

schnitte desselben am Ausgang und dem engsten Punkte, die hauptsächlichsten Querschnitte der Feuerzüge und der mittlere Zugquerschnitt aller in Frage kommenden Absperrvorrichtungen. Vor dem definitiven Versuch ist eine Dichtheitsprobe und Reinigung des Kessels vorzunehmen und derselbe sodann ein bis drei Tage unter den normalen Verhältnissen — bezüglich Brennstoff und Beanspruchung — in Betrieb zu nehmen. Dampfdruck und Wasserstand sind tunlichst während der Prüfung auf derselben Höhe zu erhalten. Notierungen über Gas- bzw. Dampftemperatur sollen vor und hinter dem Überhitzer bzw. direkt hinter dem Überhitzer etwa alle 10 bis 20 Minuten erfolgen. Unerläßliche kleine Änderungen des Dampfdruckes und Wasserstandes sind entsprechend bei der Berechnung zu berücksichtigen.

Zur Beurteilung der oben näher bezeichneten Leistungsziffern einer Kesselanlage (sub 1 bis 4) sind eingehende Untersuchungen bezüglich der Kohlenmenge, der Zusammensetzung der Kohle, des Heizwertes derselben, der Zugstärke bzw. der Luftmenge, der Temperatur der in die Feuerung eintretenden Luft und der Heizgase an verschiedenen Stellen der Feuerzüge, der Menge und des Wärmeverlustes der Herdrückstände, Wärmeverluste der abgehenden Heizgase, Schornsteinverluste, Wärmebilanz der Speisewassermenge und der zur Verdampfung nötigen Wärme, der Dampfeuchtigkeit und der Dampfspannung erforderlich. Diese Untersuchungen sind sub 1 a bis g und 2 a bis c näher erläutert. Anschließend hieran ist sub 3 ausgeführt, wie sich aus den Resultaten von 1 und 2 der Nutzeffekt der Kesselanlage ermitteln läßt.

Zu diesen Ausführungen verweise ich auch auf die Normen für Leistungsversuche an Dampfkesseln, aufgestellt vom Verein deutscher Ingenieure, dem Internationalen Verbands der Dampfkesselüberwachungsvereine und dem Vereine deutscher Maschinenbauanstalten, welche bei den obigen Darstellungen mit als Grundlage dienen.

II. Gang der Untersuchung.

1 a. Kohlenmenge.

Das benötigte Brennmaterial wird auf einer genauen Wage abgewogen. Das Versuchspersonal muß überwachen, daß der Heizer nur die ihm zugewogene Kohle verheizt. Um den Fehler, welcher durch Ungleichheit der zu Anfang und am Schlusse der Versuche auf dem Roste befindlichen Kohlenmenge bedingt ist, möglichst auf ein Minimum zu beschränken, läßt man das Feuer, nachdem es etwa eine Viertelstunde vor Beginn und vor Schluß der Versuche gereinigt worden ist, so weit niederbrennen, daß der Rost nur noch mit einer dünnen Schicht glühender Koke bedeckt ist. Von jeder Kohlenzufuhr wird behufs späterer Untersuchung eine Probe in luftdicht verschlossenen Gläsern oder verlöteten Blechdosen aufbewahrt; aus dem Gesamtmaterial nimmt

man dann eine Durchschnittsprobe, wobei man am besten folgendermaßen verfährt:

Das zerkleinerte Brennmaterial wird quadratisch ausgebreitet und durch Diagonallinien in vier Teile geteilt. Zwei gegenüberliegende Teile werden fortgenommen und die beiden anderen Teile in gleicher Weise wie zuvor behandelt; diese Anordnung wird so oft wiederholt, bis eine Probemenge von etwa 5 bis 10 kg übrig bleibt, welche dann zur chemischen Untersuchung gelangt (s. hierzu 1b und 1c). Nach jeder neuen Materialzufuhr wird das Gewicht der Verbrennungsrückstände festgestellt und am Schlusse des Versuchstages eine Durchschnittsprobe von der Asche und Schlacke zur späteren Untersuchung (s. sub 1g) entnommen.

1b. Zusammensetzung der Kohle.

Der Gehalt des Brennmaterials an Asche, hygroskopischem Wasser, Sauerstoff, Kohlenstoff, Wasserstoff und Schwefel wird durch chemische Analyse ermittelt. — Die Bestimmung des Wassergehaltes geschieht aus einer Anzahl während der Versuche gesammelter Proben des Brennstoffes, welche in luftdicht verschlossenen Gläsern oder Blechbüchsen bis zur Untersuchung aufzubewahren sind.

1c. Heizwert der Kohle.

Ist in 1 kg Kohlenmaterial:

C kg Kohlenstoff,	H kg Wasserstoff,
S „ Schwefel,	O „ Sauerstoff
W „ Wasser	

enthalten, so erfolgt die Berechnung des Heizwertes nach der Annäherungsformel:

$$(1) \dots 8100 C + 29000 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2500 S - 600 W \text{ WE (Kal.)}$$

Außer der Heizwertbestimmung durch chemische Analyse verwendet man eine direkte — die kalorimetrische — Methode. Von der zu untersuchenden Kohle, z. B. Steinkohle, wird eine kleine Probe, die möglichst der Durchschnittsbeschaffenheit zu entsprechen hat, in einem geeigneten, allseitig gut schließenden und starken Gefäß, der sog. Bombe, zur vollständigen Verbrennung gebracht; das Gefäß selbst taucht in einen Wasserbehälter mit schlecht leitender Einpackung. Aus der Temperaturerhöhung des Wassers wird unter Berücksichtigung der Gewichte und spezifischen Wärmen von Wasser, Gefäß und Behälter der Heizwert berechnet.

Sind z. B. die genannten Werte folgende:

	Gewicht in Kilogramm	Spezifische Wärme
Wasser	100	1
Verbrennungsgefäß	10	0,1
Wasserbehälter	20	0,1;

ist ferner das Gewicht der verbrannten Steinkohle 0,1 kg, die Temperaturerhöhung des Wassers etwa 7° C, so beträgt die erzeugte Wärmemenge in Kalorien:

$$W = (100 \cdot 1 + 10 \cdot 0,1 + 20 \cdot 0,1) 7 \cdot \frac{1}{0,1} = 7210,$$

somit ist der Heizwert der untersuchten Steinkohle:

$$7210 \text{ Kal.}$$

1 d. Zugstärke bzw. Luftmenge.

