

Auf Grund der vorstehenden Daten kann der Wirkungsgrad des Kessels und die Wärmeverteilung berechnet werden.

Die dem Wasser zugeführte Wärme ermittelt sich nach der Regnaultschen Gleichung (8) (s. S. 12) wie folgt:

Der Dampfspannung 9,465 kg/qcm entspricht für gesättigten Dampf eine Dampftemperatur von  $t = 176,52^{\circ}\text{C}$ . Daher ist die Gesamtwärme  $\lambda_1$  des Dampfes pro Kilogramm:

$$606,5 + 0,305 \cdot 176,52 - 17,75 = 642,59 \text{ Kal.}$$

Bei einer Dampferzeugung von 8,62 kg pro Kilogramm Kohle beträgt die aufzuwendende Wärmemenge:

$$8,62 \cdot 642,59 = 5539 \text{ Kal.}$$

In den Herdrückständen gehen pro Kilogramm Brennmaterial verloren (s. S. 10 und 11):

$$80,35 \cdot 0,4141 \cdot 8,1 = 269,5 \text{ Kal.}$$

Hieraus ergibt sich folgende Wärmeverteilung:

Gesamtwärme von 1 kg Kohle . . . . .	7624	Kal.
Zur Dampfbildung nutzbar gemacht . . . . .	5539	"
In den Herdrückständen verloren . . . . .	269,5	"
Sonstige Verluste (durch freie Wärme im Kamin, Strahlung, unverbrannte Gase usw.)		
7624 - (5539 + 269,5) . . . . .	1815,5	"

Der Nutzeffekt des Kessels ist somit:

$$\frac{5539}{7624} = 0,727.$$

Sämtliche vorstehenden Versuchsdaten und somit auch die berechneten Werte sind Mittelwerte aus zwei unter möglichst gleichen Umständen durchgeführten Dauerversuchen.

(Weitere Beispiele s. Kapitel T.)

## B. Dampfmaschinen.

### I. Allgemeine Versuchsbedingungen.

In dem Kapitel „Dampfmaschinen“ handelt es sich um 1. Feststellung der von der Dampfmaschine abgegebenen mechanischen Nutzarbeit; 2. der indizierten Arbeit; 3. des mechanischen Wirkungsgrades, d. h. des Verhältnisses der durch die Bremsung zu ermittelnden Nutzarbeit zu der durch den Indikator zu bestimmenden indizierten Arbeit; 4. des Dampfverbrauches in bezug auf die indizierte und mechanische Pferdestärke und Stunde; 5. des Wärmewertes des für eine Pferdestärke und Stunde benötigten Dampfes und 6. der Tourenschwankungen bei normaler und bei variabler Belastung.

Als Maßeinheit für die Nutzleistung gilt eine Pferdestärke gleich 75 Sekundenmeterkilogramm. Die Nutzleistung ist dargestellt als die Differenz der indizierten Pferdestärke und der Leistung beim Leerlauf gleich  $N_i - N_e$ . Der mechanische Wirkungsgrad ergibt sich aus der Beziehung:

$$(1) \dots \dots \dots \frac{N_i - N_e}{N_i}$$

Diese zwei letzten Relationen werden nur benutzt, wenn die Untersuchungen der Dampfmaschine und des elektrischen Teiles getrennt erfolgen und die einzelnen Maschinen einer Anlage in der Fabrik geprüft werden. Wo in den unten folgenden Beispielen vollständige Zentralstationen, bestehend aus Dampfkessel, Dampfmaschine und Dynamo, in Frage kommen, konnten die verschiedenen Untersuchungen zu einem Ganzen — und zwar ausgehend von der in der Kohle aufgespeicherten Wärmeenergie bis zu der nutzbaren elektrischen Energie — vereinigt werden. In diesem Falle wird die Nutzarbeit der Dampfmaschine — unter Zuhilfenahme des vorherbestimmten Wirkungsgrades der Dynamo unter den gewünschten Belastungsverhältnissen — aus der elektrischen Arbeit ermittelt. Die Nutzarbeit bei unmittelbarer Kuppelung der Dynamo mit der Dampfmaschine ist gegeben durch die Beziehung:

