  $44,6$  WE auf 1 kg Wasser.

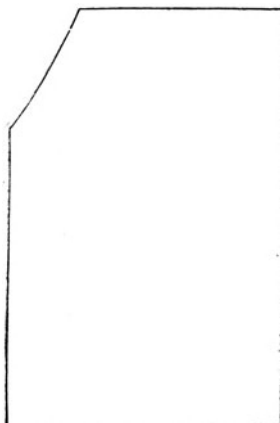
So brauchen wir  $157,9 + 450,4 + 44,6 = 652,9$  WE, um 1 kg Wasser von  $0^{\circ}$  C in Dampf von 6 at zu verwandeln.

Für den Wasserdampf ist es charakteristisch, dass dieser Betrag sich fast nicht mehr ändert, wenn die Spannung, unter welcher der Dampf sich bildet, erhöht oder erniedrigt wird. Um 1 kg Dampf zu erhalten, sind z. B.

bei 6 at	159,6 WE Flüssigkeitswärme,	652,9 WE Gesamtwärme,
» 10 »	181,2 »	661,1 »
» 15 »	200,3 »	666,7 »

erforderlich. Das macht bei 15 at nur 2 vH mehr Gesamtwärme als bei 6 at. Es ist daher für den Heizer nicht schwerer, Dampf bei 15 at als bei 6 at zu halten. Allerdings erfordert

Fig. 6.



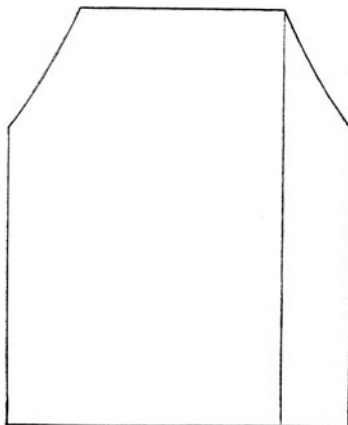
das erste Anheizen des Kessels bei 15 at mehr Mühe als bei 6 at, weil bei dem erstgenannten Druck ein Mehraufwand an Flüssigkeitswärme von 28 vH gegenüber dem Druck von 6 at eintritt.

Trägt man die einzelnen oben angegebenen Wärmebeträge als die Produkte aus  $\frac{Q}{T} \times \text{Temperatur } T$  auf, so erhält man eine Platte von der durch das Modell in Fig. 6 angegebenen Gestalt, welche die Wärme darstellt, die man 1 kg Wasser zuführen muss, um es in Dampf zu verwandeln.

Im ersten, trapezförmigen Teil, welcher die Flüssigkeitswärme darstellt, muss die Platte eine schräg ansteigende Be-

begrenzungslinie erhalten, weil in dem Maße, in welchem dem Wasser Wärme zugeführt wird, seine Temperatur ansteigt und demnach die einzelnen Wärmebeträge  $\frac{Q}{T} \times T$  wachsende Ordinaten  $T$  erhalten. Im zweiten, rechteckigen Teile der Platte, welcher die (innere und äußere) latente Wärme darstellt, muss die obere Begrenzungslinie der Platte eine Wagerechte sein, weil die Temperatur des Wassers während des Verdampfens nicht mehr ansteigt und alle Wärmebeträge  $\frac{Q}{T} T$  den unveränderlichen Faktor  $T$ , entsprechend der Verdampfungstemperatur, erhalten.

Fig. 7.

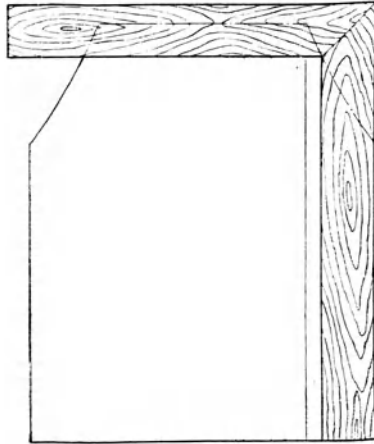


Der Inhalt des trapezförmigen und des rechteckigen Teiles der Platte bleibt zusammen ungefähr der gleiche, ob Dampf von hohem oder niedrigem Druck erzeugt wird. In Fig. 7 ist noch eine zusätzliche Platte an die in Fig. 6 dargestellte Platte angefügt, mit welcher man dies für die Drücke unter 6 at veranschaulichen kann. Die obere, schräg abfallende Begrenzungslinie dieser zusätzlichen Platte ist derart geführt, dass ein Winkelmaß, welches nach Fig. 8 so auf die Platte gelegt ist, dass es mit seiner Innenecke auf diese Begrenzungslinie fällt, jedesmal eine Fläche ausschneidet, welche der Wärmemenge für die Temperatur und den Druck entspricht, der dem wagerechten Schenkel des Winkels zukommt.

Bei höherem Druck ist — entsprechend der höheren Verdampfungstemperatur — die Platte stets nach Fig. 6 höher und schmaler als bei niedrigerem Druck und entsprechend geringerer Temperatur nach Fig. 8.

Um nun mit Hilfe unserer Veranschaulichung zu erkennen, wie weit wir die im Dampf enthaltene Wärme ausnutzen können, denken wir uns Silberrollen aus lauter gleichen Münzen aufgetürmt, die, an der unteren Begrenzungslinie der aufrecht gestellten Platte anfangend, immer bis an die obere Begrenzungslinie heranreichen. Nach dem Gesagten werden wir immer mit ungefähr der gleichen Silbermenge auskommen, ob wir die Platten nach Fig. 6 für höhere oder nach Fig. 8 für niedrigere Spannung zu bedecken haben.

Fig. 8.



Nach dem zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie können wir über alle Silberstücke verfügen, die oberhalb der Wagerechten liegen, welche der unteren Temperatur im Arbeitsprozess, d. i. der Temperatur des Auspuffdampfes oder des aus dem Kondensator abfließenden Wassers, entspricht. Schieben wir nun nach Fig. 9 einen Vorhang über die Platte nach Fig. 6, dessen obere Kante in der Wagerechten  $T_u$  liegt, so erkennen wir, dass der nicht ausnutzbare, unter dem Vorhang liegende Teil der Silber-

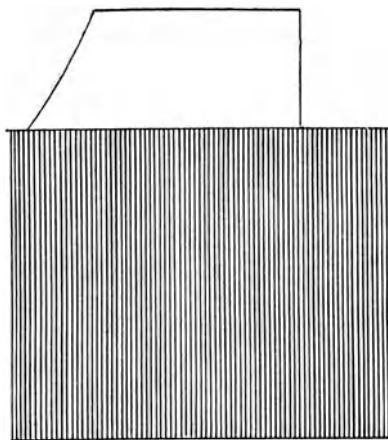


stücke leider ein sehr großer Teil des gesamten Wertes ist. Nach Fig. 9 werden nur etwa 25 vH der in Fig. 6 dargestellten Wärme ausgenutzt.

Für die Natur ist kein Verlust vorhanden. Wenn die Temperatur an der Erdoberfläche gesunken sein wird, dann kann auch der unter dem Vorhang befindliche Teil in der Natur zur Umwandlung in Arbeit gelangen; für uns Menschen ist er aber zu diesem Zweck unausnutzbar.

Das Modell giebt uns über die wichtigsten Fragen aus dem Dampfmaschinenbetrieb sofort klaren Aufschluss. In Fig. 10 ist die Scheidewand zwischen dem ausnutzbaren und

Fig. 9

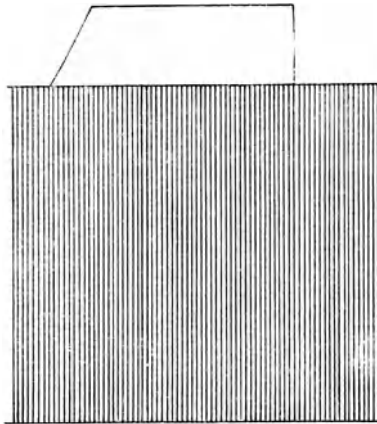


dem nicht ausnutzbaren Teil der Wärme höher gezogen, entsprechend einer Auspuffmaschine, bei welcher die untere Temperaturgrenze im Arbeitsprozess höher liegt als bei einer Kondensationsmaschine nach Fig. 9. Es geht hierbei gegenüber Fig. 9 ein voller Streifen von dem ausnutzbaren Teile verloren. In Fig. 11 ist anderseits die Scheidewand über Fig. 8 gezogen, entsprechend einer Maschine, die mit Kondensation, aber mit geringerem Dampfdruck arbeitet. Der ausnutzbare Teil ist kleiner geworden, weil die Silberrollen zu einem größeren Betrage unter dem Vorhange liegen als in Fig. 9, da die ganze Silbermenge in

niedrigeren Rollen aufgebaut ist, die sich über eine größere Breite erstrecken.

Da die auf die Platte gelegten Silbermünzen die in 1 kg Dampf enthaltene Wärmemenge darstellen und der ausnutzbare Teil der Münzen sich nach dem ersten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie in Arbeit umrechnen lässt, so kann das Modell dazu benutzt werden, den Kohlenverbrauch für die indizierte Pferdekraft-Stunde zu berechnen. In den Kurven der Figur 12 sind die Ergebnisse zeichnerisch aufgetragen, welche man durch die Bestimmung des ausnutz-

Fig. 10.



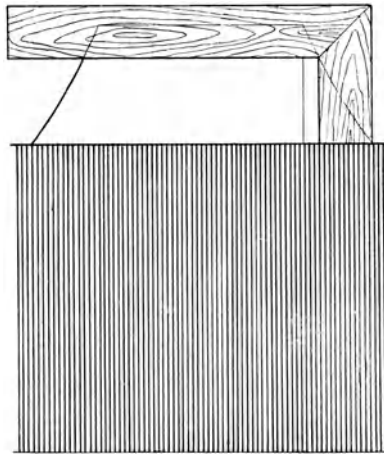
baren Teiles der Wärme bei den verschiedenen Annahmen über den Druck des zur Verwendung kommenden Dampfes erhält.

Es ist nun zu beachten, dass der in den Figuren 9, 10 u. 11 abgetrennte ausnutzbare Teil der Platte die Leistung angiebt, welche man mit einer vollkommenen Maschine erhalten würde, die ohne Drosselung des Dampfes, ohne Undichtheit, ohne Strahlung, ohne Spannungssprung im Indikatordiagramm und ohne Reibung im Gangwerk arbeitet. Die Abszissen bedeuten in Fig. 12 den absoluten Dampfdruck im Kessel, die Ordinaten bedeuten den Verbrauch an Wärmeeinheiten bei Auspuff- und bei Kondensationsmaschinen. Nimmt man an, dass etwa 5000 WE aus 1 kg Kohlen im Kessel nutzbar gemacht

werden können, so kann man aus den Angaben der Kurven auch den Kohlenverbrauch bestimmen, indem man die Anzahl der Wärmeeinheiten durch 5000 dividirt. In Fig. 13 ist in ähnlicher Weise der Dampfverbrauch aus dem Modell entwickelt.

Die Kurven in Fig. 12 und 13 zeigen, dass der Unterschied im Dampf- und Kohlenverbrauch zwischen Auspuff- und Kondensationsmaschinen für kleine Kesseldrücke sehr groß ist, aber mit zunehmendem Kesseldruck abnimmt. Andererseits wirkt auch bei Kondensationsmaschinen die Erhöhung des Dampfdruckes von 10 bis 12 at ab nur noch wenig auf die Verminderung des Dampf- oder Kohlenverbrauches ein. Bei Auspuffmaschinen kommen wir von einem

Fig. 11.



Dampfverbrauch von 14,27 kg für 1 PS<sub>r</sub>-st bei 3 at herunter auf 5,79 kg für die gleiche Leistung bei 15 at Dampfdruck. Bei Kondensationsmaschinen sind die entsprechenden Zahlen 5,21 kg bei 3 at und 3,14 kg bei 15 at.

Diese Zahlen erregen das Erstaunen der Dampfmaschinenbesitzer, welche sicherlich froh sein würden, wenn ihre Dampfmaschinen mit einem so kleinen Verbrauch an Dampf arbeiteten. Es ist aber bei Beurteilung der Figuren 12 und 13 zu beachten, dass die Zahlen aus dem der vollkommenen Maschine entsprechenden Wärmebild ohne die oben angegebenen Verluste entwickelt sind.

Diese Verluste sind teilweise unvermeidlich, teilweise würde es unpraktisch sein, sie vollständig vermeiden zu wollen. Schon Carnot sagt: »Die Versuche, welche man zur

Fig. 12.

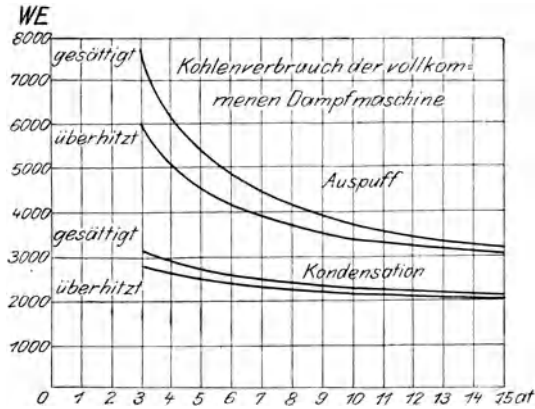
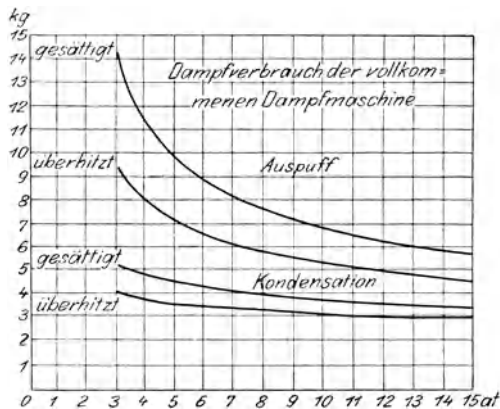


Fig. 13.



Annäherung an dieses Ergebnis anstellen wollte, wären eher schädlich als nützlich, weil sie andere, wichtigere Rücksichten vergessen ließen. Die Ersparnis an Brennstoff ist von den

Bedingungen, die bei den Wärmemaschinen zu erfüllen sind, eine einzige — unter vielen Umständen ist sie nur eine minder wichtige und muss hinter der Sicherheit, der Festigkeit, der Dauer der Maschine, der Einschränkung des Raumes, den sie beansprucht, der Wohlfeilheit ihrer Herstellung usw. zurückstehen. In jedem Falle die Rücksichten auf Bequemlichkeit und auf Ersparnis, welche sich ergeben, nach ihrem wahren Wert zu beurteilen, die wichtigeren derselben von den nur gelegentlichen zu unterscheiden, sie gegen einander angemessen auszugleichen, um mit den einfachsten Hilfsmitteln zu dem besten Ergebnis zu gelangen, dies muss die wesentliche Aufgabe des Mannes sein, welcher berufen ist, die Arbeiten seines Nächsten zu leiten, zusammenzufassen und zu einem nützlichen Zweck irgend welcher Art zusammen wirken zu lassen.«

Es ist angebracht, hier auf die ähnlichen Verhältnisse bei der Reinigung des Schlammes in Erzaufbereitungen hinzuweisen. Bis zu einem gewissen Grade machen sich die Reinigungskosten bezahlt. Strebte man jedoch eine vollständige Reinigung an und wollte man das allerletzte und aller kleinste Erzkörnchen aus dem Schlamm herausholen, so würde man ein schlechtes Geschäft machen.