Zur Bestimmung der zur Verbrennung erforderlichen Zugstärke dient der Siegert-Dürrsche Zugmesser oder ein von F. Fischer konstruierter Apparat; letzterer besteht im wesentlichen aus einem U-förmigen Rohre, montiert auf einem Brette, auf welchem noch ein Maßstab eingesetzt ist, der sich in einem 4 mm tiefen Ausschnitt verschieben läßt. Bei Benutzung des Apparates wird das Rohr bis zur Hälfte mit gefärbtem Wasser gefüllt und der Maßstab so verschoben, daß der Nullpunkt mit dem unteren Meniskus der Flüssigkeit in beiden Schenkeln zusammentrifft. Ein Schenkel des Rohres ist in der Luft, der andere wird durch einen Gummischlauch mit dem Schornsteininnern verbunden und der Höhenunterschied beider Flüssigkeitsspiegel in Millimeter-Wassersäule, d. h. die Zugstärke, bestimmt.

Auf theoretischem Wege ergibt sich die erforderliche Luftmenge wie folgt:

1 kg Brennmaterial erfordert zur vollständigen Verbrennung:

$$(2a) \dots \dots \frac{8}{3} C + 8 H + S - O \text{ kg Sauerstoff,}$$

$$(2b) \dots \text{ oder } \frac{\frac{8}{3} O + 8 H + S - O}{1,43} \text{ cbm Sauerstoff.}$$

Dies entspricht bei 21 Proz. Sauerstoffgehalt der Atmosphäre einem theoretischen Luftvolumen von:

$$(3) \dots \dots L = (\frac{8}{3} C + 8 H + S - O) \cdot \frac{100}{30} \text{ cbm.}$$

Dieses rein theoretische Resultat ist für die Praxis nicht ausreichend, weil der Luft niemals ihr ganzer Sauerstoff vom Brennmaterial entzogen werden kann, da die Herstellung der Verbindung aller Teilchen der Luft mit allen Teilchen des Brennmaterials unmöglich ist. Man muß mindestens das Doppelte der angegebenen Luftmenge zuführen, um eine gänzliche Verbrennung der Kohle zu erzielen. (Näheres hierüber s. S. 10.)

1 e. Temperatur der in die Feuerung eintretenden Luft und der abziehenden Gase.

Die Temperatur der in die Feuerung eintretenden Luft wird nahe derselben gemessen, jedoch ist bei der Temperaturbestimmung das Thermometer vor Wärmestrahlung des Rostes zu schützen. Die Tem-

peraturbestimmung der Gase, die den Kessel verlassen, — also vor dem Rauchschieber mitten im Gasstrom — geschieht durch Quecksilberpyrometer mit Stickstofffüllung, deren Angaben mit einem Normalthermometer verglichen und korrigiert werden. Die Ablesungen des Thermometers erfolgen am besten bei Entnahme der Gasproben. Übersteigt die Temperatur 360°C , so muß das Kalorimeter zu Hilfe genommen werden.

1f. Heizgasuntersuchung.

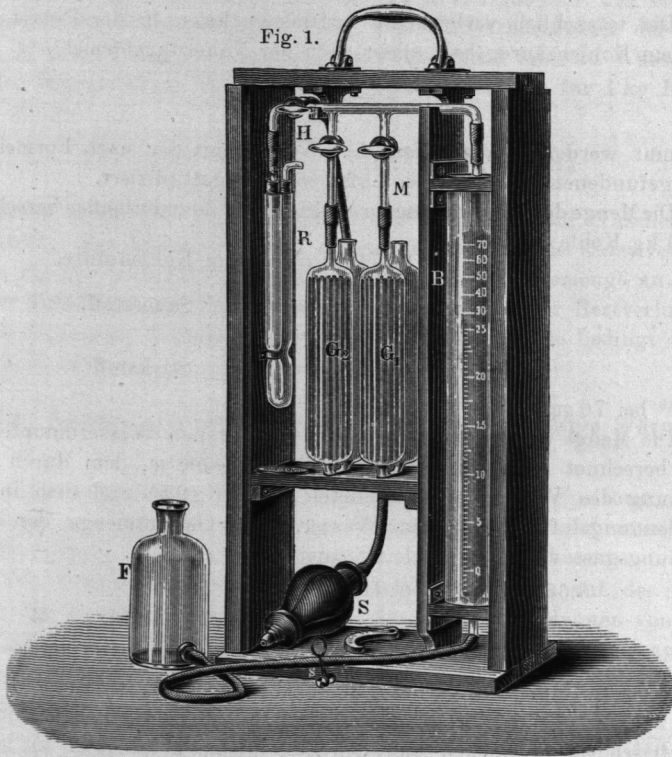
Bei vollständiger Verbrennung geben die Brennmaterialien nur Kohlensäure und Wasser; bei unvollkommener bilden sich Kohlenoxyd, Kohlenwasserstoff und auch freier Wasserstoff. Zur Feststellung des Gehaltes der Rauchgase müssen dieselben am Eintritt in den Schornstein vermittelst eines Aspirators abgesaugt werden; diese angesaugten Gase werden entweder in Glasröhren eingeschmolzen oder direkt in den Untersuchungsapparat eingeführt. Die aufgefangenen Rauchgase werden durch ein Glasrohr, welches in etwa 15 cm Länge mit Asbest gefüllt ist — wie zur Analyse organischer Körper gebräuchlich —, angesaugt. Der so erhaltene Ruß wird im Sauerstoffstrom verbrannt und aus der dabei entstandenen Kohlensäure der Kohlenstoff berechnet. Bei sehr starkem Rauche enthalten die Rauchgase etwa 2 Proz. des Kohlenstoffes der konsumierten Kohle.