$$(2) \dots \dots \dots \frac{\text{elektrische Arbeit in Watt}}{0,736 \cdot y_D},$$

in welcher  $y_D$  den Wirkungsgrad der Dynamo für die betreffende Belastung darstellt. Kommt ein Riemen- oder Seiltrieb zwischen Kraftmaschine und Dynamo in Frage, so sind die Kraftverluste in der Übertragung zu berücksichtigen; dieselben sind sehr verschieden je nach der Anordnung, den Dimensionen und den Eigenschaften des Übertragungsmittels und dem Übersetzungsverhältnis der Übertragung. Bei den meistens vorkommenden Riemenübertragungen schwanken die Kraftverluste zwischen 3,0 bis 7,5 Proz. und werden dieselben meistens unterschätzt. Im Mittel muß man schon mindestens 4 Proz. annehmen. Vielfach besteht sogar eine dreistufige Übersetzung — Riemen, Vorgelege, Riemen. Die Nutzeffekte dieser Übertragungen können nach vielen praktischen Untersuchungen meinerseits nicht höher als 87 Proz. eingesetzt werden. Da vielfach die Übertragungsriemen nicht ausreichend stark gewählt sind, so daß bei größter Inanspruchnahme ein starkes Rutschen eintritt, so gehen die Nutzeffekte der dreistufigen Transmission sogar auf 85 bis 83 Proz. herunter und werden bei längeren Vorgelegen — wie dieselben in alten Anlagen viel vorkommen — oft noch ungünstiger. Nach diesen Darlegungen ermittelt sich die Nutzarbeit der Dampfmaschine bei direktem Riemenantrieb bzw. bei Übertragung zweier Riemen mit Vorgelege aus den Relationen:

$$(3a) \dots \dots \frac{\text{elektrische Arbeit}}{y_D \cdot 0,736 \cdot 0,96} \quad \text{bzw.} \quad (3b) \dots \dots \frac{\text{elektrische Arbeit}}{y_D \cdot 0,736 \cdot 0,87}$$

Wie oben gesagt sind dies Mittelwerte unter günstigen Verhältnissen. Falls Gelegenheit geboten ist, so wird es sehr zweckmäßig sein, die Kraftverluste der Übertragung nach einer indirekten Methode gesondert festzustellen. Falls keine direkte Kuppelung der Dynamo mit der Dampfmaschine vorhanden ist und man die Nutzeffekte der Übertragung durch Riemen und Vorgelege nicht genügend genau feststellen kann, so ist die Bestimmung der Nutzarbeit der Dampfmaschine mittels der Bremse am genauesten, obgleich diese Ermittlung auch sehr leicht Fehlerquellen enthalten kann. Sehr häufig ist die Methode durch direkte Bremsung durch die lokalen Verhältnisse schwer bzw. gar nicht durchzuführen oder ist mit großen Gefahren verbunden, so daß man auf die eben beschriebene Ermittlung der Nutzarbeit auf elektrischem Wege allein angewiesen ist. Die Bestimmung der Nutzarbeit der Dampfmaschine mit den verschiedenen Bremsapparaten ist ausführlich besprochen sub VI, S. 44 u. f. Bei der Prüfung der Dampfmaschine sollen genaue Angaben über die Bauart der Maschine, Zylinderdimensionen, die Abmessungen des schädlichen Raumes, den Kolbenhub, die normale Tourenzahl, zulässige Tourenschwankungen bei verschiedenen Belastungsschwankungen und im normalen Betriebe, Ungleichförmigkeitsgrad, die normale Spannung und Temperatur des Dampfes für die Dampfmaschine, sowie die maximale Spannung, die Leistung, für welche der Dampfverbrauch und der Wirkungsgrad garantiert sind, die maximale Leistung und die entsprechenden Füllungsgrade, den garantierten Dampfverbrauch pro indizierte Pferdekraftstunde und pro effektive Pferdekraftstunde, den garantierten mechanischen Wirkungsgrad, Temperatur und Kühlwasser- bzw. Einspritzwassermenge und das entsprechende Vakuum, die Dimensionen der Dampfzu- und -ableitungsrohre, die Entwässerungsvorrichtungen, Dampfkanalweiten, Dimensionen der Luftpumpe und Betriebsverhältnisse sowie Bauart des betreffenden Dampfkessels gemacht werden. Die Dampfverbrauchsprüfungen sollen erst begonnen werden, wenn der Beharrungszustand in der Maschine vorhanden ist. Die Belastung der Maschine, Tourenzahl, Dampfspannung, Überhitzungstemperatur usw. sind tunlichst auf gleicher Höhe während der ganzen Versuchszeit zu erhalten. Hubzähler dienen zur Feststellung der Tourenzahl, deren Stand während des Versuches häufiger notiert wird. Bei größeren Belastungsschwankungen ist eine Kontrolle der Tourenzahlschwankungen mittels Tachographen notwendig. Wasserstand, Kesselspannung, Dampfspannung und Temperatur direkt vor der Maschine und im Ausströmröhr direkt hinter dem Dampfzylinder und im Kondensator, sowie die Temperatur des Einspritz- oder Kühlwassers und Ausflußkondensationswassers sind etwa alle 15 Minuten zu notieren. Auch ist der Barometerstand zu beobachten. Diagramme sind zu gleichen Zeiten mit den anderen Notierungen, also etwa alle 15 Minuten bzw. bei größeren Belastungsschwankungen noch häufiger an jedem Zylinderende abzunehmen. Über die Bestimmung der wirksamen Kolbenfläche