Die wirkliche Ausnutzung des Dampfes ist aber so weit von dem durch die vollkommene Maschine gegebenen Ziel entfernt, dass noch ein besonderes Hemmnis vorhanden sein muss, welches dieses Ziel versperrt. Die praktische Erfahrung in der früheren Zeit des Dampfmaschinenbetriebes hat darauf schon hingewiesen, indem man zuerst — ganz entgegen der Erwartung — mehr statt weniger Dampf brauchte, als man versuchte, auf dem von Carnot vorgezeichneten Wege der Erweiterung der Temperaturgrenzen im Arbeitsprozess durch Erhöhung der Kesselspannung und Verstärkung der Expansion im Dampfzylinder voran zu schreiten.

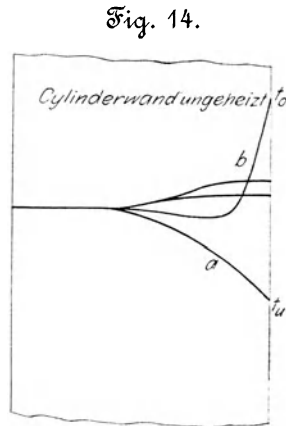
Es gab Maschinen, welche mehr als das Doppelte derjenigen Dampfmenge verbrauchten, mit der sie nach der Rechnung hätten auskommen sollen, und ein so beträchtlicher Mehrverbrauch konnte nicht auf Gangwerkreibung, Diagrammängel oder Wärmestrahlung aus der Maschine zurückgeführt werden.

Dieser bedeutende Verlust ist die Folge davon, dass wir die Dampfzylinder aus Gründen der Festigkeit und Dauerhaftigkeit aus Metall herstellen müssen. Metall ist ein guter Wärmeleiter, und es stellt sich ein Austausch von Wärme zwischen Dampf und Zylinderwand ein, welcher eine

wesentlich schlechtere Ausnutzbarkeit der Dampfwärme bedingt, als sie nach den früheren Betrachtungen und den Figuren 9 bis 11 eintreten müsste.

Der frisch eingelassene Dampf trifft im Cylinder Wand-schichten an, die unmittelbar vorher mit dem Auspuffdampf oder mit dem noch kälteren Kondensator in Verbindung ge-standen haben. Der gesättigte Dampf enthält gerade so viel Wärme, dass er sich als Dampf halten kann. Durch die Be-rührung mit der kalten Wand kühlt sich der Dampf ab, und da er gesättigt ist, muss sich ein Teil von ihm konden-siren; es bildet sich Tau auf der Cylinderwand. Wenn dann der Dampf expandirt, wird er noch weiter feucht, da seine latente Wärme zur Arbeitsleistung herangeholt wird, was natürlich eine erneute Bildung von Wasserdampf zur Folge hat.

In Fig. 14 ist ein herausgebrochenes Stück der Cylinderwand dargestellt, das links von der Luft, rechts vom Dampf umspült wird. Denkt man in die Cylinderwand Bohrungen von verschiedener Tiefe von der Außenseite hereingebracht und die Temperatur im Boden der verschiedenen Bohrlöcher abgelesen, so würde man als Temperaturkurve etwa die mit *a* be-zeichnete Linie erhalten, wenn man die unmittelbar vor dem Eintritt des frischen Dampfes abgelesenen Temperaturen zeichne-risch auftrüge. Kurze Zeit nach Beginn des Einströmens wird man etwa die mit *b* bezeich-nete Temperaturkurve erhalten. Die Wand hat einen größeren Wärmehalt, welcher aus dem frischen Dampf bezogen worden ist.



In dem Maße, wie die Expansion des Dampfes fort-schreitet und damit die Temperatur des Dampfes sinkt, lässt das Eindringen der Wärme aus dem Dampf in die Cylinderwand nach. Gegen das Ende der Expansion wird es möglich sein, dass die Wandtemperatur höher ist als die Dampftemperatur, sodass nunmehr ein Teil der Wärme wieder aus der Wand in den Dampf zurückströmt.

Wenn dieses Zurückströmen noch vor dem Ende der Expansion stattfindet, so kann es die Diagrammfläche noch

günstig beeinflussen, indem es die Expansionslinie im Dampfdiagramm in die Höhe hebt. Während des Auspuffes ist aber die Wandtemperatur bedeutend höher als die Dampftemperatur, und es wird innerhalb dieses Zeitraumes der Rest der anfänglich eingedrungenen Wärme aus der Wand wieder in den Dampf zurücktreten. Das Heizen des abziehenden Dampfes bringt keinen Vorteil für das Diagramm der Maschine. Die in den abziehenden Dampf übertretende Wärme ist gerade so gut verloren, als wäre sie unmittelbar ins Freie ausgestrahlt worden.

Die Art und die Gröfse des Arbeitsverlustes, der durch den Wärmeaustausch zwischen Dampf und Cylinderwand her-

Fig. 15.

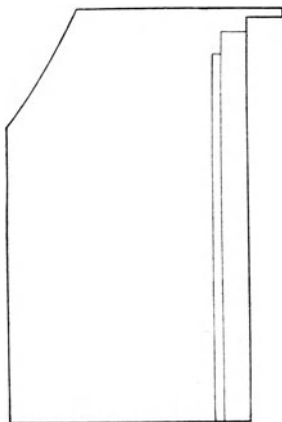
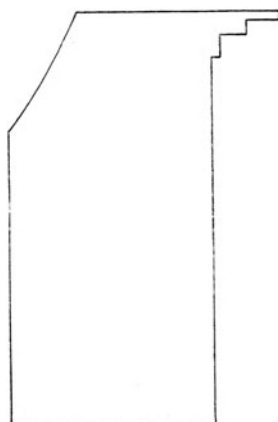


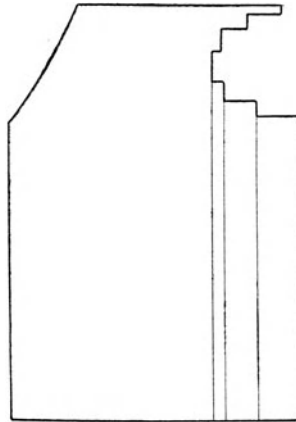
Fig. 16.



beigeführt wird, lässt sich sehr gut mit unserem Wärmebild aus Fig. 6 veranschaulichen. Wenn Wärme aus dem Dampf austritt, so äußert sich dies im Bilde dadurch, dass ein Teil der Platte wegfällt. Zuerst kommt ein großes Stück in Wegfall, da anfänglich der Temperaturunterschied zwischen Dampf und Wand groß ist und die Wärme heftig überströmt. Nach Wegfall dieses ersten Stückes habe die Platte die Gestalt der Figur 15. Je kleiner der Temperaturunterschied zwischen Dampf und Wand durch das Fortschreiten der Expansion des Dampfes wird, um so kleiner wird im Bilde der in Wegfall kommende Teil der Wärmeplatte. In dem Augenblick, in welchem Dampf und Wand die gleiche Temperatur

haben, wird für kurze Zeit kein Austausch stattfinden. Diesen Augenblick und Wärmezustand veranschaulicht Fig. 16. Sinkt die Temperatur des expandirenden Dampfes noch weiter, so beginnt das Rückströmen der Wärme aus der Wand in den Dampf; die Platte, welche die Wärme darstellt, bekommt einen Zuwachs, zuerst einen kleinen, dann einen größeren. Fig. 17 stellt den Wärmezustand am Ende der Expansion dar, unter der — praktisch wohl nicht erfüllten — Annahme, dass alle anfänglich in die Wand eingetretene

Fig. 17.



Wärme auch wieder in den Dampf zurückgeströmt sei. Die Fläche der Platte in Fig. 17 ist dann wieder genau so groß, wie sie im Anfang in Fig. 6, war. Denken wir uns die Platte wieder mit Silberrollen bedeckt, so würden wir mit dem ganzen Silber aus Fig. 6 auch Fig. 17 vollständig bedecken können; die einzelnen Silberstücke sind nur anders gruppiert. Zieht man nun die Scheidewand zwischen dem ausnutzbaren und dem nicht ausnutzbaren Teil der Wärme nach Fig. 18, so erkennt man durch Vergleich mit Fig. 9, dass der erstere abgenommen, der zweite in gleichem Maße zugenommen hat. Die Wärme hat durch den Austausch zwischen Dampf und Wand an Wert für die Umwandlung in Arbeit verloren, weil sie mit höherer Intensität in der Bewegung der Aetherteile aus dem Dampf in die Wand eindrang



und mit geringerer Intensität in der Bewegung in den Dampf zurückkehrte (vergl. Fig. 4).

Es leuchtet sofort ein, dass der eben besprochene Wärmeaustausch um so größer sein wird, je weiter der Temperaturunterschied zwischen dem frischen Dampf und dem Kondensator oder dem Auspuffdampf ist, und dass die ersten Bestrebungen, welche zur besseren Ausnutzung der Dampfenergie durch Erhöhung des Dampfdruckes und durch verstärkte Expansion gemacht wurden, ohne den beabsichtigten Erfolg sein konnten, weil der Ausfall an Arbeitsfläche nach

Fig. 18.

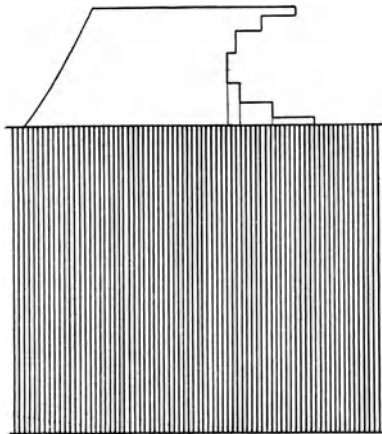


Fig. 18 größer sein konnte als der Gewinn, den man etwa nach Fig. 9 gegenüber Fig. 11 erhielt. Ein amerikanischer Ingenieur, Isherwood, wies anfangs der 60er Jahre nach, dass in den von ihm untersuchten Maschinen 50 bis 60 vH des eingeführten Dampfes niedergeschlagen wurden. In Fig. 16 sind etwa 25 vH des Dampfes in Wasser verwandelt.

Um also eine möglichst gute Ausnutzung der Wärme des Dampfes durch die Maschine herbeizuführen, ist zweierlei notwendig:

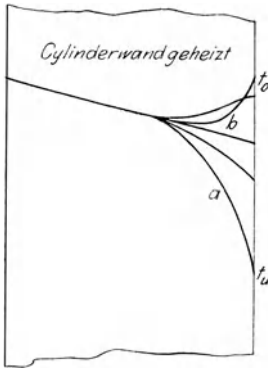
- 1) Das Temperaturgefälle des Prozesses ist durch Anwendung hoher Dampfspannung und weitgetriebener Expansion zu verbessern;

2) die Beeinträchtigung des Prozesses durch die schädliche Einwirkung der metallischen Cylinderwände auf den Dampf ist möglichst zu vermeiden. Dieser Punkt ist ebenso wichtig wie der erstgenannte.

Es giebt nun drei Mittel, um den letztgenannten Zweck zu erreichen:

- 1) die Heizung der Cylinderwände von aussen;
- 2) die Verteilung der Gesamtexpansion auf mehrere Cylinder;
- 3) die Ueberhitzung des Dampfes vor Eintritt in den Cylinder.

Fig. 19.



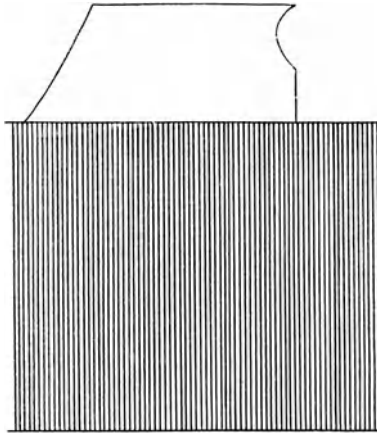
Durch Heizung der Cylinderwände kann die Temperatur der Außenhaut des Cylinders auf die Temperatur des Frischdampfes gebracht werden. Dadurch wird die aus dem Arbeitsdampf in die Innenhaut des Cylinders eindringende Wärme zurückgestaut, sodass die Temperaturschwankungen in der metallischen Cylinderwand auf eine dünnere Schicht eingeschränkt werden, wie Fig. 19 zeigt. Die Innenhaut nimmt auch beim geheizten Cylinder unmittelbar vor dem Eintritt des frischen Dampfes die Temperatur des Auspuffdampfes oder des Kondensators an und wird nach erfolgtem Eintritt des frischen Dampfes

unter Niederschlag von Tau aus diesem Dampf geheizt. Die Temperaturkurve  $a$ , welche vor dem Eintritt des frischen Dampfes in den Cylinder abgelesen wird, geht in die Temperaturkurve  $b$  nach Beginn des Eintrittes über. Der heisse Heizmanteldampf staut aber diese von innen kommende Wärme zurück, sodass die Umkehr der Wärme aus der Wand in den Dampf viel eher beginnt als bei ungeheiztem Cylinder, zum großen Teil noch während der Expansion des frischen Dampfes. Wenn die Heizung sehr kräftig ist, kann noch vor Beginn des Auspuffes aller Tau verdampft und die Innenhaut wieder getrocknet sein, wodurch der Wärmeaustausch erschwert und das Heizen des ausblasenden Dampfes behindert wird. Der Wärmevorrat der Wand bleibt dann unvermindert, und er braucht nicht aus dem frischen Arbeitsdampf oder aus dem Heizmanteldampf ergänzt zu werden.

In dem Wärmebild stellen sich diese Vorgänge so dar, dass der in Wegfall kommende Plattenteil viel kleiner ist als das beim ungeheizten Cylinder gefundene Fehlstück, wie Fig. 20 zeigt, in welcher ein ununterbrochenes Hin- und Herfließen der Wärme zwischen Dampf und Wand angenommen ist, nicht ein sprungweises, wie in Fig. 18; dementsprechend ist das Fehlstück von stetigen, nicht von treppenförmigen Begrenzungslinien eingeschlossen.