Zur genauen analytischen Untersuchung der Rauchgase dient die von Dr. H. Bunte konstruierte Gasbürette (Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung 1877), der Orsatsche Apparat von F. Fischer (Dinglers Polytechn. Journal, Bd. 227, S. 258) und ein neuerer Apparat von der Firma Abt, Eberhardt u. Jäger in Ilmenau. Letzterer ist in Fischers Handbuch „Die chemische Technologie der Brennstoffe“ näher beschrieben, und entnehme ich zur Erläuterung dieser Untersuchungen folgendes (s. hierzu Fig. 1):

Der die Bürette *B* umgebende Hohlraum und die Flasche *F* werden mit destilliertem Wasser gefüllt. In das Gefäß *G*₁ werden etwa 110 bis 120 ccm Kalilauge von etwa 1,27 spez. Gew. gegossen. Eine Mischung von 18 g Pyrogallussäure, welche in etwa 40 ccm heißem Wasser gelöst ist, und 70 ccm Kalilauge wird zum Lösen des Sauerstoffes in das Gefäß *G*₂ gegossen. Die Bürette *B* wird bis Teilstrich 100 durch Heben der Flasche *F* mit Wasser gefüllt, sodann stellt man den Hahn *H* so, daß ein Durchgang von dem Gummisauger *S* durch Rohr *R* mit dem Rauchkanal erfolgt, und läßt den Sauger so lange in Wirkung treten, bis die Füllung der Leitung sicher eingetreten ist. Hierbei wird mit der linken Hand das etwa 20 malige Zusammendrücken des Saugers und mit der rechten Hand der Schluß des Röhrenaufsatzes bewirkt, usw. Wenn das Gewünschte erfolgt ist, stellt man den Hahn *H* wagerecht, öffnet den Querhahn und senkt die Flasche *F*, so daß sich die Bürette *B* vollständig mit Rauchgas füllt; sodann wird der Hahn *H* wieder ge-

geschlossen, und das betreffende Rauchgas befindet sich zwischen den Glashähnen und der Wassersäule in *B* verschlossen. — Zur Ermittlung der Kohlensäure wird der Hahn von Gefäß G_1 geöffnet und Flasche *F* gehoben, so daß bei Öffnung des Quetschhahnes das Gas in die Flasche G_1 übergeht; bei Niedersenken der Flasche *F*, bis die Kalilösung in Gefäß G_1 unter Marke *M* geht, wird das Gas durch Heben von *F* nochmals in das Kaligefäß getrieben. Durch Niedergehen mit Flasche *F* und Öffnen des Quetschhahnes steigt die Kalilauge wieder bis zu *M*; sodann schließt

Fig. 1.



man den Glashahn, öffnet den Quetschhahn und hält die Flasche *F* so, daß das Wasser in beiden Gefäßen gleich hoch steht, schließt den Quetschhahn und notiert das zurückgebliebene Gasvolumen. Der Sperrwasserstand zeigt den Kohlensäuregehalt des Gases in Prozenten an. In analoger Weise wird das Gefäß G_2 verwendet, bis keine Volumenabnahme mehr eintritt. Nach Einstellung zeigt die Ablesung die Kohlensäure- und Sauerstoffmenge zusammen an.

Die nachfolgenden Formeln, für die Menge der Verbrennungsgase und der zugeführten Luft, sind dem Ingenieur-Taschenbuch „Hütte“ entnommen.

Ergab die Gasanalyse:

k	Proz.	Kohlensäure,
o	"	Sauerstoff,
n	"	Stickstoff,

so ist das Verhältnis der gebrauchten Luftmenge zu der theoretisch erforderlichen

$$(4a) \dots \dots \dots v = \frac{21n}{21n - 79 \cdot o} = \frac{21}{21 - 79 \frac{o}{n}}$$

Die tatsächlich verbrauchte Luftmenge kann in der Praxis auch aus dem Kohlensäuregehalt allein nach der Näherungsformel:

$$(4b) \dots \dots \dots \dots \dots v = \frac{18,9}{k}$$

bestimmt werden, indem man den Wert v mit der nach Formel (3), S. 7, gefundenen theoretischen Luftmenge L multipliziert.

Die Menge der Verbrennungsprodukte wird folgendermaßen berechnet:

1 kg Kohle gibt:

$$(5) \dots \dots \dots \left\{ \begin{array}{l} 1,854 \cdot C = K \text{ cbm Kohlensäure,} \\ K o \frac{1}{k} = O \text{ " Sauerstoff,} \\ K n \frac{1}{k} = N \text{ " Stickstoff} \end{array} \right.$$

von 0° bei 76 cm Druck.

Die Menge des in den Rauchgasen enthaltenen Wasserdampfes W wird berechnet aus dem Wassergehalt der Kohle w , dem durch Verbrennung des Wasserstoffs gebildeten Wasser ($9h$) und dem in der Verbrennungsluft enthaltenen Wasser. Die Gesamtmenge der Verbrennungsgase von 1 kg Kohle ist somit:

$$(6) \dots \dots 3,667 \cdot C + 1,430 \cdot O + 1,257 \cdot N + W \text{ kg} \\ = K + \frac{K \cdot (o + n)}{k} + \frac{W}{0,805} \text{ cbm.}$$

Wo man Undichtheiten des Mauerwerkes vermutet, ist es empfehlenswert, zur Feststellung derselben den Rost mit stark rauchendem Brennstoff frisch zu beschicken und den Zugschieber geschlossen zu lassen oder die offene Flamme eines am Mauerwerk entlang geführten Lichtes zu beobachten. Tritt Rauch durch die Mauerfugen, bzw. wird das Licht angesaugt, so ist obige Vermutung bestätigt.

1g. Ermittlung der Menge und des Wärmeverlustes der Herdrückstände, sowie der Wärmeverluste durch die abgehenden Heizgase, durch Strahlung, Leitung, Ruß und unverbrannte Gase.