und des mittleren indizierten Druckes verweise ich auf Abschnitt BII, S. 25 bzw. BIII, S. 34 u. f.

Der Dampfverbrauch wird aus der gewogenen Wassermenge bestimmt; die Ermittlung aus dem Diagramm hat lediglich theoretisches Interesse. Bei Oberflächenkondensation gibt das niedergeschlagene Dampfquantum ein Maß für den Dampfverbrauch. Das Dampfleitungs-kondensat muß vor dem Eintritt in die Maschine abgelassen und von dem Speisewasserquantum in Abzug gebracht werden; dasselbe muß genügend auf etwa 30 bis 40° C abgekühlt werden, so daß eine Wieder- verdampfung desselben ausgeschlossen ist. Entnommener Dampf zum Betriebe der Dampfmaschine — oder deren Abdampfmenge, welche direkt mit der Speisewassermenge in Verbindung steht — aus demselben Dampfkessel, welcher auch den Dampf für die zu prüfende Dampfmaschine hergibt, muß genau ermittelt werden können; anderenfalls muß die Speisung des Kessels anderweitig erfolgen. Der Wärmewert des für 1 PS und Stunde verwendeten Dampfes wird festgestellt aus der Regnaultschen Formel, welche den Wärmewert von 1 kg verbrauchtem Dampf darstellt. Dieselbe lautet:

$$(4) \dots\dots\dots 606,5 + 0,305 t_s + c_p'' (t_{ii} - t_s) \text{ WE.}$$

In dieser Formel bezeichnet:

- $t_s$  Sättigungstemperatur des betreffenden einströmenden Dampfes direkt vor der Dampfmaschine;
- $c_p''$  spezifische Wärme des Dampfes und
- $t_{ii}$  Temperatur des überhitzten Dampfes.

Der Wert  $c_p''$  ist vom Druck und von der Temperatur abhängig und muß für unsere modernen Dampfmaschinenanlagen nach den neueren Untersuchungen von Knoblauch, Linde und Klebe zu 0,57 bis 0,60 — je nach Druck und Temperatur angenommen werden. Bei Ermittlung des Wärmewertes für 1 PS-Stde. ist 0° als Speisewasseranfangstemperatur anzunehmen.