Wenn die Heizung der Cylinderwand genügend kräftig ist, so kann Wärme aus dem Heizdampf in den Arbeitsdampf

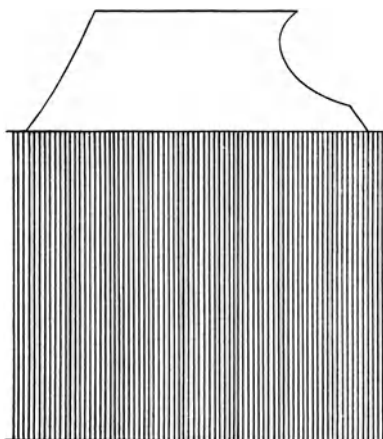
Fig. 20.



übergehen, wobei der Tau der Wand ganz oder teilweise und auch die durch die Expansionsarbeit veranlasste, im Dampf schwebende Feuchtigkeit wieder verdampft wird. Es wirkt dann der Cylinder wie ein Ueberhitzer oder Dampftrockner, der mit Kesseldampf geheizt wird. Im Wärmebild erscheint ein Zuwachs an Fläche. Fig. 7 zeigt den — praktisch wohl nicht erfüllbaren — Fall, dass aller Tau und alle Feuchtigkeit wieder verdampft worden sind, sodass unmittelbar vor dem Auspuff gerade so viel gesättigter Dampf im Cylinder enthalten ist wie unmittelbar nach beendigter Füllung. Die zusätzliche Platte in Fig. 7 stellt gegenüber Fig. 6 den Wärmebetrag dar, welcher, dem Heizdampf entstammend, durch die Cylinderwand hindurch dem Arbeitsdampf zugeleitet worden ist, um diesen Zustand am Ende der Expansionsperiode herbeizu-

führen<sup>1)</sup>. Die aus dem Heizmantel stammende Wärme wird aber bei der Umwandlung in Arbeit wesentlich schlechter ausgenutzt als die mit dem Frischdampf in den Cylinder gelangende Wärme, wie eine Betrachtung der Figur 21 zeigt, aus der ersichtlich ist, dass der über den Vorhang hinausragende Teil der die Heizungs-Wärme darstellenden zusätzlichen Platte sehr klein ist. Es ist daher ausdrücklich darauf

Fig. 21.



aufmerksam zu machen, dass das Ueberströmen von Wärme aus dem Heizdampf in den Arbeitsdampf als Nebenwirkung neben der Zurückstauung der aus dem Arbeitsdampf in die Cylinderwand eintretenden Wärme auftritt, dass dieses Ueberströmen aber niemals mit Absicht herbeigeführt werden soll. Der Heizmantel würde am günstigsten wirken, wenn er nur die aus dem Arbeitsdampf stammende Wärme zurückstaute, und diejenige Heizung ist die beste, welche diesen Zweck mit einem möglichst geringen Uebertritt von Wärme aus dem Heizdampf in den Arbeitsdampf erreicht.

Es ist natürlich noch besser, anstatt die eingetretene Wärme

<sup>1)</sup> vergl. Fig. 8. Der vom horizontalen Schenkel des Winkelmaßes bedeckte Streifen der Platte der Fig. 6 ist an Inhalt annähernd gleich dem vom senkrechten Schenkel des Winkelmaßes frei gelassenen Streifen der zusätzlichen Platte der Fig. 7. Bei einer Arbeitsleistung, die der Abtragung des erstgenannten Streifens entspricht, bildet sich Wasser aus dem Arbeitsdampf in einer Menge, die durch eine dem zweitgenannten Streifen entsprechende Wärme wieder verdampft werden kann.

zurückzustauen, dafür zu sorgen, dass keine Wärme in die Cylinderwand eintritt. Diesem Ziel wird man sich um so leichter annähern, je geringer die Temperaturunterschiede zwischen Dampf und Cylinderwand sind. Mit Zunahme der Expansion nimmt die Temperatur des Dampfes ab. Verteilt man die gesamte Expansion auf mehrere hinter einander geschaltete Arbeitscylinder, so verteilt man auch den Temperaturabstieg auf diese Cylinder und erreicht dadurch, dass die Grenztemperaturen in jeder einzelnen Cylinderwand näher bei der mittleren Temperatur derselben liegen, als dies bei einem einzigen Cylinder der Fall ist, in welchem die ganze Expansion stattfindet. Durch die Verkleinerung des Temperaturgefälles wird natürlich die Lebhaftigkeit des Wärmeaustausches in jedem einzelnen Cylinder ganz bedeutend vermindert.

Durch diese Unregsammachung der Cylinderwände war es erst möglich, den Vorteil praktisch auszunutzen, der nach dem zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie in der Erweiterung der Temperaturgrenzen des Arbeitsprozesses erreichbar ist. Bei der alten Eincylindermaschine verschlang bei weit getriebener Expansion die durch Vergrößerung des Temperaturgefälles im Cylinder erhöhte Oberflächenwirkung der metallischen Wände mehr Arbeit, als die Verstärkung der Expansion aus dem Dampf herausholte, sodass man lieber beim kleineren Druck und der größeren Füllung blieb, welche konstruktive Vorteile beim Bau des Gangwerkes und der Steuerung und Erleichterungen beim Betrieb der Maschine boten. Als man aber das Prinzip der mehrstufigen Expansion als richtig erkannt hatte und große wirtschaftliche Erfolge durch Verminderung der Wandwirkung erzielte, erhöhte man die Dampfspannung immer mehr und verteilte die Expansion anfänglich auf zwei, später auf drei und mehr Cylinder.

Zur richtigen Würdigung der Verbundmaschinen ist im Auge zu behalten, dass ihre Daseinsberechtigung vor allem auf der Verminderung der schädlichen Oberflächenwirkung der Cylinderwände beruht, dass aber eine Ersparnis an Dampf durch sie nicht möglich ist, wenn der Betrieb der Maschine den Eintritt einer schädlichen Oberflächenwirkung trotz der Hintereinanderschaltung der Cylinder unvermeidlich macht.

Ein Beispiel kann dies am besten erläutern. Eine Schnellzuglokomotive ist mehrere Stunden hinter einander im Betriebe. Es wird sich ein Beharrungszustand in der Durchwärmung der Maschinenteile, insbesondere der Cylinder einstellen, und eine Verteilung des Temperaturgefälles auf die beiden Treibcylinder der Lokomotiven wird

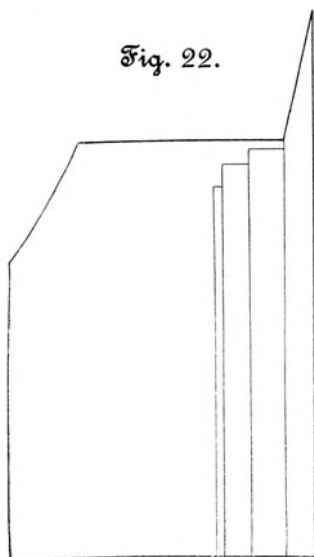
vorteilhaft wirken. Die Güterzuglokomotive hat häufig Stillstand zu erwarten, auch große Belastungsänderungen zu erdulden, indem sie bald einen schweren Zug eine steile Rampe heraufziehen, bald mit wenig Wagen im Bahnhof rangieren muss. Der Gewinn, welcher durch die Verbundwirkung in der Dampfmaschine auf der Strecke erzielt wird, wird im Bahnhof wieder aufgezehrt werden. Den größten Schwankungen in den Cylindertemperaturen ist die Verschiebelokomotive ausgesetzt. Es wechseln große und kleine Belastungen, nahe und weite Fahrten, kurze und lange Stillstände mit ihren hohen und niedrigen Temperaturen in der Cylinderwand in buntester Reihenfolge mit einander ab, und die Verbundwirkung könnte gar nicht zur Geltung kommen. Dagegen sind bei den Betriebsmaschinen für Spinnereien und Webereien die Vorbedingungen für die Verbundmaschinen in bester Weise vorhanden: die Maschinen laufen ohne Stillstand mit fast gleichbleibender Belastung.

Die mehrstufige Expansion wurde zuerst von den Schiffsmaschinenbauern allgemein angewandt, für welche eine Kohlenersparnis beim Wettbewerb in der Länge der Fahrwege und der Kürze der Fahrdauer eine erhöhte Bedeutung hatte. Man ist heute bei einer Erhöhung des Kesseldruckes auf 10 bis 12 at im Landmaschinenbau und auf 14 bis 16 at im Schiffsmaschinenbau angelangt, bei diesen Spannungen das Temperaturgefälle auf 3 und 4 Stufen verteilend. Bei den heutigen Dampfmaschinen wachsen die Schwierigkeiten im Bau und Betrieb durch eine weitere Drucksteigerung außerordentlich schnell an, während sich der erzielbare Gewinn nur langsam vermehrt, sodass wohl eine weitere Steigerung der Arbeitsdrücke in absehbarer Zeit nicht zu erwarten ist.

Während man bei den Verbundmaschinen durch Beeinflussung der Wandtemperatur die schädliche Oberflächenwirkung mildern will, strebt man bei dem dritten und zuletzt in Anwendung gekommenen Mittel der besseren Wärmeverwertung durch Beeinflussung des Dampfes selbst, nämlich durch Ueberhitzung desselben, zum gleichen Ziel.

So lange der Dampf in Verbindung mit dem Kessel ist, bleibt er gesättigt, und alle Wärme, die durch das Kesselwasser dringt, dient nur dazu, weiteren Dampf zu bilden, nicht aber dazu, die Temperatur des Dampfes oder die von einer bestimmten Menge eingeschlossene Wärmemenge zu erhöhen. Wenn aber der Dampf nach Austritt aus dem Kessel mit einer trockenen Heizfläche in Berührung kommt, so kann er weiter Wärme in sich aufnehmen, wobei die Temperatur

steigt, ohne dass der Dampfdruck zunimmt. Es ist klar, dass man solchem überhitzten Dampf eine Menge Wärme wieder entziehen kann, ohne dass er Tau absetzt und feucht wird; dann erst, wenn ihm sämtliche Ueberhitzungswärme entzogen ist, kommt der Dampf wieder in den Zustand der Sättigung mit der Neigung zur Taubildung zurück. Wenn man überhitzten Dampf in den Cylinder einlässt und mit Metallwänden in Berührung bringt, so wird sich ohne weiteres



Zuthun von unserer Seite kein Tau auf den Cylinderwänden absetzen, auch wenn dem Dampf Wärme durch die Wand entzogen wird, abgesehen davon, dass diese Entziehung viel schwächer sein wird, weil der überhitzte Dampf ein schlechterer Wärmeleiter als der gesättigte Dampf ist. Die Verschlechterung der Dampfausnutzung — soweit sie auf der schädlichen Oberflächenwirkung der Cylinderwände beruht — wird daher bei überhitztem Dampf ohne weiteres vermindert und eine so starke Annäherung an die Ausnutzung bei einer vollkommenen Dampfmaschine erreicht, wie sie bei gesättigtem Dampf nur bei geheizten Cylindern und mehrstufiger Expansion, d. i. Einhaltung kleiner Temperaturunterschiede in der Cylinderwand, erzielbar ist.

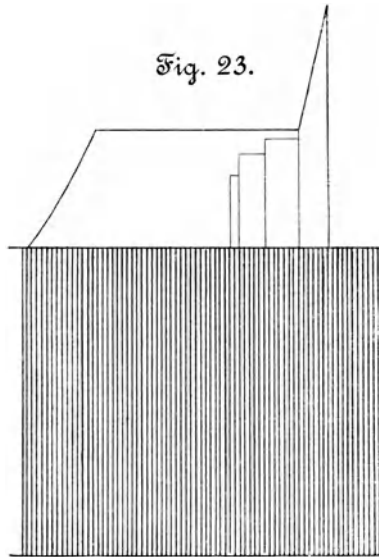
Das Wärmebild der vollkommenen Dampfmaschine ist daneben auch etwas verändert gegenüber dem bisher betrachteten, für gesättigten Dampf geltenden Modell. Die dem Dampf nach dem Verlassen des Kessels in dem Ueberhitzer zugeführte Wärme stellt sich nach Fig. 22 als ein Zuwachs der die Wärme veranschaulichenden Platte dar. Die obere Begrenzungslinie der zusätzlichen Platte ist eine ansteigende Linie, ähnlich der oberen Begrenzung bei dem Teil der Platte, welcher die Flüssigkeitswärme des Dampfes darstellt, weil die Temperatur des Dampfes bei der Ueberhitzung entsprechend der Wärmezufuhr zunimmt. Fig. 22 verkörpert die Wärme, welche in 1 kg auf  $300^{\circ}\text{C}$  überhitzten Dampfes von 6 at enthalten ist. Denkt man sich diese zusätzliche Platte wieder mit Silberrollen bedeckt, die von unten anfangend bis zur oberen Begrenzungslinie hinanreichen, und zieht man nach Fig. 23 die Scheidewand zwischen dem ausnutzbaren und dem unausnutzbaren Teil der Silberrollen, so erkennt man, dass die Ausnutzung der Ueberhitzerwärme besser ist als die Ausnutzung des übrigen Wärmeinhaltes in dem der Maschine zugeführten Dampf. Die zusätzliche Platte ragt viel höher über den Vorhang hinaus als die übrige Platte. Nach Fig. 23 wird z. B. die Flüssigkeitswärme mit 15 vH, die latente Wärme mit 28 vH, die Ueberhitzerwärme mit 38 vH ausgenutzt. Infolgedessen gestaltet sich bei der vollkommenen Maschine der Prozess günstiger, wenn sie mit überhitztem Dampf arbeitet, als wenn sie mit gesättigtem Dampf arbeitet. Allerdings fällt der Unterschied nur dann einigermaßen groß aus, wenn der Anteil der Ueberhitzungswärme an der Gesamtwärme des Dampfes beträchtlich ist und sich dementsprechend der höhere Prozentsatz in der Ausnutzbarkeit der Wärme auf einen großen Teil der Gesamtwärme bezieht. In Fig. 23 ist die Gesamtausnutzung der Wärme auf 27,6 vH gestiegen gegenüber 25 vH in Fig. 9.

Es ist angebracht, hier auf die Ausnutzung der Wärme hinzuweisen, die durch die Cylinderheizung nach Fig. 7 dem Dampf zugeführt wird. Diese Wärmezufuhr findet auch nach Art der Zufuhr im Ueberhitzer statt, nachdem der Dampf den Kessel verlassen hat; sie wirkt aber auf den expandierenden und allmählich in der Temperatur absteigenden Dampf ein, sodass die obere Begrenzungslinie der Wärmeplatte, welche der Cylinderheizung entspricht, einen absteigenden Verlauf hat. Im Gegensatz zu der Wärme, die bei der Ueberhitzung zugeführt wird, hat die bei der Cylinderheizung zugeführte Wärme eine schlechte Ausnutzung. In der vollkommenen Maschine



wird sie in dem durch Fig. 7 dargestellten Falle nur mit 14,2 vH ausgenutzt, während in Fig. 9 die Ausnutzung der mit dem Frischdampf in die Maschine gelangenden Wärme 25 vH beträgt.