Die Herdrückstände (Schlacken, Asche) werden während des Versuches gesammelt, an einem trockenen Orte aufbewahrt und am Ende des Versuches gewogen. Bei Bestimmung des Heizwertes bzw. des Wärme-

verlustes der Herdrückstände werden für jedes Gramm Kohle, das dieselben nach Ausweis der chemischen Untersuchung noch enthielten, 8,1 WE gerechnet. Bei der Berechnung muß die ev. Feuchtigkeit der Kohle berücksichtigt bzw. in Abzug gebracht werden. Das Verhältnis des Heizwertes der benutzten Kohle zu dem Wärmeverlust der Herdrückstände, bezogen auf die Einheit, ergibt den Wärmeverlust in Prozenten von dem Gesamtwärmevermögen. — Bedeutet A_n den Temperaturunterschied zwischen den Heizgasen und der Außenluft, 0,32 bzw. 0,48 die spezifischen Wärmen für 1 cbm Heizgas bzw. 1 kg Wasserdampf, C den Kohlenstoffgehalt, K den Kohlensäuregehalt der Heizgase, H bzw. W den Prozentgehalt an Wasserstoff bzw. an Wasser, so ist der Wärmeverlust durch die abziehenden Heizgase für 1 kg Brennstoff gleich:

$$(7) \dots \dots \left(0,32 \cdot \frac{C}{0,536 \cdot K} + 0,48 \cdot \frac{9H + W}{100} \right) \cdot A_n$$

(s. hierzu sowie über Schornsteinverluste das Ingenieur-Taschenbuch „Hütte“). Zur Feststellung der Wärmebilanz sind die Einzelverluste, sowie die zur Dampfbildung nutzbar gemachte Wärmemenge an Hand obiger Erläuterungen und Formeln zu ermitteln. Der Restverlust ist durch Strahlung, Leitung, Ruß und unverbrannte Gase bedingt (siehe sub 3, S. 16).

2a. Speisewassermenge und zur Verdampfung nötige Wärme (Kesselspeisewassermesser).

Injektorspeisungen und Dampfpumpenbetrieb zur Speisung, deren Abdampf mit dem Speisewasser in Verbindung steht, sind unzulässig. Die Speisungen sind tunlichst ununterbrochen vorzunehmen.

Die Wägung des Speisewassers erfolgt in einem auf der Wage stehenden Behälter, in welchen man das Wasser in Mengen von etwa 500 bis 1000 kg aus der Leitung bzw. dem Wasserreinigungsapparat einlaufen läßt. Behufs späterer Kontrolle muß die Zeit der Wägung, sowie Beginn und Ende einer jeden Speisung notiert werden. — Die Richtigkeit der Wage muß geprüft und ein ev. Fehler in Korrektion gebracht werden.

Um weitere Korrektionen zu vermeiden, wird jeder Versuch so lange fortgesetzt, bis Wasserstand und Dampfspannung die gleichen sind wie zu Anfang des Versuches. Ferner ist es zu vermeiden, kurz vor Beginn bzw. Schluß der Versuche den Kessel längere Zeit zu speisen, da dann gleiche Mischungs- und Temperaturverhältnisse schwer zu erzielen sind. Wenn obige Momente beobachtet werden, so wird der Wasserstand am Anfang und Schluß der Versuche nur wenig schwanken, und außerdem wird die Temperatur und der Dampfgehalt des Kesselwassers in beiden Fällen nahezu gleich sein. Die durch ungleiche Wasserstandshöhe verursachten Fehler sind somit zu vernachlässigen.

Eventuell auftretendes Tropfwasser muß in den Speisewasserbehälter zurückgeführt werden. Rücklauf des Kesselwassers in den Speisewasserbehälter — bedingt durch undichte Ventile — muß vermieden werden. Nicht benutzte, mit dem Kessel zusammenhängende Leitungen müssen durch Blindflanschen abgeschaltet werden, damit der Zutritt von nicht gewogenem bzw. Austritt von nicht verdampftem Wasser unmöglich ist. Die Temperatur ist bei jeder Wägung des letzteren zu messen. Die Gesamtwärme des gesättigten Wasserdampfes, d. h. die Summe aus Flüssigkeits- und Verdampfungswärme (s. Des Ingenieurs Taschenbuch „Hütte“) wird durch die Regnaultsche Formel:

$$(8) \dots \lambda_1 = 606,5 + 0,305 t - s \text{ WE}$$

ermittelt. Hierin bedeutet

t die der Fliegnerschen Tabelle entnommene Dampftemperatur und s die mittlere Speisewassertemperatur.

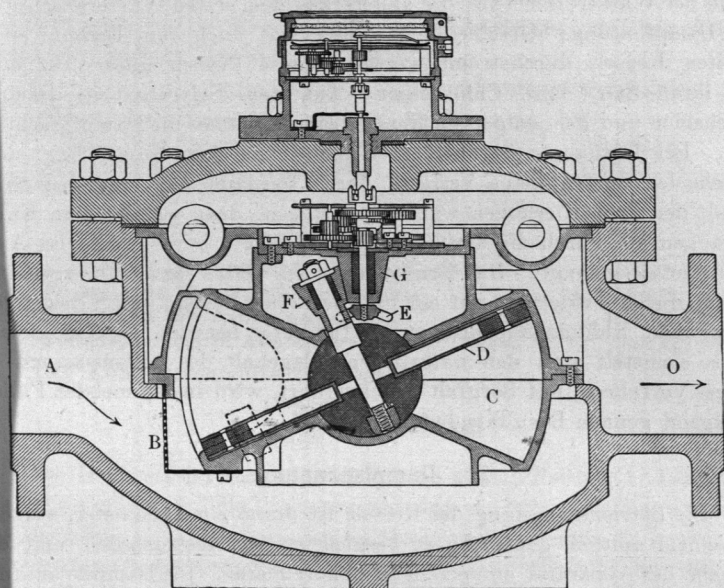
Da beim Dampfkesselbetrieb die Messung des Kesselspeisewassers zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der Anlage eine große Rolle spielt, so will ich kurz einen geeigneten Messer in Konstruktion und Wirkungsweise beschreiben. Es ist dies der Scheibenwassermesser von Siemens u. Halske¹⁾. Dieser Messer bestimmt das Durchflußwasser unmittelbar nach dem Volumen. Eine hohl gegossene, mit Graphitkohle ausgelegte Metallscheibe ruht auf einem Kugelgelenk und ist von einem Gehäuse umschlossen, dessen Gestaltung der Scheibenbewegung angepaßt ist. Die Scheibe bewegt sich auf den Kugelflächen und mit der Peripherie an den Gehäuseseitenwänden vorbei und teilt den vom Scheibenkammergehäuse umgebenen Meßraum in zwei gleiche Räume — den unteren und oberen —, die nebeneinanderliegenden Einströmungs- und Ausströmungsöffnungen sind getrennt durch eine senkrechte, von der Peripherie nach dem Kammermittelpunkt gehende Scheidewand, welche in einen entsprechenden Meßscheibenschlitz eingreift und vermeidet, daß sich die Scheibe um die Vertikalachse dreht, und auch, daß das Wasser ohne Einwirkung auf die Scheibe ungemessen den Meßraum durchläuft. Beim Durchfluß des Meßraumes hat das Wasser eine bestimmte Richtung einzuhalten und wird die Scheibe in eine oszillierende Bewegung gebracht, so daß bei jeder Oszillation der Scheibe eine Wassermenge, entsprechend dem Nutzinhalt der Scheibenkammer, abläuft. — Der Wasser-einlaß erfolgt bei A ; sodann tritt das Wasser durch das entsprechend große Sieb B und läuft, die Meßkammer ganz umspülend, in die Scheibenkammer C . Beim Durchfluß der Kammer wird Scheibe D , welche kugelförmig gelagert ist, in eine oszillierende Bewegung gebracht, welche mittelst Führungsrolle F und Mitnehmer E auf Zähl- und Zeigerwerk übertragen wird. Die Scheibe wird durch die Konusse G und F so geleitet, daß ein guter Abschluß zwischen Scheibe und Kammer besteht