In dem Lieferungsvertrag sind alle technischen Garantien und auch die Toleranzen auf die einzelnen Garantien nicht nur bei der Normalleistung, sondern auch bei größeren und kleineren Leistungen festzulegen. Ist vor der Prüfung oder im Vertrag keine Toleranz vereinbart, so sind 5 Proz. geringere bzw. ungünstigere Werte als die garantierten zulässig. Die Versuche bei Brennstoff- und Dampfverbrauchsermittlungen sind auch dann noch als normal zu bezeichnen, wenn die Belastungsschwankungen im Mittel nicht über  $\pm 7,5$  Proz. bzw. im einzelnen nicht über  $\pm 15$  Proz. von den vereinbarten Werten — Beanspruchung oder Belastung bezüglich der Brennstoff- und Dampfverbrauchsökonomie — abweichen. Sind viel größere Schwankungen im einzelnen eingetreten, so muß der Versuch von neuem unter günstigeren Verhältnissen in bezug auf die festgelegten Garantiewerte begonnen werden. Über den Beginn und die Dauer der Versuche gelten die Angaben sub AI über Dampf-

kesselversuchsbedingungen. Bei einzelnen Anlagen verdient vermöge der Vertragsbestimmungen der eine oder andere Teil der Anlage besonderes Interesse und wurde alsdann nur dieser einer eingehenden Prüfung unterzogen. Für die Untersuchungen selbst gelten die Grundsätze und Anleitungen, welche von dem Verein Deutscher Ingenieure, dem Internationalen Verbands der Dampfkesselüberwachungsvereine und dem Verein Deutscher Maschinenbauanstalten festgestellt sind; dieselben sind in obigen Ausführungen in allen Hauptmomenten berücksichtigt worden. Um dem Leser ein Urteil über gute und schlechte Maschinen zu gewähren, haben naturgemäß auch die Prüfungen an letzteren Aufnahme gefunden.

## II. Theoretischer Teil.

Die indizierte oder theoretische Leistung einer Dampfmaschine ist die Arbeit, welche der Dampf direkt auf den Kolben bei normaler Tourenzahl bzw. Kolbengeschwindigkeit überträgt. Diese Leistung ist aus den Indikatordiagrammen zu berechnen. Die Art der Dampfverteilung, wie dieselbe aus dem Diagramm hervorgeht, ist im Abschnitt IV, S. 38 näher besprochen. Die Reibungswiderstände der Maschinenteile kommen bei der indizierten Leistung nicht zur Geltung. Die mittlere Spannung  $p_r$  zur Überwindung der Reibungswiderstände ist nach Werner:

$$(5) \dots \dots \dots p_r = 0,08 \cdot (2,35 + p_i),$$

woselbst  $p_i$  die mittlere indizierte Spannung bedeutet.

Bezeichnet  $n$  die Tourenzahl,  $s$  den Kolbenhub in Meter,  $O$  die wirksame Oberfläche des Kolbens in Quadratmeter, so ist die indizierte Leistung der Dampfmaschine gegeben durch:

$$(6) \dots \dots N_i = \frac{O \cdot 10000 \cdot p_i \cdot 2 \cdot s \cdot n}{60 \cdot 75} = 4,444 \cdot p_i \cdot O \cdot n \cdot s.$$

Es sei  $d$  der innere Durchmesser des Zylinders,  $d_s$  der Durchmesser der Kolbenstange in Meter, so gilt für die wirksame Kolbenfläche:

$$(7) \dots \dots O = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 - \frac{\pi}{4} \cdot d_s^2 = \frac{\pi}{4} (d^2 - d_s^2).$$

Ist die Kolbenstange nicht durchgehend oder hat dieselbe auf einer Seite einen anderen, kleineren Durchmesser wie  $d_s$ , so ist die wirksame Kolbenfläche auf beiden Seiten verschieden. Ist  $O_k$  bzw.  $O_d$  die Kolbenfläche auf der Kurbel- bzw. Deckelseite, so sind die indizierten Pferdestärken  $(N_i)_k$  und  $(N_i)_d$  (entsprechend den mittleren indizierten Spannungen  $(p_i)_k$  und  $(p_i)_d$ ):

$$(8a) \dots \dots (N_i)_k = 2,222 (O)_k \cdot n \cdot s \cdot (p_i)_k$$

und

$$(8b) \dots \dots (N_i)_d = 2,222 (O)_d \cdot n \cdot s \cdot (p_i)_d.$$