In Fig. 12 sind die Wärmeeinheiten verzeichnet, welche man für 1 PS<sub>r</sub>-st in der vollkommenen, d. i. ohne Strahlungsverlust, ohne Drosselung, ohne Spannungssprung, ohne Wandwirkung, ohne Gangwerkreibung arbeitenden Maschine erhält, bei Verwendung von Dampf, der auf 300° C überhitzt worden ist. Die Betrachtung der für überhitzten Dampf geltenden Kurven ergibt, dass der Unterschied im Wärme- und Kohlenverbrauch der vollkommenen Maschine gegenüber



gesättigtem Dampf nur bei kleinen Dampfdrücken wesentlich ist, mit Erhöhung des Dampfdruckes aber immer mehr verschwindet, namentlich bei Anwendung der Kondensation. Doch ist zu beachten, dass die für die vollkommenen Maschinen abgeleiteten Kurven der Figur 12 die Bedeutung der Ueberhitzung gegenüber dem gesättigten Dampf in einem zu ungünstigen Licht erscheinen lassen. Ihre wirkliche Bedeutung würde erst erkannt werden, wenn man die Kurve des Kohlenverbrauches einzeichnete, die in den ohne Ueberhitzung arbeitenden wirklichen Eincylinder- oder Verbundmaschinen

erreicht wird. Beim Vergleich der beiden Arbeitsweisen bleibt eben zu beachten, dass eine bessere Wärmeausnutzung durch die Dampfmaschine möglich ist sowohl durch die Anwendung eines theoretisch vollkommeneren Arbeitsprozesses mit praktisch geringerer Annäherung an die Vollkommenheit, z. B. durch Verwendung weitgetriebener Expansion bei stärkerer Wandwirkung, als auch durch Anwendung eines theoretisch weniger vollkommenen Arbeitsprozesses mit praktisch größerer Annäherung an die Vollkommenheit, z. B. durch schwächere Expansion mit geringer Wandwirkung. Es muss sich der Vergleich zwischen gesättigtem und überhitztem Dampf daher sowohl auf die Güte des vollkommenen Prozesses als auch auf die Annäherung des wirklichen Prozesses an diesen erstrecken. Bei beiden Dampfarten lässt sich je nach Bedarf das eine oder das andere verbessern. Es wird, um mit Carnot zu sprechen, darauf ankommen, »mit dem leichtesten Hilfsmittel zu dem besten Ergebnis zu gelangen«. Die Eintragung einer Kurve in die Figuren 12 und 13, welche dem wirklichen Kohlen- oder Dampfverbrauch entspricht, ist aber wegen der übergroßen Mannigfaltigkeit der wirklichen Betriebe unthunlich. Bei den besten Maschinen hat man sich zur Zeit auf etwa 25 vH dem für die vollkommene Maschine geltenden Wärmeverbrauch genähert.

Das Wärmebild in Fig. 22 macht uns noch einen weiteren Punkt klar, der beim Betriebe mit überhitztem Dampf von Wichtigkeit ist. Die Wärmemengen, welche durch die Platten in Fig. 6 und 22 körperlich dargestellt werden, beziehen sich auf dieselbe Dampfmenge, etwa auf 1 kg Dampf. Nun ist es klar, und der Vergleich der Figuren 6 und 22 zeigt es, dass wir durch die Ueberhitzung jedes Kilogramm Dampf zum Träger einer größeren Menge von Wärme machen, als wenn wir es gesättigt lassen, und dass wir die Leistung von 1 kg Dampf selbst dann erhöhen, und demnach den Dampfverbrauch auch dann vermindern, wenn wir die Wärme in dem überhitzten Dampf nicht besser ausnutzen als im gesättigten Dampf. Ein Vergleich der Kurven des Dampfverbrauchs bei überhitztem und bei gesättigtem Dampf für 1 PS-st nach Fig. 13 mit den Kurven des Kohlenverbrauchs nach Fig. 12 ist sehr lehrreich. Der Unterschied in den für den Dampfverbrauch abgeleiteten Kurven ist bei dem überhitzten Dampf gegenüber gesättigtem Dampf viel größer als der Unterschied in den für den Kohlenverbrauch geltenden Kurven, und auf den letzteren kommt es natürlich in letzter Linie an.

Während bei gesättigtem Dampf der Dampfverbrauch ohne weiteres ein Maßstab für den Kohlenverbrauch ist, weil nach Fig. 6 und 8 fast die gleiche Wärmemenge gebraucht wird, um 1 kg gesättigten Dampf bei hohem oder niedrigem Druck zu erzeugen, ist dies bei überhitztem Dampf nicht mehr der Fall, weil je nach dem Druck des Dampfes und je nach dem Grad der Ueberhitzung jedem Kilogramm Dampf mehr oder weniger Wärme zugeführt werden muss.

Diese durch die Ueberhitzung herbeigeführte Verminderung des Dampfverbrauches hat aber, abgesehen von einer etwaigen Kohlenersparnis, insoweit eine besondere Bedeutung, als der Bedarf an Kesselfläche dadurch verringert wird. Der gesamte Wärmebedarf wird bei Anwendung der Ueberhitzung dem Dampf zu einem Teil durch die Ueberhitzerfläche übermittelt, die gewissermaßen an die Stelle der Kesselheizfläche tritt. Durch welche Art von Fläche die Wärme in den Dampf geschickt wird, ist für den späteren Arbeitsvorgang nur in zweiter Linie wichtig; Hauptsache für diesen ist es, dass ihm die Wärme durch den Dampf zugetragen wird. Eine ähnliche Bedeutung wie die Ueberhitzer haben die sogen. Economiser für die Uebertragung der Wärme aus den Kesselgasen in den Dampf. In den Economisern wird die im späteren Arbeitsdampf enthaltene Flüssigkeitswärme an das Speisewasser übertragen und damit gleichfalls der Bedarf an eigentlicher Kesselfläche verringert. Das Wärmebild in Fig. 22 zeigt anschaulich, wie groß die einzelnen Beträge sind, welche durch den Ueberhitzer und welche durch den Economiser übertragen werden können. Bei einem Dampfdruck von 6 at und einer Ueberhitzung auf  $300^{\circ}$  C können 23 vH der in Fig. 22 dargestellten Wärme durch den Economiser und 7 vH durch den Ueberhitzer aufgebracht werden, sodass entweder die Kesselfläche um 30 vH verkleinert oder bei vorhandenem Kessel die Maschinenleistung um 30 vH gesteigert werden kann gegenüber einer Anlage, die ohne Economiser und ohne Ueberhitzer arbeitet.

Zur richtigen Abschätzung der aus dem Wärmebild abgeleiteten, für eine vollkommene Maschine geltenden Ergebnisse in den Figuren 12 und 13 ist bei den wirklichen Maschinen wiederum zu betonen, dass, abgesehen von Strahlung, Drosselung, Undichtheit usw., der Dampf- und Kohlenverbrauch durch die schädliche Einwirkung der Oberflächen des Cylinders erhöht wird, weil auch bei überhitztem Dampf ein Wärmeaustausch zwischen Dampf und Wand stattfindet. Dieser Wärmeaustausch ist allerdings

wesentlich geringer, als er bei gesättigtem Dampf und gleichem Temperaturgefälle in der Cylinderwand auftreten würde.

Die Ueberlegenheit des überhitzten Dampfes in seinem Verhalten gegen die Cylinderwand gegenüber dem gesättigten Dampf ist aber umso kleiner, je mehr man durch Anwendung geeigneter Mittel beim gesättigten Dampf dafür gesorgt hat, dass der Wärmeaustausch vermindert ist, z. B. durch Heizung der Cylinderwände, durch Schaffung kleiner Temperaturgefälle in den Cylinderwänden infolge Verteilung der Expansion auf mehrere Cylinder. Die Dampfüberhitzung ist daher am lohnendsten gegenüber einer ungemantelten Ein-cylinder-Kondensationsmaschine mit starker Expansion. Gegenüber Verbund- und Dreicylindermaschinen ist der Vorteil geringer, doch kann die Ueberhitzung die Verbundwirkung ersetzen. Namentlich hat sich eine Ueberhitzung des Aufnehmerdampfes als wertvoll erwiesen, wie dies nach den obigen Betrachtungen ja auch als ganz natürlich erscheint. Man hat bei zweistufiger Expansion mit überhitztem Dampf mindestens ebenso günstig gearbeitet wie bei Dreicylindermaschinen mit gesättigtem Dampf. In der Vereinigung beider Arbeitsweisen, in der Verwendung überhitzten Dampfes in mehrstufiger Expansion ist das Mittel gegeben, das neutrale Verhalten zwischen Dampf und Cylinderwand soweit zu treiben, wie dies in praktischer Weise möglich ist, und dadurch eine möglichst starke Annäherung an die vollkommene Maschine und eine entsprechende Verminderung des Kohlenverbrauches auch bei weitgetriebener Expansion zu erreichen.

Während die Verbundwirkung allein in Dreicylindermaschinen bei gesättigtem Dampf von 12 at Kesseldruck, Expansion bis auf 0,5 at und 0,1 at Kondensatordruck etwa 15 vH der Energie des Dampfes in Nutzarbeit umwandelt, kann die Ausnutzung durch Hinzufügung der Ueberhitzung auf 300° bis etwa 17 vH gesteigert werden. Rechnet man noch die Verluste im Kessel hinzu, so kann die Ausnutzung der Energie der Kohle auf etwa 12 bzw. 13,5 vH gebracht werden. Eine Ueberschreitung dieser Zahlen ist bei den jetzt üblichen Dampfmaschinen und Dampfkesseln nicht leicht möglich, wohl aber bei der Gasmaschine in Verbindung mit Gasgeneratoren, die indes heute in der konstruktiven Durchbildung noch nicht so weit gediehen sind, dass die großen Leistungen mit derselben Sicherheit erreicht werden können, wie bei den Dampfmaschinen.

Nachdem nun erkannt worden ist, welches die Ziele sind, die wir in der Wärmeausnutzung durch die Dampfmaschine erstreben können, und welches die Mittel sind, mit deren Hülfe wir uns diesen Zielen nähern können, ist es notwendig, zu untersuchen, welche sonstigen Forderungen die praktische Durchführung der als richtig erkannten Grundsätze, und welche sonstigen Umstände die praktische Anwendung der als wirksam erkannten Mittel mit sich bringt.

Die Dampfmaschine wird niemals um ihrer selbst willen betrieben; sie ist stets Diene:in in einem gröfseren Fabrikwesen, und es ist notwendig, dass wir alle Mafsnahmen, die wir der Dampfmaschine wegen treffen wollen, mit Rücksicht auf die Gesamtanlage prüfen. Wie in der großen Natur, so giebt es auch in dem verwickelten wirtschaftlichen Leben kein einziges Prinzip, das sich einseitig streng durchführen lässt. Es sind immer mehrere Bedingungen zugleich zu erfüllen, und es treten häufig Forderungen zusammen auf, die sich widersprechen, sodass vermittelt und je nach Lage des Falles mehr oder weniger von den einzeln als richtig erkannten Grundsätzen abgewichen werden muss. Es ist Sache der geschulten Erfahrung oder des Genies, für jeden gegebenen Fall das Beste und zugleich am leichtesten Durchführbare herauszufinden; aber immer bleibt zu beachten, dass der Erfolg niemals an einer einzigen, noch so geistreichen Einrichtung hängt, sondern an verschiedene Bedingungen geknüpft ist, und dass die Art und Weise entscheidend ist, wie die einzelnen Bedingungen durch die Anlage erfüllt oder durch die mit deren Leitung betrauten Menschen erfasst und befolgt werden.

Bei jedem Wärmevorgang ist vor allem dafür zu sorgen, dass möglichst wenig Wärme nach aufsen verloren geht. Die Wärme ist außerordentlich flüchtig und beweglich und hat das größte Bestreben, sich allen Körpern mitzuteilen, natürlich auf unsere Kosten. Die Dampfleitungen und die vom Arbeitsdampf bespülten Maschinenteile müssen mit gutem Wärmeschutz versehen sein, und es ist falsche Sparsamkeit, daran zu sparen, da der Verlust ein doppelter ist. Einmal geht die Wärme aus dem Frischdampf zu einer Zeit weg, wo sie noch hohes Temperaturgefälle hat, also noch gut ausnutzbar ist. Dann aber wird der Dampf in dem Mafse feucht, in dem er Wärme verliert, und die Zunahme an Feuchtigkeit erleichtert der Wärme das Wandern zwischen Dampf und Wand und erhöht die schädliche Oberflächenwirkung im Cylinder.

Weiter ist durch Einschaltung guter Dampftrockner oder Wasserabscheider dafür zu sorgen, dass die unvermeidliche Feuchtigkeit aus dem Dampf herauskommt, ehe er in den Cylinder eintritt. Das gilt ganz besonders für schwach belastete Rohrleitungen, in denen sich reichlich Wasser niederschlägt, welches die Oberflächenwirkung zwischen Dampf und Cylinderwand bedeutend erhöht.

Häufig ist der Fehler zu beobachten, dass der Schieberkasten nicht umhüllt ist, was besonders schlimm ist, weil der Schieberkasten meist große Strahlungsflächen hat und weil der darin, also unmittelbar vor dem Eintritt in den Cylinder feucht gewordene Dampf nicht mehr getrocknet werden kann, was den Kreisprozess der Maschine verschlechtert.

Rohrleitungen für überhitzten Dampf müssen wegen der hohen Temperatur besonders gut isolirt werden. Doch hat man die Erfahrung gemacht, dass diese Rohrleitungen besonders gut dicht halten, weil sie viel gleichmäßiger erwärmt werden als Rohre, die mit gesättigtem Dampf gefüllt sind. Es ist das die Folge davon, dass sich kein Wasser in ihnen niederschlägt und im unteren Scheitel ansammelt. Bei langen Dampfleitungen wendet man oft eine schwache Dampfüberhitzung von etwa  $50^{\circ}$  C an, auch wenn man mit gesättigtem Dampf arbeiten will, um den Dampf trocken an die Maschine heranzubringen.

Von den Mitteln zur Erweiterung der Temperaturgrenzen im Kreisprozess der Dampfmaschine ist praktisch besonders die Herabziehung der unteren Temperatur  $T_u$  durch Anwendung der Kondensation wichtig. Ein kühl gehender Kondensator mit hohem Unterdruck bringt große Vorteile, aber fast keine Nachteile mit sich. Eine gute Kondensation ist ein bequemes und vor allem betriebsicheres Mittel, um die Güte der Maschine hinsichtlich der Umwandlung der Dampfwärme in Arbeit zu erhöhen. Die Maschinenbesitzer legen mit Recht großen Wert auf die Kondensation, besonders auch deshalb, weil der Zustand der Kondensation ein untrüglicher und schnell zu erkennender Prüfstein für die Pflichttreue und die Fassungsgebe des Maschinisten ist.