¹⁾ Nachrichten der Siemens u. Halske-Werke.

und somit ein Durchfluß von ungemessenem Wasser vermieden wird. Eine Umdrehung des Mitnehmers *E* entspricht einer vollständigen Scheibenbewegung und einer Wasserdurchgangsmenge gleich dem Nutzinhalt der Scheibenkammer; das Volumen des Wassers ist somit genau festgestellt. Nach Durchgang des Wassers durch die Scheibenkammer fließt dasselbe durch die Austrittsöffnung und den Messer am Ausgangsstutzen *O* ab. Am Zifferblatt werden die Durchflußmengen abgelesen (s. hierzu Fig. 2).

Da bei dem Kesselspeise-Scheibenmesser eine verschiedene Ausdehnung auf Grund ungleicher Erwärmung nicht erfolgt, so ist auch bei variablen und schwankenden Speisewassertemperaturen ein gutes

Fig. 2.



Funktionieren sicher. Umständliche Übertragungsmechanismen und große Abnutzung sind bei diesem Apparat nicht vorhanden; daher sind die Unterhaltungskosten gering. Die reibenden Teile sind aus Graphitkohle hergestellt, und ist sehr geringe Abnutzung gewährleistet. Ein Ölen der Lagerstellen ist selbst bei hoher Speisewassertemperatur nicht erforderlich; somit ist man nicht abhängig von der Wartung des Apparates. Die Meßgenauigkeit ist selbst bei kleinen Durchflußmengen groß; dieselbe beträgt z. B. bei einem Apparat von 100 cbm pro Stunde bei einer Durchflußmenge von 0,8 cbm noch ± 2 Proz. Auch ist die Genauigkeit nicht abhängig von den wechselnden Betriebsverhältnissen, wie dieses bei den Flügelradmessern der Fall ist.

Der Messer ist in die Druckleitung mit Umgangsleitung einzubauen, damit jederzeit eine Reinigung erfolgen kann; in die Saugleitung darf

der Messer nur gelegt werden, wenn der Pumpe das Wasser mit mindestens 2 m Druck zuläuft. Die Apparate können, falls die Anzeigewerte von einer entfernten Stelle kontrolliert werden sollen, sehr leicht mit elektrischer Fernregistrierung versehen werden.

2 b. Dampfeuchtigkeit.

Die Dampfeuchtigkeit, d. h. das Verhältnis der vom Dampfe aus dem Kessel mitgerissenen Wassermenge zur Dampfmenge, kann man auf folgende Weise bestimmen: In den Kessel wird eine 1,5proz. Kochsalzlösung eingespeist. Nach eintägigem Betriebe werden zwei Wasserproben gleichzeitig entnommen, die eine aus dem Kessel in der Nähe der Wasseroberfläche, die andere aus dem ersten Wasserabscheider der Dampfleitung; derselbe darf indes nicht auch vom Dampfe eines zweiten Kessels durchströmt werden. Diese Proben untersucht man auf ihren Salz- bzw. Chlorgehalt. Aus dem Salzgehalt im Dampfabscheider und demjenigen im Kessel berechnet man die Dampfeuchtigkeit. Bei Entnahme des heißen Wassers aus dem Kessel bzw. dem Abscheider dürfen keine Verluste durch Verdampfung, die den Salzgehalt der Proben erhöhen würden, entstehen; dazu wendet man Kühlschlangen an, durch die das heiße Wasser fließt, bevor es in das Aufnahmegefäß gelangt. Die Ermittlung des Salz- bzw. Chlorgehaltes erfolgt durch Titrierung mit ein und derselben Lösung von Silbernitrat, wobei man Kaliummonochromat als Indikator benutzt. — Auf gleiche Weise ermittelt man den natürlichen Salzgehalt des Speisewassers. — Obiges Verfahren, mit Sorgfalt durchgeführt, wird in den meisten Fällen genügend genaue Resultate liefern.

2 c. Dampfspannung.

Die Betriebsspannung des Kessels ist durch ein Manometer, welches mit einem amtlich geprüften zu vergleichen ist, festzustellen und die Angabe des Apparates entsprechend zu korrigieren. Die Dampfspannung muß alle zehn Minuten notiert werden und besonders am Anfang und Ende des Versuches denselben Wert haben.