Aber trotzdem ist die Anwendung der Kondensation nicht unter allen Umständen richtig. Bei kleinen Maschinen tritt durch sie eine starke Verteuerung der Maschine ein, und es lässt sich eine Grenze aufstellen, bei der die Kosten für Verzinsung, Abschreibung und Unterhaltung der Kondensation mehr ausmachen als die Ersparnis an Kohlen. Bei großen Maschinen kann das gleiche eintreten, wenn der

Betrieb nur wenige Stunden täglich dauert, wie beispielsweise bei einer Dampfanlage für die elektrische Beleuchtung eines Theaters. Ein anderer Grund, der die Kondensation unthunlich machen kann, ist das Bedürfnis nach Heißdampf für die Fabrikanlage, wozu sich der Auspuffdampf der Dampfmaschinen sehr gut eignet. Bei einer Kondensationsmaschine muss man für die Fabrikheizung frischen Kesselampf verwenden und sein Arbeitsvermögen zumteil vernichten, um auf den für solche Heizungen beliebten niedrigen Druck zu gelangen. Bei einer Fabrikheizung mit Auspuffdampf ist die Verwendung überhitzten Dampfes angenehm und vorteilhaft. Die mit überhitztem Dampf betriebene Auspuffmaschine arbeitet sparsam und liefert dennoch feuchten Dampf an die Heizleitung ab, wie er erwünscht ist, um das Uebertreten der Wärme aus dem Dampf in die Heizkörperwände zu erleichtern. Bei Verbundmaschinen, welche mit Kondensation arbeiten, kann man recht gut dem Aufnehmer einen Teil des Dampfes für Heizzwecke entnehmen. Man nutzt dann das Arbeitsvermögen dieses Dampfes im Hochdruckzylinder aus, das man sonst durch Drosselung vernichten müsste.

Eine ganz besondere Wichtigkeit hat die Verwendung von Auspuffmaschinen in Anlagen, welche sehr viel Heißdampf brauchen, z. B. in Zuckerfabriken zum Kochen der Zuckerklösungen, in Braunkohlenbrikettfabriken zum Trocknen und Erwärmen der Kohlen vor dem Eintritt in die Pressen, in Pulverfabriken zum Erzeugen von warmem Wasser, in Ziegeleien, in Spiritusfabriken.

Die im Auspuffdampf enthaltene Wärme, der nach der Arbeitsleistung übrig gebliebene, in Fig. 10 unter dem Vorhang des Modells liegende Rest an Flüssigkeitswärme und latenter Wärme, ist wegen der genügend hohen Temperatur und der bequemen Leitbarkeit des Dampfes gut und leicht zu diesen Heizzwecken verwendbar, während die Wärme, welche in dem warmen, den Kondensator verlassenden Wasser enthalten ist, nicht mehr verwendungsfähig ist wegen der geringen Temperatur und der großen Wassermenge, auf die sie verteilt ist. Theoretisch kann die ganze Wärmemenge, die in der Figur 10 durch die unter dem Vorhang verborgenen Silberstücke dargestellt ist, an Heiz- und Kocheinrichtungen abgeliefert werden. Ein Abtragen der Silberrollen, eine Umwandlung in Arbeit, ist allerdings nicht mehr möglich, wohl aber ein Weberschieben aus dem Dampf in einen andern Körper. Geschieht dies in eine Heiz- oder Kocheinrichtung, so ist auch das für

uns eine nützliche Verwertung, und wir können dann von einer vollständigen Ausnutzung der Dampfenergie sprechen. Wir können die sämtlichen in Fig. 6 dargestellten Silberrollen verwerten, und nicht etwa nur den vierten Teil, wie in Fig. 9, oder gar nur den fünften Teil, wie in Fig. 10. Um dieses Ziel zu erreichen, müsste allerdings die Uebertragung der Wärme aus dem Dampf in die Heiz- und Kochapparate mit vollkommenen Einrichtungen geschehen, eine Annahme, die auf gleicher Stufe mit unserer bisherigen Annahme steht, dass alle über dem Vorhänge verbleibende Wärme in einer vollkommenen Maschine in Arbeit verwandelt wird. In den wirklichen Heiz- und Kocheinrichtungen treten natürlich Verluste auf, ähnlich wie in den wirklichen Maschinen Verluste gegenüber der vollkommenen Maschine entstehen.

Wenn Verwendung für den gesamten Auspuffdampf eines Werkes zu Heiz- und Kochzwecken vorhanden ist, wie z. B. in Braunkohlenbrikettfabriken, so wird nach Fig. 10 die Dampfenergie zu etwa  $\frac{1}{3}$  in mechanische Arbeit, zu  $\frac{4}{3}$  in nützliche Heizarbeit verwandelt. Da die dem Auspuffdampf entnommene Wärme den Heizeinrichtungen nicht aus einer anderen Quelle zugeführt zu werden braucht, so erhält man in einem solchen Falle eine Dampfersparnis von rd. 40 vH gegenüber einer Anlage, die mit Kondensationsmaschinen arbeitet, da man in dieser das heiße Kondensationswasser nutzlos weglaufen lassen müsste. Setzt man nämlich den monatlichen Kohlenverbrauch einer Kondensationsmaschine gleich 1 und den einer gleich starken Auspuffmaschine gleich  $\frac{5}{4}$ , so ist der Jahresverbrauch bei einer Anlage mit Verwertung sämtlichen Auspuffdampfes zu Heizzwecken gleich  $12 \cdot \frac{5}{4} = 15$ . Bei einer Kondensationsmaschine mit besonderen Heizkesseln ist der Dampfverbrauch  $12 \cdot 1$  für die Arbeit der Maschine  $+ 12 \cdot \frac{4}{5} \cdot \frac{5}{4}$  für die Heizzwecke  $= 24$ . Der Unterschied in diesen Zahlen zeigt die Ersparnis an, von welcher alle oben genannten Anlagen Vorteil ziehen können, welche die gesamte Wärme des Auspuffdampfes zu Heizzwecken verwenden können.

In Anlagen, welche noch trotz Verwendung ihres sämtlichen Auspuffdampfes besondere Kessel für Heiz- und Kochzwecke im Betrieb halten müssen, wie z. B. in Zuckerraffinerien, wäre es nicht unwirtschaftlich, abgebbare Energie als Nebenzweck, z. B. Strom für eine elektrische Zentrale zu erzeugen, nur um Auspuffdampf für die Zuckerfabrik zu er-



halten. In Amerika verwendet man vielfach in öffentlichen Gebäuden Dampfkraft für die elektrische Beleuchtung und die Aufzüge, um Auspuffdampf für die Heizung zu erhalten.

Aber auch dann, wenn nur während eines Teiles des Jahres der Abdampf zu Heizzwecken benutzt wird, kann dies von Vorteil sein. Falls es gelänge, Fabrikheizungen herzustellen, welche die Uebertragung der im Auspuffdampf enthaltenen Wärme an die zu beheizenden Räume ermöglichen, ohne dem Durchströmen des Dampfes einen großen Widerstand darzubieten und ohne großen Gegendruck in der Dampfmaschine zu erzeugen, würde es nicht verkehrt sein, in Betrieben, welche ausgedehnte Fabrikräume zu heizen haben, mit Auspuffmaschinen anstatt mit Kondensationsmaschinen zu arbeiten, um im Winter die Arbeitssäle mit dem Auspuffdampf zu heizen.

Nimmt man 7 Monate ohne Heizung und 5 Monate mit Heizung an, und sind die Räume der Fabrik so ausgedehnt, dass man für allen Auspuffdampf Verwendung hat, so ist der Dampfverbrauch bei einer Auspuffmaschine unter Bezugnahme auf Fig. 10, nach welcher  $\frac{1}{5}$  der Energie in die Maschine und  $\frac{4}{5}$  in die Heizung wanderte, gleich  $7 \cdot \frac{5}{4}$  für die Arbeit im Sommer mit ins Freie gepufftem Dampf  $+ 5 \cdot \frac{1}{5} \cdot \frac{5}{4}$  für die Arbeit im Winter  $+ 5 \cdot \frac{4}{5} \cdot \frac{5}{4}$  für die Heizung im Winter = 15, wenn der monatliche Dampfverbrauch einer Auspuffmaschine gleich  $\frac{5}{4}$  gesetzt wird. Wird der Dampfverbrauch einer Kondensationsmaschine von gleicher Leistung gleich 1 gesetzt, so ist bei Verwendung einer Kondensationsmaschine in Verbindung mit einer gleichstarken, durch Frischdampf betriebenen Heizung der jährliche Gesamtdampfverbrauch gleich  $12 \cdot 1$  für die Arbeit während des ganzen Jahres  $+ 5 \cdot \frac{4}{5} \cdot \frac{5}{4}$  für die Heizung im Winter = 17. Wenn also auch vielleicht keine nennenswerte Dampfersparnis durch die Heizung mit Auspuffdampf eintritt, so ist doch immerhin der Fortfall der Kondensation und ihrer Unbequemlichkeiten als Gewinn zu verzeichnen. Wenn aber neben dem Bedürfnis für Fabrikheizung noch ein einigermaßen großer ständiger, das ganze Jahr hindurch dauernder sonstiger Verbrauch an Heizdampf vorliegt, wie z. B. in einer Spinnerei mit Färberei und Trocknerei, in einer Eisenbahnwagenfabrik mit Lackirerei und Holztrocknerei, so kann leicht der Vorteil aufseiten der Auspuffanlage liegen.

Macht die Beschaffung des Kühlwassers für die Kondensation große Kosten, so sind Gegenstromkondensatoren vorteilhaft, weil sie etwa mit der Hälfte der für die gewöhnlichen Parallelstromkondensatoren erforderlichen Kühlwassermenge auskommen. Sehr empfehlenswert ist es bei Mangel an Kühlwasser, die Luft als Kühlmittel für den Dampf zu verwenden. Zu diesem Zweck muss man die aus dem Dampf abzuführende Wärme der Luft auf einer möglichst großen Oberfläche zur Aufnahme anbieten, weil der Eintritt der Wärme in die Luft viel schwerer von statten geht als in einen festen oder flüssigen Körper. Eine große Berührungsfläche zwischen Dampf und Luft erhält man am besten, wenn man Wasser als Vermittler anwendet, weil sich dieses bequem und billig durch feine Zerteilung oder Zerstäubung mit großen Oberflächen ausstatten lässt. Man braucht zu diesem Verfahren eine Kühlwassermenge, die ungefähr gleich der Speisewassermenge ist, während man im gewöhnlichen Parallelstromkondensator etwa das 25fache der Speisewassermenge braucht. Das durch Mischung mit dem Dampf erwärmte Wasser wird durch die Berührung mit der Luft abgekühlt und zu einer abermaligen Mischung mit neuem Dampf geeignet gemacht. Daher nennt man diese Anlagen Rückkühlungen. Die Luft nimmt in ihnen die Wärme des Wassers teilweise unter Erhöhung ihrer Temperatur, teilweise durch Erhöhung ihres Feuchtigkeitsgehaltes an sich. Die hierbei zur Wasserverdunstung erforderliche Wärme wird dem Wärmeverrat des zu kühlenden Wassers entnommen. Damit aber die Wärme zwischen Wasser und Luft in einem Beharrungszustand übertragen werden kann, muss die warme feuchte Luft aus der Anlage abfließen und dafür fortwährend neue kalte Luft zufließen. Das kann ohne künstliche Mittel erfolgen, weil die Luft durch Erwärmung dünner und durch die Dunstaufnahme leichter wird, da der aufgesogene Wasserdampf bei den in Betracht kommenden Temperaturen nur den zehnten Teil des Luftgewichtes bei gleichem Rauminhalt hat.

So wird z. B. in einer Rückkühlanlage mit Streudüsen die warme, dunstige Luft über dem feinverteilten Wasserstaube abziehen und neue Luft aus der Umgebung herbeiströmen, sodass eine solche Rückkühlanlage in der Zugerzeugung nicht unähnlich ist einer Brandstätte, bei welcher ebenfalls die warme leichte Luft abfließt und von allen Seiten ein auf die Brandstelle gerichteter Zugwind entsteht. Ein Unterschied ist zwischen beiden insoweit vorhanden,

als dieser Zugwind bei der Rückkühlanlage erwünscht ist und deshalb nicht beeinträchtigt werden sollte, bei dem Brande aber unheilvoll wird.

Um die Zugwirkung zu steigern und dadurch die Kühlung des Wassers zu verstärken, hat man die Wasserverteileinrichtung in weite Kamine eingeschlossen, welche die warme leichte Luft zusammenhalten, sodass sie eine geschlossene, ziemlich hohe Säule bildet, ehe sich die feuchtwarmen Schwaden in die freie Luft hinein verteilen, wobei die Zugwirkung gerade so erzeugt wird wie durch die Säule der heißen Kesselgase im Schornstein. Natürlich muss man sorgen, dass die Zugwirkung wenig beeinträchtigt wird; die Kamine sind daher in ihrem unteren Teil möglichst frei zu legen, damit die Luft bequem von allen Seiten herankann. Sie darf nicht durch vorgebaute Gebäude oder aufgestapelte Gegenstände daran gehindert werden.

Selbstverständlich verursacht die Rückkühlung besondere Kosten; aber bei großen und stark belasteten Anlagen ist die Ersparnis durch die Kondensation in der Dampfmaschine so groß, dass ihre Anwendung doch wirtschaftlich wird.

Die praktische Bedeutung der Kondensation für Anlagen, welche keine oder wenig Heizung haben, ist in letzter Zeit immer mehr erkannt und gewürdigt worden. Bei großen und verzweigten Dampfanlagen, auf Hüttenwerken, Gruben und chemischen Fabriken wendet man mit Vorteil Zentralkondensation an. Trotz der Verbesserungen, die man an Kondensationsanlagen in der jüngsten Zeit gemacht hat, bleibt noch immer ein reiches Arbeitsfeld bezüglich der einzelnen Einrichtungen übrig. Die Mühen und Kosten, welche man hier aufwendet, machen sich bezahlt; denn eine einfache und betriebsichere Anlage, durch welche die untere Temperaturgrenze im Kreisprozess der Dampfmaschine herabgezogen werden kann, wird stets als ein billiges, angenehmes und zuverlässiges Mittel, um die Umwandelbarkeit der Wärme des Dampfes in Arbeit zu erhöhen, ihren Wert behalten.

Das gleiche Zeugnis lässt sich denjenigen Mitteln nicht ausstellen, welche man anwenden muss, um die Güte des Arbeitsvorganges durch Erweiterung der Temperaturgrenze nach oben hin, durch Verstärkung der Expansion, zu verbessern. Mit einer solchen wächst der Wärmeaustausch zwischen Dampf und Wand, ganz besonders bei gesättigtem Dampf, und die nähere Prüfung der Mittel, die man angewandt hat, um diesen Austausch zu verhindern, zeigt, dass Licht und Schatten in dem sich ergebenden Bilde verteilt sind, und

dass bei der praktischen Anwendung dieser Mittel nur durch Beachtung aller Umstände ein günstiger Erfolg erzielt werden kann.

Als erstes Gegenmittel gegen den Wärmeaustausch zwischen Dampf und Wand wendet man bei gesättigtem Dampf die Heizung der Cylinderwände an. Praktisch ist dabei immer im Auge zu behalten, dass die Heizung nur dadurch vorteilhaft wirken soll und kann, dass sie die aus dem Arbeitsdampf in die Cylinderwand eindringende Wärme zurückstaut und möglichst bald zur Umkehr aus der Wand in den Dampf veranlasst. Zuerst ist es einleuchtend, dass man den Heizmantel selbst möglichst gut gegen Wärmeverluste nach außen schützen muss. Der gemantelte Dampfeylinder muss noch besser mit Wärmeschutzmasse überzogen werden als der ungemantelte, weil die Temperatur seiner Außenfläche höher ist. Ferner ist ein zu starkes Beheizen der Cylinderwände ebenso vom Uebel wie ein zu schwaches Beheizen. Dringt Wärme aus dem Heizdampf in den Arbeitsdampf ein, so ist dies nur nutzbringend, wenn es während der Expansionsperiode geschieht. Dringt die Wärme in den abziehenden Dampf, so ist das gerade so gut, als wäre sie unmittelbar nach außen ausgestrahlt. Aber auch die während der Expansion in den Dampf übergetretene Wärme wird schlechter ausgenutzt als die mit dem Frischdampf in den Cylinder gelangende. Leider haben wir kein Erkennungszeichen, wann der Heizdampf in einem gegebenen Falle gerade so wirkt, dass er die Wärme am stärksten zurückstaut und am wenigsten selbst in das Cylinderinnere eindringt, so dass die Summe der beiden Wirkungen für uns die günstigste ist. Jedenfalls ist es aber gut, wenn der Heizdampf möglichst heiss und möglichst trocken ist. Es ist stets Frischdampf — kein Abdampf — zum Heizen zu verwenden und für Trockenhaltung der Heizwände durch gute Wasserabscheider und ständige Erneuerung des Heizdampfes zu sorgen.

Jeder Teil der Heizung an der Dampfmaschine muss einen besonderen Wasserabscheider erhalten und überwacht werden können. Es ist falsche Sparsamkeit, einen gemeinsamen Kondensationstopf für mehrere Heizungen anzuordnen, denn eine nicht überwachte Heizung kann eher Schaden bringen als Nutzen stiften. Um einen regen Umlauf des Dampfes im Heizmantel zu erzielen und den Dampf, der gewirkt hat und feucht geworden ist, durch frischen, trocknen Dampf zu ersetzen, empfiehlt es sich, Dampf durch die Heizung zu

schicken, den man für andere Zwecke braucht, bei welchen die Feuchtigkeit nicht schadet, z. B. den Kochdampf in Färbereien, den Betriebsdampf für die Antriebsmaschine der Zentralkondensation usw.

Der Heizdampf ist in den Fällen nicht angebracht, in denen er einen Wärmeaustausch zwischen Arbeitsdampf und Cylinderwand nicht verhindern kann, z. B. wenn ein solcher Austausch durch die Art oder den Betrieb der Maschine nicht oder nur in geringem Maße entsteht. So würde er wenig Wert haben bei Maschinen, die mit überhitztem Dampf arbeiten, abgesehen davon, dass er sich in solchen Maschinen von selbst verbietet, weil er die Cylinderwände im Innern zu heiß und zu trocken machen würde. Auch bei schnell laufenden Maschinen ist er nicht angebracht, weil infolge der hohen Umlaufzahl die Zeit für die einzelnen Arbeitsvorgänge zu kurz ist und die Füllung, die Expansion und das Ausblasen so schnell auf einander folgen, dass ein Austausch, ein Hin- und Herwandern einer und derselben Wärmemenge zwischen Dampf und Wand, aus Zeitmangel nicht eintreten kann. Der Wärmeaustausch ist auch bei Maschinen, die mit großer Füllung arbeiten, gering, weil die mittlere Temperatur der Wand hoch ist und der frisch eintretende Dampf dadurch eine geringere Neigung zum Kondensieren erhält. In allen diesen Fällen schießt die Heizung leicht über das Ziel hinaus: das periodische Zurückstauen der aus dem Arbeitsdampf in die Cylinderwand kommenden Wärme ist klein, das ununterbrochene Eindringen der Wärme aus dem Heizdampf durch die Cylinderwand hindurch in den Arbeitsdampf überwiegt, was aber nach Fig. 21 nicht vorteilhaft ist. In allen diesen Fällen genügt es, das ununterbrochene Ausströmen der Wärme aus dem Dampf durch die Cylinderwand nach außen durch eine Wärmeschutzhülle auf dem Dampfeylinder zu verhindern.

Auch durch mechanische Mittel kann die Oberflächenwirkung verringert werden, z. B. durch einen dicken Ueberzug der Cylinderlaufflächen mit Schmieröl. So kann bei Abnahmeversuchen, bei denen der Kolben in verschwenderischer Weise geschmiert wird, ein so niedriger Dampfverbrauch erreicht werden, wie er im laufenden Betriebe nicht aufrecht erhalten wird. Weiter ist die Heizung der Cylinderdeckel trotz der großen Flächen, die sie dem frisch eintretenden Dampf darbieten, nicht so wichtig, weil die Innenseiten der Deckel im Betrieb mit einer dicken, die Wärme schlecht leitenden Oelkruste überzogen sind.

Wenn auch der Heizmantel für den dauernden Betrieb vieler Maschinen nicht erforderlich ist, so wird er doch von guten Maschinenfabriken an allen ausgeführt. Er dient zum gründlichen Anwärmen der Maschine vor jeder Ingangsetzung und wird benutzt, um die Maschine bei langen Stillständen, über Feiertage hinaus, angewärmt zu halten. Für alle Laufflächen an einer Maschine ist es gut, wenn sie keinen Formänderungen durch starke Temperaturschwankungen ausgesetzt werden. Nach dem Ingangsetzen der Maschine wird die Cylinderheizung abgestellt, falls die besonderen Verhältnisse bei der Maschine sich als nicht günstig dafür erwiesen haben.

Die Heizung des Aufnehmers an den Verbundmaschinen ist ganz anders zu beurteilen als die Heizung der Cylinderwände. Der Druck und die Temperatur des Aufnehmerdampfes sind nur geringen Schwankungen unterworfen, und die mittlere Temperatur der Innenhaut des Aufnehmers liegt nicht weit von den äußersten in ihm auftretenden Temperaturen entfernt. Der periodische Wärmeaustausch zwischen Aufnehmerdampf und Aufnehmerwand, das Hin- und Herwandern von Wärme, wird dementsprechend klein sein. Ein Zurückstauen des Punktes in der Aufnehmerwand, von dem nach Fig. 14 und 19 die Abzweigungen der Temperaturkurven ausgehen, kann also keinen Vorteil bringen.

Der Aufnehmer ist jedenfalls gegen den ununterbrochenen Wärmeaustausch zwischen Dampf und Wand zu schützen, welcher durch Strahlung nach außen veranlasst wird. Hierzu genügt aber eine sorgfältige Umhüllung mit Wärmeschutzmasse. Wie wichtig solcher Wärmeschutz ist, kann aus folgendem Beispiel ersehen werden. Der Aufnehmer lag in einem Mauerkanal, der auch die Seile des Schwungrades aufnahm. Die Bewegung des Schwungrades veranlasste einen kräftigen Luftstrom, der den Mauerkanal ständig durchstrich. Der Aufnehmer war zuerst nicht umhüllt, und der Dampfverbrauch betrug hierbei 6,8 kg für 1 PS-st. Durch gute Umhüllung des Aufnehmers ging der Dampfverbrauch auf 6,1 kg herunter, also um mehr als 10 vH.

Die Anwendung der Ueberhitzung auf den Aufnehmerdampf hat erwiesen, dass eine gute Ersparnis damit möglich ist, namentlich wenn der zu heizende Dampf feucht ist. Daraus kann man schließen, dass es vorteilhaft ist, den Aufnehmerdampf zu heizen und zu trocknen. Allerdings muss die Einrichtung so getroffen werden, dass aller Dampf wirklich geheizt wird. Dazu genügt ein einfaches Rohr mit darum gelegtem Heizmantel nicht. Der Aufnehmerdampf muss

auf eine große Zahl enger Rohre verteilt werden, und der aus dem Kessel zu entnehmende Heißdampf muss das Rohrbündel in Schlangelinien umspülen, ähnlich wie im Wasserrohrkessel das Wasser in den Rohren von den Heizgasen umspült wird.

Wie bei der Heizung, so ist auch bei der mehrstufigen Expansion zu beachten, dass sie ein Mittel ist, um den Kohlenverbrauch zu vermindern, dass aber ihre Verwendung nicht unbedingt und unfehlbar eine Ersparnis im Maschinenbetrieb herbeiführt. Die Verbundmaschinen sind aufgebaut auf der Grundlage, die Vorteile hoher Dampfspannung mit weitgetriebener Expansion auszunutzen, indem die schädliche Einwirkung der Wände durch Verteilung der Expansion auf mehrere Cylinder vermindert wird. Als Nebenwirkungen treten hierbei manche unbeabsichtigte Erscheinungen auf, teils nützlicher, teils schädlicher Art, sodass erst die Betrachtung aller Verhältnisse das Bild der Verbundmaschine klar und verständlich macht, während die einseitige Aufmerksamkeit auf die Herabminderung des Kohlenverbrauches leicht ein unrichtiges Urteil erzeugt.

Wenn starke Temperaturschwankungen im Cylinder aus Betriebsrücksichten unvermeidlich sind, so können die schädlichen Wandwirkungen auch nicht durch die mehrstufige Expansion vermindert werden. Dies ist der Fall, wenn die Maschine häufigen und längeren Stillständen unterworfen ist, wie Fördermaschinen mit geringer Schachttiefe. Der Nutzen der Verbundmaschine wird schon abgeschwächt bei starkem Wechsel in der Belastung der Maschine, wie er bei den Betriebsmaschinen, elektrischer Straßenbahnen vorkommt, die nicht mit einer Pufferbatterie von Akkumulatoren ausgerüstet sind. Am wohlsten fühlt sich die Verbundmaschine bei gleichmäßiger ununterbrochener Belastung, wie in Spinnereien und Webereien. Es giebt Fälle, wo der Umbau der allerdings älteren Eincylindermaschinen in Verbundmaschinen in solchen Betrieben eine Kohlenersparnis von über 30 vH herbeigeführt hat.

An vorteilhaften Nebenwirkungen ist bei der Verbundanordnung die Verminderung des Schadens, den ein undichter Kolben verursacht, zu erwähnen. Diese Verminderung erfolgt einmal, weil der Ueberdruck auf der arbeitenden Kolbenseite über die Ausblaseseite viel kleiner ist als bei der Eincylindermaschine, außerdem aber, weil der durch den undichten Hochdruckkolben entweichende Dampf noch im Niederdruckcylinder ausgenutzt wird. Der Füllungsgrad ist in jedem Cylinder bei der Verbundmaschine größer, als er

bei einer entsprechenden Eincylindermaschine sein würde. Es erleichtert dies die Konstruktion und die Bedienung der Steuerung und trägt neben der Herabminderung des Temperaturgefälles zu einer verstärkten Verminderung des Wärmeaustausches bei.

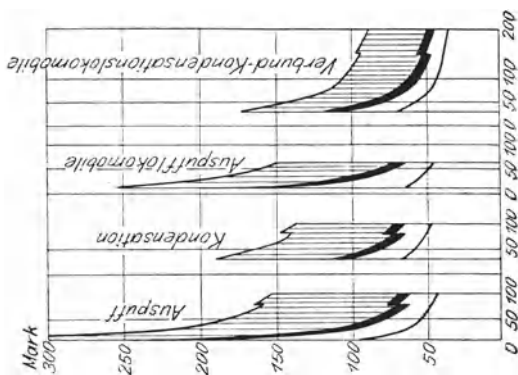
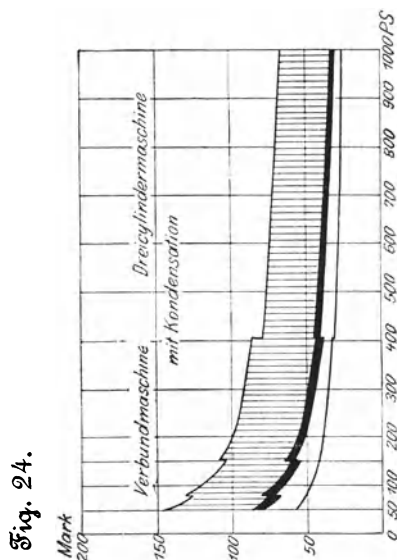
An unangenehmen Nebenerscheinungen ist bei der Verbundwirkung die Erschwerung der Regulirung gegenüber einer Eincylindermaschine zu erwähnen. Der in die Maschine eingelassene, vom Regulator nicht mehr beeinflusste Dampf bleibt bei der Verbundmaschine länger im Arbeitsvorgang stehen als bei der Eincylindermaschine, nämlich während drei und mehr Hüben bei der Mehrzylindermaschine gegenüber 2 Hübem bei der Eincylindermaschine. Ferner wirkt der im Aufnehmer enthaltene Dampf stets der Regulirung entgegen. Wird z. B. die Füllung im Hochdruckcylinder vergrößert, so muss zur Erhaltung des Beharrungszustandes der Druck im Aufnehmer steigen. Der frische Dampf wird also zu einem Teil so lange im Aufnehmer zurückgehalten, bis die Erhöhung des Aufnehmerdruckes vollendet ist, und dieser Teil kommt dann im Niederdruckcylinder nicht zur Wirkung. Wird die Füllung im Hochdruckcylinder verkleinert, so muss entsprechend der Druck im Aufnehmer abnehmen. Es fließt daher eine vom Regulator nicht beeinflusste Dampfmenge aus dem Aufnehmer ab und erhöht die Leistung im Niederdruckcylinder, wirkt also wiederum der vom Regulator angestrebten Wirkung entgegen.

Sodann bringt die bei der Verbundmaschine angestrebte weitgehende Expansion des Dampfes eine starke Verteuerung der Maschine mit sich. Je weiter die Expansion getrieben wird, um so geringer ist der mittlere Druck des Dampfdiagrammes. Die Arbeitsleistung der Maschine ist gleich dem Produkt aus dem mittleren Druck des Diagrammes und dem vom Kolben beschriebenen Weg. Je kleiner der mittlere Druck ist, um so größer muss für eine gegebene Leistung das vom Kolben beschriebene Volumen sein, desto größer fällt die Maschine aus, desto schwerer muss das Gangwerk gemacht werden, desto mehr kosten die Untermauerung und die Aufstellung. Dies erhöht die Kosten für Verzinsung, Abschreibung und Unterhaltung der Maschine.