3. Nutzeffekt eines Dampfkessels.

Der Nutzeffekt ergibt sich als Verhältnis:

$$(9) \frac{\text{der an den Kesselinhalt zur Dampfbildung abgegebenen Wärmemenge}}{\text{der in der verheizten Kohle enthaltenen Wärmemenge}}$$

Hieraus geht hervor, daß der Nutzeffekt der Kesselanlage sich um so höher stellt, je vollkommener die im Brennmaterial enthaltene Wärmemenge vom Kessel zur Dampfbildung verwendet wird. Die erstere Größe (im Zähler des Bruches) ist die auf S. 12 definierte Gesamtwärme, die nach der Regnaultschen Formel (8) mit Hilfe der Fliegnerischen Tabelle ermittelt wird.

Handelt es sich um überhitzten Dampf, so ist die gesamte nutzbar gemachte Wärme größer als die Gesamtwärme des gesättigten Dampfes. Die zusätzliche Wärmemenge der Überhitzung wird aus der Zahl der Überhitzungsgrade ermittelt; dieselbe läßt sich aus der gemessenen Dampfspannung und der gemessenen Temperatur des überhitzten Dampfes nach der Fliegnerschen Tabelle bestimmen. Die pro Kilogramm Dampf zugeführte Überhitzungswärme stellt sich als Produkt aus den Überhitzungsgraden und der spezifischen Wärme des überhitzten Dampfes dar. Die letztere Größe schwankt bei modernen Anlagen zwischen 0,57 bis 0,60 (s. hierzu sub B: Dampfmaschinen).

Die in der verheizten Kohle verfügbare Wärmemenge folgt aus Formel (1) der auf S. 6 behandelten Heizwertbestimmung. Der Gang der Rechnung behufs Bestimmung des Nutzeffektes wird am besten durch das folgende Zahlenbeispiel erläutert.

Die Versuchsergebnisse einer Dampfkesseluntersuchung seien:

Brennmaterialverbrauch während der Versuchsdauer von 9,85 Stunden	1 664,00 kg
Herdrückstände (im Aschenabfall gesammelt) . .	139,50 „
Dieselben in Prozenten der verheizten Kohle	
$\frac{139,50}{1664} =$	8,38
Kohlenstoff im Brennmaterial laut Analyse . . .	47,91 Proz.
Verdampftes Speisewasser im ganzen	14 230,00 kg
Temperatur des Speisewassers	17,9° C
Dampfspannung in Atmosphären absolut etwa . .	9,13 kg/qcm

1 kg Kohle verdampfte an Wasser:

$$\frac{14230}{1664} = 8,552 \text{ kg.}$$

Der Heizwert der verwendeten Kohle ist nach Formel (1) 7494 Kal.; danach berechnet sich die Wärmeausnutzung wie folgt: Die Gesamtwärme des Dampfes ergibt sich nach der Regnaultschen Formel (8) S. 12. Die Temperatur (t) des Dampfes von der Spannung 9,13 Atm. ist nach der Fliegnerschen Tabelle 175° C. Da ferner die Temperatur des Speisewassers (s) 17,9° C beträgt, so ergibt sich der Wärmewert von 1 kg Dampf zu:

$$\lambda_1 = 606,5 + 0,305 \cdot 175 - 17,9 = 641,9 \text{ Kal.}$$

Somit kommen auf 8,552 kg Dampf:

$$8,552 \cdot 641,9 = 5490 \text{ Kal.}$$

In den Herdrückständen gehen, wenn man 8 Kal. auf 1 kg Kohle rechnet, pro Kilogramm Brennmaterial

$$83,8 \cdot 0,4791 \cdot 8 = 321 \text{ Kal.}$$

verloren.

Wärmeverlust durch die abziehenden Heizgase für 1 kg Brennstoff:

$$0,32 \cdot \frac{78,1}{0,536 \cdot 10,8} + 0,48 \cdot \frac{9 \cdot 4,80 + 2,20}{100} \cdot 195 \sim 885 \text{ WE.}$$

Da in 1 kg Kohle 7494 Kal. enthalten sind, so ergibt sich folgende Wärmeverteilung:

Gesamtwärme von 1 kg Kohle	7494 Kal.	
Zur Dampfbildung nutzbar gemachte Wärme .	5490 "	73,3 Proz.
Verloren in den Herdrückständen	321 "	4,3 "
Wärmeverlust durch die abziehenden Heizgase	885 "	11,7 "
Restverlust (Strahlung, unverbrannte Gase, Ruß usw.)	798 "	10,7 "
		100 Proz.

Nutzeffekt des Kessels:

$$\frac{5490}{7494} = 0,733, \text{ d. h. } 73,3 \text{ Proz.}$$

Bei genauer Beobachtung der Momente unter 1 a bis g, 2 a bis c und 3 sind nur Fehler im Bereiche des Erlaubten möglich.

Beispiel einer technisch falsch angelegten Dampfkessel- und Rohrleitungsanlage.

Um darzutun, wie manchmal Dampfkesselanlagen unrationell angelegt sind und überlastet werden, führe ich hier einen von mehreren mir in der Praxis vorgekommenen Fällen rechnerisch durch.

Die durchschnittlichen Belastungen der Maschinen in einem Hüttenwerk waren:

1. Transmission für Kraftleistung	150 PS,
2. Dynamoleistung	110 "
	in Summa = 260 PS.

Die maximale Belastung betrug:

1. Transmission für Kraftleistung	180 PS,
2. Dynamoleistung	180 "
	in Summa = 360 PS.

Der mechanische Wirkungsgrad der Dampfmaschinen war im Mittel 0,85 und der Dampfverbrauch im Mittel 6 kg Dampf pro indiz. Pferdestärke.