Aber diese Nebenerscheinungen treten gegen die Haupteigenschaft der Verbundmaschine zurück, dass sie eine wirtschaftliche Erweiterung des Temperaturgefälles im Kreisprozess der Dampfmaschine durch Höherlegung der oberen Temperatur ermöglicht. Die erzielten Erfolge waren so



grofs, dass man den einmal als richtig erkannten Weg unbekümmert um die eintretenden Schwierigkeiten weiter verfolgte und den Kesseldruck allmählich von 4 auf 12 bis 18



at erhöhte. Die Schwierigkeiten entstanden durch die mit der Cylinderzahl vermehrten Steuerungs- und Gangwerkteile und durch die am Hochdruckcylinder auftretende stärkere Aus-

Lynen, Wärmeausnutzung.

dehnung der arbeitenden Teile infolge der höheren Temperatur des Arbeitsdampfes.

Die gleichzeitigen Fortschritte in der Werkstättentechnik machten es möglich, dass der Maschinenbau seine Aufgabe mit größter Eleganz löste. Mit der Erweiterung der Expansionsgrenzen erfolgte die Ausbildung guter Steuerungen, weil man die Vorteile aus guter Dampfverteilung, wie bequeme Dampfwege, schnellen Abschluss der Kanäle, kleinen schädlichen Raum und kleine schädliche Oberflächen, mitnehmen wollte. Die Gefälligkeit des Baues, die Genauigkeit der Arbeit, der ruhige Gang und die Haltbarkeit der bewegten Teile gingen Hand in Hand mit der Verminderung des Dampfverbrauches. Nicht unwichtig war dabei die Ausbildung der Zubehöerteile, die ausgiebige Verwendung der Entwässerungen, die sorgfältige Durchbildung der Schmiervorrichtungen.

Die wirtschaftliche Bedeutung der Fortschritte kann sehr deutlich aus Fig. 24 erkannt werden, in welcher die Tabellenwerte aus dem schätzbaren Werk von Ch. Eberle: »Die Kosten der Krafterzeugung«, zeichnerisch aufgetragen sind, soweit sie sich auf Auspuff- und Kondensations-Eincylindeimaschinen, auf Mehrcylindermaschinen und Lokomobilen beziehen.

Die wagerechten Strecken bedeuten die Leistung der Maschine in Pferdestärken, die senkrechten die Kosten einer Jahrespferdestärke in Mark, wobei 300 Arbeitstage mit zehnstündiger Arbeitszeit gerechnet sind. Die Strecken bis zur untersten Kurve bedeuten die Kosten für Verzinsung, Abschreibung und Unterhaltung der Anlage, einschließlich Maschinen- und Kesselhaus, die darüber stehenden Strecken stellen die Löhne für Heizer und Maschinisten dar. Die darauf folgenden Strecken zeigen den Ölverbrauch an, und die obersten Strecken lassen den Anteil der Kohlenkosten an den Gesamtkosten erkennen. Es sind dies alles Ponderabilien; nicht eingeschlossen sind die Genauigkeit der Werkstättenarbeit, die Betriebsicherheit durch Güte des Baustoffes, durch den Pflichteifer und die Ordnungsliebe des Maschinenwärters, die Ersparnisse durch gute Anordnungen und den gesunden Menschenverstand der Werkleiter: lauter Imponderabilien, die von großem Einfluss auf das wirtschaftliche Ergebnis einer Maschinenanlage, aber nicht ziffernmäßig ausdrückbar sind.

Trotzdem sprechen die Kurven eine beredete und deutliche Sprache. Bei den einfachen Eincylindeimaschinen ist der Anteil der Kosten für Verzinsung, Abschreibung und

Unterhaltung der Anlage an den Gesamtkosten kleiner als bei den verwickelten Verbundmaschinen; dafür nehmen die Kohlenkosten eine breitere Fläche ein. Auch der Mehraufwand für die Kondensation gegenüber den Auspuffmaschinen ist bei der Eincylindermaschine recht deutlich zu erkennen, insbesondere die Zunahme der Mehrkosten bei Verkleinerung der Maschinenleistung. Die Gesamtkosten der Kondensationsmaschinen bleiben aber kleiner als die der Auspuffmaschinen, weil die Ersparnis an Kohlen den Mehraufwand in der Anlage mehr wie ausgleicht. Bei Maschinen unter 30 PS hört dies aber auf, sodass die Anwendung der Kondensation sich dann im allgemeinen nicht mehr lohnt. Andererseits ist es lehrreich, dass bei Dreicylindermaschinen die Kosten für Verzinsung, Abschreibung und Unterhaltung der Anlage kleiner ausfallen als bei einer gleich starken Verbundmaschine. Trotzdem die Kosten für die eigentliche Maschine größer sind, wird die Anlage im ganzen billiger, weil die Ersparnis an Kesselfläche, Rohrleitungen, Speisepumpen infolge des verringerten Dampfverbrauches den Mehraufwand bei der eigentlichen Dampfmaschine ausgleicht.

Die Darstellung der Löhne lässt erkennen, wie stark die verhältnismäßige Ausgabe dafür gegenüber der Gesamtausgabe anwächst, wenn die Leistung der Maschine abnimmt. Es ist dies ein Zeichen dafür, dass bei Beaufsichtigung der kleinen Dampfmaschinen die menschliche Arbeitskraft schlecht ausgenutzt wird. Bei den Verbundmaschinen ist in den Tabellen von Eberle die Verwendung besserer und natürlich teurerer Arbeitskräfte zugrunde gelegt; namentlich ist der Sprung an der Uebergangsstelle von den Verbundmaschinen zu den Dreicylindermaschinen kennzeichnend. Die Kosten für die Schmierstoffe nehmen ebenfalls mit Zunahme der Größe der Maschine ab, da die Größe der Laufflächen in den arbeitenden Teilen einer Maschine nicht so schnell zunimmt wie die Leistung der Maschine; denn die Laufflächen wachsen etwa mit dem Quadrat, die Leistung aber mit der dritten Potenz der linearen Abmessungen einer Maschine. Das Gesamtergebnis in der Kostenberechnung wird indes dadurch nicht sehr beeinflusst, weil dieser Teil der Gesamtkosten überhaupt klein ist.

Das Hauptinteresse bei der Figur 24 wendet sich den Kohlenkosten zu. Die Zeichnung ist entworfen unter der Annahme, dass 10 000 kg Kohlen 140 *M* kosten. Die oben bei der Ausnutzbarkeit der Dampfenergie besprochenen Einflüsse kommen hierbei zur Geltung, und der menschliche Scharf-

sinn feiert einen Triumph, insofern die Figur erkennen lässt, dass die Jahreskosten für die Kohlen von 136  $\mathcal{M}$  bei der zehnpferdigen Auspuffmaschine heruntergehen auf 36  $\mathcal{M}$  bei der 1000pferdigen Dreicylindermaschine. Die Ersparnis, welche bei einer Leistung von 1000 PS jährlich 100 000  $\mathcal{M}$  ausmacht, ist vom Menschen in einem mühsamen, mehr als ein Jahrhundert dauernden Kampf der Natur entrissen worden.

Auch ist es interessant, zu sehen, wie die Gesamtkosten für 1 Jahres-Pferdestärke mit der Größe der Anlage abnehmen. Während 1 PS-Jahr bei der 50pferdigen Verbundmaschine 145  $\mathcal{M}$  kostet, erstet man dieselbe Leistung bei der 1000pferdigen Verbundmaschine schon für 68  $\mathcal{M}$ . Wir können bei der Dampfmaschine zahlenmäßig erkennen, wie der Großbetrieb das wirtschaftliche Ergebnis verbessert, eine Erscheinung, die allgemein im wirtschaftlichen Leben beobachtet wird. Andererseits finden wir in den Tabellen eine Bestätigung auch dafür, dass durch Ausnutzung vieler kleiner Vorteile ein beträchtlicher Gesamtgewinn erzielt und dadurch mancher kleine Betrieb dem großen gegenüber wettbewerbfähig gemacht werden kann. Dies zeigt nämlich eine Betrachtung der Kurven, die sich auf die Lokomobilen beziehen.

Die Lokomobilen haben geringe Anlagekosten, weil die Einmauerung des Kessels und der Maschine fortfällt und der Bedarf für Maschinen- und Kesselhaus geringer ist. Die Röhrenkessel der Lokomobilen sind zwar teuer in Anlage und Betrieb; sie nutzen aber die aus den Kohlen entwickelte Wärme sehr gut aus. Die Dampfleitung und die damit zusammenhängenden Verluste fallen bei den Lokomobilen fort, weil die Dampfzylinder im Dom des Kessels untergebracht sind. Die Cylinderheizung ist besonders gut, da sie mit heißem, ständig aus der Quelle erneuertem Dampf erfolgt. Die Cylinder können keine Wärme nach außen strahlen, weil sie allseitig vom Dampf umgeben sind. Die Umlaufzahl der Lokomotivmaschine ist hoch, der Wärmeaustausch zwischen Dampf- und Cylinderwand entsprechend klein. Alle diese Umstände vermindern die Betriebskosten. So können denn die Lokomobilen sehr gut den Wettbewerb mit den ortfesten Maschinen aufnehmen, was sich auch bei näherem Eingehen auf die Kurven der Fig. 24 ergibt. So kostet nach Fig. 24 die Jahrespferdestärke bei der 200-pferdigen Verbundmaschine 100  $\mathcal{M}$ , während man bei der 200-pferdigen Verbundlokomobile nur etwa 90  $\mathcal{M}$  für die gleiche Leistung auszugeben braucht. Hiernach können die

Betriebskosten durch Anwendung einer Lokomobile jährlich um  $200 \cdot 10 = 2000 \mathcal{M}$  erniedrigt werden.

Bei der Betrachtung, welche praktischen Folgen die zum Schluss zu besprechende Anwendung der Dampfüberhitzung auf den Bau und den Betrieb der Dampfmaschinen hat, ist nicht zu leugnen, dass deren Einführung auch die Einführung neuer Schwierigkeiten in das Dampfmaschinenwesen bedeutet. Die Dampfmaschine wird durch den überhitzten Dampf in ihrem Charakter mehr der Gasmaschine genähert, und manche Erscheinungen treten in ihr auf, die auch an der Gasmaschine, wenn auch in erhöhtem Maße, vorkommen. Aber wie der Gasmaschinenbau mit den weitaus größeren Schwierigkeiten der Gasmaschine fertig geworden ist, so hat der Dampfmaschinenbau es auch verstanden, die neuen Aufgaben mit Geschick zu lösen und die Konstruktionsgrundsätze und Baustoffe zu finden, um unter den erschwerten Umständen die Einfachheit und Sicherheit der Konstruktion zu wahren, sowohl bei der Dampfmaschine als auch bei den Ueberhitzern.

Zur praktischen Durchführung der Ueberhitzung waren die Errungenschaften der Maschinenteknik der Neuzeit erforderlich. Nicht allein die Menschen, auch die Maschinen sind Kinder ihrer Zeit. Wie die Menschen mit ihren Kenntnissen, Bestrebungen und Erfolgen auf den Schultern ihrer Vorfahren stehen, so sind auch die Maschinen in ihrem Bau und ihrer Betriebsweise auf der Grundlage der Erfahrungen an ihren Vorgängerinnen erbaut. Die Fortschritte in der Werkstättentechnik, sowohl in bezug auf Kenntnis der Eigenschaften der angewandten Baustoffe als auch auf die Ausbildung genauer Messverfahren und bester Werkzeugmaschinen, die allmähliche Druckerhöhung in den Verbunddampfmaschinen, die Erfahrungen im Gasmaschinenwesen, das gleichfalls eine allmähliche Steigerung der Arbeitsdrücke erlebte und beim Durchringen durch die praktischen Schwierigkeiten, ohne es zu wollen, ein Pionier für die Dampfüberhitzung war, sind die Ursachen gewesen, dass der neue Anstofs, den der geistvolle, mit unermüdlicher Kraft des Geistes und Willens an seiner Aufgabe arbeitende Ingenieur W. Schmidt in Aschersleben der Einführung der Dampfüberhitzung gab, so ungeahnte und sich immer weiter ausbreitende Erfolge in dieser seit beinahe einem halben Jahrhundert ruhenden Aufgabe des praktischen Maschinenbaues hatte.

Die neuen Schwierigkeiten bei der Dampfüberhitzung bestanden für die Dampfmaschinen in der Erhöhung der Temperatur der Teile, die mit dem heißen Dampf in Berüh-

rung kommen, und in der Trockenheit des überhitzten Dampfes gegenüber dem gesättigten.

Die Erhöhung der Temperatur machte die Vermeidung jeglicher Anstauung von Wärme an einer einzelnen Stelle in der Maschine zu einer Forderung von zwingender Kraft, und manche böse Erfahrungen lehrten die strenge Beobachtung aller Regeln, die auf eine gleichmäßige Ableitung der Wärme von den heißen nach den kälteren Teilen der Maschine abzielen, besonders an den Dampfzylindern und Kolben, den Steuerteilen und Stopfbüchsen. Das Verhalten des Stoffes der Ventile und Ventilgehäuse, der Stopfbüchsenpackungen musste studiert, und dementsprechend mussten Aenderungen in den Konstruktionen vorgenommen werden.

Das Ausbleiben von Wasserniederschlägen im Dampfzylinder bei überhitztem Dampf, das für die Ausnutzung der Dampfwärme so wertvoll ist, bedeutet für den Kolben eine Erschwerung des Ganges, weil dieser bei Anwendung des gesättigten Dampfes auftretende Niederschlag die Reibung vermindert. Wenn man die Dampfmaschine ein williges, selbst Misshandlungen ertragendes Werkzeug genannt hat, so hängt dies zum größten Teil mit der Eigenschaft des gesättigten Dampfes zusammen, Feuchtigkeit an den von ihm bespülten Flächen abzusetzen.

Die Frage der Schmierung des Kolbens und der Schieber hat daher bei Einführung der Dampfüberhitzung eine erhebliche Wichtigkeit. In hochsiedenden Mineralölen hat man besonders bei Grafitzusatz geeignete Mittel gefunden, den Gang des Kolbens vollkommen sicher zu machen, ohne die Kosten für die Schmierung stark zu erhöhen.

Auch die Ueberhitzer sind in der Konstruktion und im Material so vervollkommenet worden, dass die Schwierigkeiten des Anheizens und des Betriebes, vornehmlich in der Anpassung an die Schwankungen in der Dampfentnahme, bei sorgfältiger Wartung der Anlage mit Sicherheit überwunden werden.