Der durchschnittliche Dampfverbrauch ist hiernach $\frac{260}{0,85} \cdot 6 = 1840 \text{ kg}$.

während der maximale Dampfverbrauch auf $\frac{360}{0,87} \cdot 6 = \sim 2500 \text{ kg}$

steigt. Hierzu kommen noch verschiedene Verluste, so daß in Summa im Mittel 2040 bzw. 2700 kg Dampf maximal erforderlich waren. Diese Dampfmenge war viele Jahre von einem alten Röhrenkessel, 135 qm Heizfläche von 8 Atm. Überdruck, geliefert worden, und da der maximale Betrieb sehr häufig und für längere Zeit erfolgte, so wurde der Kessel mit 20 kg pro Quadratmeter beansprucht. Die Kraftanlage des Hüttenwerkes wurde vergrößert und ebenfalls die Dampfmaschinenanlage, die Dampfkesselanlage jedoch blieb in dem alten Umfange bestehen. Die Leistung stieg auf 450 PS_e, somit bei 87 Proz. Nutzeffekt auf 520 PS_i. Der Dampfverbrauch betrug bei dieser Leistung pro indizierte

Pferdestärke 5,4, somit insgesamt $520 \cdot 5,4 = 2800$ kg; hierzu kommen noch diverse Verluste, so daß in Sa. max. etwa 3000 kg Dampf erforderlich waren. Bei der etwa 42 m langen unbedeckten Rohrleitung zwischen Dampfkessel- und Dampfmaschinenhaus ergab sich ein Verlust pro Jahr wie folgt:

Die Temperatur des Dampfes sinkt von 280°C am Kessel gemessen bis auf 220°C an der Maschine, so daß die Differenz 60°C beträgt. Unter der Annahme, daß die spezifische Wärme des überhitzten Dampfes rund 0,6 ist, würden sich hierbei $60 \cdot 0,6 = 36$ Kal. ergeben, also für 3000 kg Dampf

$$36 \cdot 3000 = 108\,000 \text{ Kal.}$$

pro Stunde, und bei 24 stündigem Betriebe und 365 Tagen:

$$108\,000 \cdot 24 \cdot 365 = 946\,080\,000 \text{ Kal.}$$

Der Nutzeffekt des Dampfkessels betrug im Mittel 65 Proz., und als Brennmaterial wurde Ia Kohle von der Grube „Wolfsbank“ mit einem Heizwert von etwa 7000 Kal. verwendet.

Die gesamte nutzbare Wärmemenge von 1 kg Kohle beläuft sich somit auf:

$$0,65 \cdot 7000 = 4550 \text{ Kal.}$$

Es sind somit pro Jahr für die Erzeugung von 946 080 000 Kal., die durch die lange Rohrleitung verloren gehen, erforderlich:

$$\frac{946\,080\,000}{4550} \sim 208\,000 \text{ kg,}$$

was bei einem Preise von 0,02 \mathcal{M} pro Kilogramm an Kosten pro Jahr verursacht:

$$0,02 \cdot 208\,000 = 4160 \mathcal{M}.$$

Die starke Beanspruchung des Kessels und die großen Verluste in den langen unbedeckten Rohrleitungen führten zu einem sehr unökonomischen Betriebe, wie obige Ausführungen dartun.

Nach meiner Feststellung dieser Verhältnisse beauftragte mich die Hüttenverwaltung, einen Vorschlag zur Neuprojektierung der Dampfkessel- und Rohrleitungsanlagen zu machen. Das ganze Terrain war im Laufe der Jahre so bebaut worden, daß in der Nähe der Dampfmaschinenanlage kein Raum zum Bau einer Dampfkesselanlage war. Es wäre nur möglich gewesen, ein altes Treibofengebäude für die Kesselanlage zu benutzen; hierdurch war allerdings die Versetzung des bestehenden und eines alten Reservekessels, sowie des Treibofens und der Bau eines neuen Treibofengebäudes bedingt. Die Unkosten betragen ohne Anschaffung eines neuen Kessels allein etwa 21 700 \mathcal{M} , während die Betriebsunkosten durch die Verluste in einer kürzeren, jedoch noch immerhin langen Rohrleitung auf etwa 1750 \mathcal{M} fallen würden. Die Raumgewinnung für eine ev. spätere weitere Vergrößerung der Kesselanlage war in dem alten Treibofengebäude nicht möglich; außerdem war dieses Projekt nicht günstig, da die Kessel durch bestehende Reser-

voire nur ziemlich weit ab von der Mauer des Dampfmaschinenraumes montiert werden konnten. Es mußte somit, aus den besagten Gründen, von diesem Projekt Abstand genommen werden, und konnte der neue Kessel nur zwischen die beiden vorhandenen Tenbrinkkessel, und zwar mit einer Seite an den links stehenden Kessel angemauert werden. Die rechte und Rückseite mußte zur Reinigung und Bedienung der Überhitzerregulierklappe zugänglich bleiben. Um Raum für die Bedienung zu gewinnen, mußte die Mauer hinter dem neuen Kessel etwas geschwächt werden. In dem gegebenen Falle war es erforderlich, ein Kesselsystem, welches nur geringen Raum und reichliche Ausnutzung der Heizgase erfordert, zu wählen. Ich habe mich daher den örtlichen Verhältnissen möglichst angepaßt und einen Wasserrohrkessel von etwa 170 qm Heizfläche für 11 Atm. Betriebsüberdruck mit Kettenrost und einer Überhitzerheizfläche von etwa 60 qm für eine Überhitzung des Dampfes von etwa 280°C, eine komplette Speisepumpe und einen Injektor gewählt. Ein Kessel mit größerer Heizfläche konnte nicht untergebracht werden. Die Kosten für diesen betriebsfertigen Kessel nebst sämtlichen Rohrleitungen im Kesselhaus betragen etwa 22 000 *M.*, während das erste erwähnte Projekt nahezu das Doppelte gekostet hätte. Die Beanspruchung des neuen Kessels betrug im Mittel bei etwa 2600 kg Dampf nicht weit über 15 kg pro Quadratmeter und nur ganz vorübergehend im Maximum 17,6 kg pro Quadratmeter, so daß feuchte Dämpfe nicht zu befürchten waren; die alten beiden Kessel stehen in Reserve für den großen und werden im Maximum mit etwa 11 kg Dampf pro Quadratmeter beansprucht. Die Verluste durch die lange Rohrleitung konnten nur durch gute Isolierung vermindert werden, und wurde die Reduktion der Verluste auf die Hälfte erzielt, so daß pro Meter nur noch ein Temperaturverlust von nicht ganz $\frac{3}{4}^{\circ}$ eintrat. Auf diesem Wege ist unter Berücksichtigung der lokalen Verhältnisse immerhin noch eine einigermaßen ökonomische Anlage erzielt und sind die Betriebsunkosten durch die Verluste in den Rohrleitungen tunlichst reduziert worden. Bei sehr geringer Belastung — Nachtbetrieb — kann man mit dem Betriebe eines alten Dampfkessels auskommen.