Es ist aber nicht zu verkennen, dass die Maschinenanlagen bei überhitztem Dampf verwickelter im Bau und empfindlicher in der Wartung geworden sind. Es ist eine allgemeine Begleiterscheinung eines jeden Fortschrittes in der Ausnutzung der Naturkräfte, dass die Bedingungen des Erfolges zahlreicher und schwieriger werden, dass Genauigkeit und Gewissenhaftigkeit in der Ausführung der Anlage zunehmen, und dass das Pflichtgefühl und die Fassungsgabe der mit dem Betriebe betrauten Menschen gesteigert sein müssen. Wenn auch die »gute alte Zeit« der Maschinenanlagen mancherlei Annehmlichkeiten aufgewiesen haben mag,

die die heutige Entwicklungsstufe nicht mehr zulässt, so ist es doch verkehrt, sich gegen den Fortschritt zu wehren, und die harte Wirklichkeit des wirtschaftlichen Lebens strafft denjenigen rücksichtslos, der sich den Errungenschaften der Kultur nicht anpasst.

Jedoch ist darauf aufmerksam zu machen, dass die Dampfüberhitzung uns nach zwei Richtungen der alten Zeit wieder näher bringt. Die hohen Kesseldrücke mit drei und mehr Expansionsstufen sind nicht mehr so wichtig wie bei gesättigtem Dampf, und der Einfluss der Gröfse der Maschine auf den Dampfverbrauch tritt zurück, sodass der überhitzte Dampf die Wettbewerbfähigkeit der Maschinen zugunsten der kleinen Anlagen verschiebt. Bei einem Dampfdruck von 6 at lässt sich in einer Verbundmaschine ein Kohlenverbrauch erreichen, wie er bei gesättigtem Dampf erst mit 12 at und in einer Dreicylindermaschine erzielt wird. Die hohen Temperaturen treten gewissermaßen an die Stelle der hohen Drücke. Es kann bei niedrigem Drucke infolge besserer Annäherung an die vollkommene Maschine durch Dampfüberhitzung eine Ersparnis erreicht werden, welche bei gesättigtem Dampf infolge der geringeren Annäherung an den vollkommenen Prozess erst durch höheren Druck und weiter getriebene Expansion erzielt wird. Dies ist besonders wichtig für die Besitzer älterer Anlagen, welche die Güte ihrer Anlage durch Einführung der Ueberhitzung verbessern wollen.

Die bei gesättigtem Dampf mit der Gröfse der Maschine steigende Dampfersparnis ist zumteil dadurch verursacht, dass die Gröfse der vom Dampf bespülten Flächen nicht so schnell zunimmt wie die Leistung der Maschine, und dass der schädliche Einfluss der Wandungen auf den Dampf mit der Zunahme der Maschinengröfse infolgedessen abnimmt. Die Oberflächen in einer Dampfmaschine wachsen rund mit dem Quadrat, die Leistung aber mit der dritten Potenz der linearen Abmessungen der Maschine. Eine Maschine, die in allen ihren Teilen doppelt so groß ausgeführt ist wie eine andere Maschine, hat die vierfache Oberfläche, giebt aber etwa die achtfache Leistung her. Eine 800 pferdige Dampfmaschine hat etwa 4 mal so viel vom Dampf bespülte Oberflächen wie eine 100 pferdige, pro Pferdestärke also nur die halbe Oberfläche, und der Dampfverbrauch wird dadurch in der großen Maschine günstig beeinflusst. Da sich nun der überhitzte Dampf neutraler gegen die Cylinderwände verhält als der gesättigte Dampf, so erhalten die kleinen Maschinen durch Anwendung der Ueberhitzung eine verhältnismäßig weitergehende Verbesserung als die großen Maschinen.

Es ist dies ein Ergebnis, das auch für die Gasmaschine kennzeichnend ist.

Bei der praktischen Beurteilung der Dampfüberhitzung ist sowohl die Ersparnis an Kohlen als auch die Ersparnis an Dampf zu betrachten. Die Kohlenersparnis ist für die Verminderung der Betriebskosten maßgebend und daher die wichtigere Ersparnis. Die verstärkte Ersparnis an Dampf, die zumteil dadurch herbeigeführt wird, dass das Kilogramm Speisewasser im Ueberhitzer mit einer zusätzlichen Wärmemenge bepackt wird, hat neben der Kohlenersparnis noch eine besondere Bedeutung. Es wird infolgedessen nämlich weniger eigentliche Kesselfläche erforderlich und bei Anwendung von Kondensation weniger Kühlwasser gebraucht als bei einer gleich starken, mit gesättigtem Dampf arbeitenden Maschine. Die eigentliche Kesselfläche kann bei Anwendung der Ueberhitzung kleiner ausgeführt werden als bei gesättigtem Dampf, weil ein Teil der gesamten Wärmemenge, die im Arbeitsdampf enthalten ist, durch die trockene Ueberhitzerfläche, nicht durch die Kesselfläche geschickt wird. In ähnlicher Weise gehört auch die Vorwärmerfläche zur Gesamtheizfläche. Durch sie wird ein anderer Teil der im Arbeitsdampf enthaltenen Wärmemenge, nämlich die Flüssigkeitswärme, aus den Kesselgasen unter Entlastung der Kesselfläche hindurchgeschickt.

Aus den Figuren 2 und 22 ist anschaulich zu erkennen, wie sich in einer mit Vorwärmer und Ueberhitzer ausgerüsteten Kesselanlage die einzelnen Teile der gesamten Heizfläche an der Ueberleitung der Wärme von den Kesselgasen in den Arbeitsdampf beteiligen. Der linke Teil der Wärmeffäche in Fig. 22 mit der schrägen Begrenzung im oberen Teil wird vom Economiser geleistet werden. Der mittlere rechteckige Teil stellt den Anteil der eigentlichen Kesselfläche dar, und der rechte, hoch ansteigende Zipfel zeigt die Leistung des Ueberhitzers. Bei dem gewählten Beispiel der Dampferzeugung bei 5 at Kesseldruck und Ueberhitzung auf  $300^{\circ}\text{C}$  verhalten sich die einzelnen Wärmeffächen rd. wie 23:70:7.

Die Vorwärmerfläche ist eine vorzügliche und billige Heizfläche wegen der kleinen Wandstärke der Heizrohre gegenüber der Kesselwandstärke und wegen der großen Oberfläche, welche den Heizgasen gegenüber dem Wasserinhalt dargeboten wird. Außerdem kann die Vorwärmerfläche im Betrieb ständig gereinigt werden, was bei der Kesselfläche nicht möglich ist. So kommt es, dass bei einer gewöhnlichen Kesselanlage nicht ganz 20 vH der Kesselfläche an Economiserfläche gebraucht werden, trotzdem die letztere etwa 30 vH der von



der Kesselfläche dem gesättigten Dampf zu liefernden Wärme überträgt, wobei sie aber nur etwa 12 vH dieser Kesselfläche kostet. Bezogen auf gleiche Leistung in der Wärmeübertragung kostet 1 qm Economiserfläche etwa den dritten Teil einer gleich großen Kesselfläche. Außerdem wird der Bedarf an Kesselfläche im ganzen verringert, weil die Endtemperatur der die eigentliche Kesselfläche umspülenden Heizgase höher ist als bei einer ohne Economiser arbeitenden Kesselfläche, wodurch die mittlere Leistung pro qm Kesselheizfläche größer wird.

Im Vergleich mit der Vorwärmerfläche ist die Ueberhitzerfläche eine teuere und in der Wärmeübertragung weniger wirksame Heizfläche als die Kesselfläche, weil sie mehr angestrengt und auf der Innenseite von dem die Wärme schlecht leitenden Dampf bespült wird, während der Economiser innen Wasser enthält. Bei einer ohne Vorwärmer arbeitenden Kesselanlage müssen die Ueberhitzer — um z. B. 10 vH der Wärmemenge in den Dampf zu übertragen, welche die Kesselfläche überträgt — mit einer Oberfläche von etwa 40 vH der Kesselfläche ausgeführt werden, und sie kosten dabei etwa 28 vH des Preises für den eigentlichen Kessel. Bezogen auf die gleiche Leistung in der Wärmeübertragung kostet 1 qm Ueberhitzerfläche etwa das Dreifache von 1 qm Kesselfläche. Diese Mehrkosten in der Ueberhitzerfläche bedingen noch keine Erhöhung der Gesamtkosten der Kesselanlage, weil durch die Hinzufügung des Ueberhitzers der Dampfverbrauch der Maschine und damit die erforderliche Kesselanlage kleiner wird als bei gesättigtem Dampf.

Aus dem Gesagten geht hervor, dass wohl die Art der Wirkung bei Economiser und Ueberhitzer eine ähnliche, auf Umgehung der Kesselfläche in der Wärmeübertragung gerichtete ist, dass aber die Art, wie ein Vorteil dadurch entsteht — gleiche Temperatur der in den Schornstein tretenden Gase vorausgesetzt — ganz verschieden ist. Der Economiser wirkt günstig durch Verminderung der Anlagekosten und der Kosten für Verzinsung, Abschreibung und Unterhaltung der Kesselanlage; der Ueberhitzer erreicht seinen Vorteil durch Verminderung des Dampfverbrauches in der Maschine und der unter dem Kessel zu verfeuernden Kohlenmenge.

Der Ueberhitzer kann aber außer durch diese Haupteigenschaft noch durch angenehme Nebenumstände vorteilhaft wirken. So kann eine bestehende Anlage durch den Einbau von Ueberhitzern eine Vergrößerung der Betriebskraft erzielen. Dies kann von unschätzbarem Vorteil sein, wenn die Kesselanlage baulich eingezwängt ist und keinen Einbau eines wei-

teren Kessels zulässt. Auch wirkt die Dampfersparnis günstig auf die Kondensation ein, weil um so weniger Kühlwasser erforderlich ist, je weniger Dampf die Maschine verlässt. Ein Blick auf Fig. 13 lässt erkennen, wie weit hierbei ein Unterschied zwischen gesättigtem und überhitztem Dampf vorhanden ist. Wenn die Beschaffung des Kühlwassers nur mit großen Opfern möglich ist, kann dies von entscheidender Wichtigkeit für die Einführung der Ueberhitzung in eine Anlage sein.

Man hat der Dampfüberhitzung den Vorwurf gemacht, dass die Kesselgase zu heiß in den Fuchs gelangen. Es mögen wohl solche Anlagen gebaut worden sein; der Fehler liegt aber aufseiten der Erbauer, nicht des Systems. Namentlich wenn ein Economiser eingebaut wird, werden die Kessel genau so gut ausgenutzt wie unter gewöhnlichen Umständen. Auch soll der Schmierstoffverbrauch gegenüber dem gesättigten Dampf bedeutende Mehrausgaben verursachen. Hierbei ist zu beachten, dass der Mehrverbrauch sich nur auf die Cylinderschmierung der Hochdruckseite beziehen kann; beim Gangwerk und beim Niederdruckcylinder ist selbstverständlich kein Unterschied im Ölverbrauch zwischen gesättigtem und überhitztem Dampf. Aber selbst wenn eine gewisse Erhöhung des Ölverbrauches im Hochdruckcylinder bei überhitztem Dampf eintritt, so kann dies keinen großen Einfluss auf die Betriebskosten haben, weil der durch den Schmierstoff entstehende Teil der Gesamtkosten überhaupt klein ist, wie ein Blick auf Fig. 24 zeigt.

Die Betriebssicherheit der Ueberhitzer kann bei den guten und verbreiteten Bauarten als genügend angesehen werden, wenn die Anlage mit Verständnis bedient und mit Gewissenhaftigkeit beobachtet und überwacht wird. Ohne Zweifel werden bei einer Ueberhitzeranlage größere Anforderungen an die Bedienungsmannschaft gestellt als bei gesättigtem Dampf. Durch gute Auswahl, sorgfältige Belehrung und angemessene Beaufsichtigung der Wärter kann aber der Gang der Anlage gesichert werden.

Um volle Gerechtigkeit walten zu lassen, muss man beachten, dass die Einführung der Ueberhitzung auch nach mancher Richtung die Sicherheit der Gesamtanlage erhöht. Die Dampfleitung setzt kein Kondensationswasser ab, sodass Wasserabscheider und Kondensationstöpfe an ihr überflüssig sind, was eine Reihe von unsicheren Flanschverbindungen erspart. Auch bleiben die Rohrleitungsflansche wegen der gleichmäßigeren Erwärmung der Rohre besser dicht. Das Niederschlagen von Kondensationswasser in den Cylindern und damit die Gefahr eines Wasserschlages in der Maschine wird vermieden.

Die eindringlichste und überzeugendste Sprache für den Wert der Ueberhitzung spricht aber die Verbreitung, welche sich die Ueberhitzer in der Praxis erworben haben, namentlich die rasche Steigerung der Ausführungen in der jüngsten Zeit. Die größte Verbreitung hat der Schwöerer-Ueberhitzer gefunden, der bis Ende März 1900 zu etwa 300 000 qm Kesselfläche geliefert worden ist. Hering hat in Deutschland allein etwas über 50 000 qm Kesselfläche mit Ueberhitzern ausgestattet, davon 20 000 qm seit Jahresfrist. Ungefähr die gleiche Ueberhitzerfläche ist in Oesterreich eingebaut worden. Die Dingersche Maschinenfabrik in Zweibrücken ha 240 Ueberhitzer zu etwa 40 000 qm Kesselfläche geliefert, tdavon 19 000 qm seit Jahresfrist. Die Ascherslebener Maschinenfabrik ist mit etwa 15 000 qm beteiligt.

Im ganzen werden jetzt in Deutschland etwa 400 000 qm Kesselfläche mit Ueberhitzern ausgerüstet sein, entsprechend etwa 800 000 bis 1 000 000 mit Heißdampf betriebenen Pferdestärken. Nach der Statistik sind am 1. April 1899 in Preußen 91 187 Dampfmaschinen mit einer Gesamtleistung von 3 717 264 PS in Betrieb gewesen, woraus sich eine mittlere Leistung von 40,7 PS ergibt. Eine solche mittlere Leistung darf auch wohl für die mit Ueberhitzung arbeitenden Maschinen in Ansatz gebracht werden. Die Kohlenkosten pro Jahrespferdestärke können bei dieser Maschinengröße im mittel zu 70 *M* nach Fig. 24 angenommen werden. Es ist wohl sicher nicht übertrieben, wenn die durch die Anwendung der Ueberhitzung herbeigeführte Ersparnis in den Kohlenkosten zu 10 bis 15 vH angesetzt wird. Dann werden zur Zeit durch die bestehenden Ueberhitzeranlagen jährlich 7 bis 10 Millionen *M* an deutschem Nationalvermögen erspart, eine Zahl, die noch vielleicht auf das Fünffache gesteigert werden könnte, wenn die Ausnutzung der Wärme in allen sich dafür eignenden, in Deutschland betriebenen Dampfmaschinen so weit getrieben würde, wie es durch die Fortschritte der Technik in der letzten Zeit in praktischer Weise ermöglicht worden ist.

Beim Nachdenken über diese Zahlen müssen wir mit Andacht erfüllt werden im Hinblick auf alle die Männer, welche mit der Tiefe ihres Geistes und der Kraft ihres Willens der Menschheit zu solch wertvollen Mitteln zum Kampf ums Dasein und zum Kulturfortschritt verholfen haben.

---