Prüfung eines liegenden Einflammrohrkessels mit Planrostinnenfeuerung und seitlichem Wellrohr (Blechwalzwerk Schulz-Knautd, A.-G., Essen a. d. Ruhr¹⁾).

I. Daten des Kessels.

Betriebsdruck 12 Atm.,
 Heizfläche 60 qm,
 Rostfläche 1,44 qm,

¹⁾ Die Prüfungsergebnisse sind dem „Offiziellen Berichte der Prüfungskommission der Elektrotechnischen Ausstellung in Frankfurt a. M. 1891“ entnommen, welcher der Verfasser als Assistent zugehörte.

- Verdampfungsoberfläche 12,77 qm,
- Inhalt des Wasserraumes 15,2 cbm,
- Inhalt des Dampfraumes 4,4 cbm,
- Durchmesser des Wellblechflamrohr im Lichten 1250 bzw. 1350 mm,
- Durchmesser des Kesselmantels im Lichten 2200 mm,
- Länge des Kesselmantels 7600 mm,
- Dicke des Kesselmantels und der Böden bzw. des Wellblechflamrohr 25 bzw. 15 mm.

Die Längsnähte des Kesselmantels waren mit dreireihiger Doppelaschennietung, die Rundnähte mit doppelreihiger Überlappungsnietung versehen. Die Einmündung der Speiseleitung erfolgte etwa 20 cm unter dem Wasserspiegel nahe am hinteren Kesselboden seitlich vom Flammrohrscheitel durch den Dampfraum, die Dampfentnahme an dem auf der hinteren Hälfte des Kessels befestigten Dome.

Die Fläche des Planrostes war etwas nach hinten geneigt und betrug deren Abstand vom Flammrohrscheitel etwa 80 cm.

Die Stärke des Mauerwerkes war:

- für die Längsseite 64 cm,
- für die Rückseite 50 „

Der obere Teil des Kessels war durch Übermauerung und schlechte Wärmeleiter gegen Abkühlung geschützt.

An einer Längsseite des Kessels befand sich ein zweiter im Betrieb stehender Kessel, während die andere Seite frei stand.

II. Messungen und Ausrechnungen.

Kohlenmenge. Während einer Versuchsdauer von 9,858 Stunden wurde an Brennmaterial (gewaschene Nußkohle) 1705 kg verheizt; auf 1 qm Rostfläche und eine Stunde berechnet betrug der Brennmaterialverbrauch 120 kg.

Zusammensetzung der Kohle. Dieselbe betrug laut chemischer Untersuchung:

Kohlenstoff	80,08	Gew.-Proz.
Wasserstoff	4,44	„
Sauerstoff	4,61	„
Schwefel	1,30	„
Wasser	2,66	„
Asche	6,91	„

Heizwert der Kohle. Der Heizwert für 1 kg Kohle berechnet sich nach Formel 1 (S. 6) wie folgt:

$$\frac{1}{100} \left\{ 8100 \cdot 80,08 + 29000 \left(4,44 - \frac{4,61}{8} \right) + 2500 \cdot 1,30 - 600 \cdot 2,66 \right\} = 7624 \text{ Kal.}$$

Erforderliche Luftmenge. Die theoretisch erforderliche Luftmenge pro Kilogramm Kohle ergibt sich nach Formel 3 (S. 7) zu:

$$\left(\frac{8}{3} \cdot 0,8008 + 8 \cdot 0,0444 + 0,013 - 0,0461\right) \frac{100}{30} = 8,2 \text{ cbm.}$$

Die tatsächlich verbrauchte Luftmenge wurde aus dem Kohlen säuregehalt der Abgase unmittelbar hinter der Feuerbrücke bzw. am Ende des Kessels ermittelt.

Die beiden Messungen gaben einen Kohlen säuregehalt k von 15,12 bzw. 11,92 Vol.-Proz. Nach Formel 4b (S. 10)

$$v = \frac{18,9}{k}$$

folgt aus obigen Zahlen ein Vielfaches (v) der verbrauchten Luftmenge gegenüber der theoretischen von:

1,25 hinter der Feuerbrücke,
1,588 am Ende des Kessels.

Die verbrauchten Luftmengen sind danach:

1,25 · 8,2 = 10,25 cbm hinter der Feuerbrücke,
1,588 · 8,2 = 13 cbm am Ende des Kessels.

Aus diesen beiden Ziffern geht hervor, daß in den Feuerzügen durch die Fugen des Mauerwerks noch 27 Proz. Luft nachgesaugt wurden. Die Zugstärke in Millimeter Wassersäule betrug im Fuchs 8,48.

Temperaturen. Die Temperatur der eintretenden Luft wurde zu 27,4° C, die Temperatur der Abgase am Kesselende zu 314,7° C gemessen, die letztere mittels eines Quecksilberpyrometers mit Stickstofffüllung.

Herdrückstände. Die Herdrückstände, die sich während des Versuches im Aschenfall ansammelten, hatten ein Gewicht von 273,6 kg, in Prozenten der verheizten Kohle 8,035.

Der Gehalt an Kohlenstoff betrug nach der chemischen Analyse 41,41 Proz.

Speisewasser. Das Speisewasser wurde durch Beobachtung des auf einer Wage stehenden Entnahmebehälters bestimmt. Es wurden im ganzen 14694 kg verbraucht. Die Verdampfung pro Quadratmeter Heizfläche und Stunde war somit:

$$\frac{14694}{60 \cdot 9,858} = 23,85.$$

Die Temperatur des Speisewassers betrug im Mittel 17,75° C.

Die Dampfspannung in Atmosphären Überdruck, mittels des hierzu besonders geeichten Betriebsmanometers gemessen, war im Mittel 8,465 kg/qcm, absolut 9,465 kg/qcm. 1 kg Kohle verdampfte an Wasser:

$$\frac{14694}{1705} = 8,62 \text{ kg.}$$

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 λ_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.