

Tendenz des Gesetzes ist also die gleiche wie die der Abkühlungsverluste. Das Verhältnis B'/A' für eine Gerade, die man etwa auf Grund zweier Indikatordiagramme bei verschiedener Belastung als Annäherung an das tatsächliche Gesetz $p_i C_u = f(p_i)$ der Völligkeitsverluste einführt, wird vermutlich größer sein wie bei den Abkühlungsverlusten, indem A' verhältnismäßig klein sein wird.

Die Totraumverluste (Art. 32) werden, wenn die Kompression bei der Füllungsveränderung unverändert gelassen wird, absolut genommen, fast konstant bleiben, also eine starke Konstante A'' in einer Gleichung von der Form der Nummer 30 haben.

86. Faßt man beide Verluste zu einem gemeinsamen Gesetz zusammen, das man proportional gleich demjenigen der Abkühlungsverluste setzt, so wird dadurch das Verfahren außerordentlich vereinfacht und, wenn man ganz abnorme Fälle ausschließt, kein so großer Fehler begangen, daß er angesichts der Unsicherheit des Abkühlungsgesetzes stark ins Gewicht fällt. Man hätte dann C_b statt C_v zu bestimmen als Differenz $C_i - C_a$ und hätte C_b der Berechnung von A zugrunde zu legen. In obigem Beispiel wird dann A aus der Gleichung gefunden:

$$C_b = 8,72 - 5,62 = 3,10; \quad 3,10 = A \left(\frac{1}{2,6} + 0,36 \right); \quad A = 4,17.$$

B/A wird man, wenn kein zweiter Verbrauchsversuch vorliegt, wie oben angenommen, beibehalten. Die Ermittlung von B/A beim Vorliegen eines zweiten Versuchs würde die durch die Zusammenlegung der Verluste entstandene Ungenauigkeit fast vollständig beseitigen.

Bei der Auftragung des Gesamtverbrauchs wird man jetzt nur $p_i C_a$ nach oben abtragen (vgl. Art. 83 mit Anm. 2), alle Verluste $p_i C_b = p_i (C_u + C_f + C_k + C_l)$ nach unten.

Neueres Verfahren und Verlustgesetz.

87. Besser noch als das oben (Formel 30) angegebene Gesetz für die Abkühlungsverluste bringt die Formel $N_i C_k = a + b p_i C_a$ die Abhängigkeit der Abkühlungsverluste von der Belastung zum Ausdruck. Faßt man wieder die Lässigkeitsverluste mit den Abkühlungsverlusten zusammen und drückt N_i durch p_i aus, so geht die Gleichung, wenn man noch mit den in eckige Klammern gesetzten Konstanten der die Beziehung zwischen N_i und p_i ausdrückenden Gleichung (Art. 80) in die Konstanten der rechten Seite geht und die Aufnahme von C_l ebenfalls durch Änderung dieser Konstanten berücksichtigt, über in

$$p_i C_v = a + b p_i C_a. \quad (33)$$

Das Verhältnis b/a , welches nachstehend mit k bezeichnet werden möge, ist wieder bei gleichartigen, mit gesättigtem Dampf betriebenen Maschinen eine wenig veränderliche Größe; sie mag für Einzylindermaschinen = 0,07 bis 0,1 gesetzt werden.

Die Formel wird dann zweckmäßig geschrieben:

$$p_i C_v = a(1 + k p_i C_a) \quad (34)$$

$$\text{oder} \quad C_v = a \left(\frac{1}{p_i} + k C_a \right) \quad (35)$$

88. C_a ist bei kleineren und mittleren Belastungen wenig veränderlich, erst bei höheren Belastungen beginnt es stärker mit der Belastung zu steigen; dieses Steigen bringt in der Gleichung für C_v gut den zunehmenden Einfluß der größeren Zuwachsflächen (Art. 51) bei größeren Füllungen zum Ausdruck. Sonst weicht die Kurve für $p_i C_v$ als Funktion von p_i bei entsprechender Wahl der Konstanten von der früheren nicht allzusehr ab.

Nimmt man wieder den Verlust C_f in das Änderungsgesetz der Abkühlungsverluste auf, so lautet das Gesetz (etwas weniger zuverlässig) mit einer anderen Bedeutung der Konstanten a :

$$p_i C_b = a(1 + k p_i C_a) \quad (36)$$

$$\text{oder} \quad C_b = a \left(\frac{1}{p_i} + k C_a \right) \quad (37)$$

Das Verhältnis $k = b/a$ wird man ebenso groß annehmen wie in Gleichung 34 und 35 vorausgesetzt oder wird es beim Vorliegen eines zweiten Verbrauchsversuches (Art. 81) auch bestimmen können.¹⁾

89. Die Auftragung der Kurve des Gesamtverbrauchs $p_i C_i$ wird hier besonders einfach, weil der zweite Summand in der Gleichung 36 proportional den Größen $p_i C_a$ ist, die ohnehin aufgetragen werden.

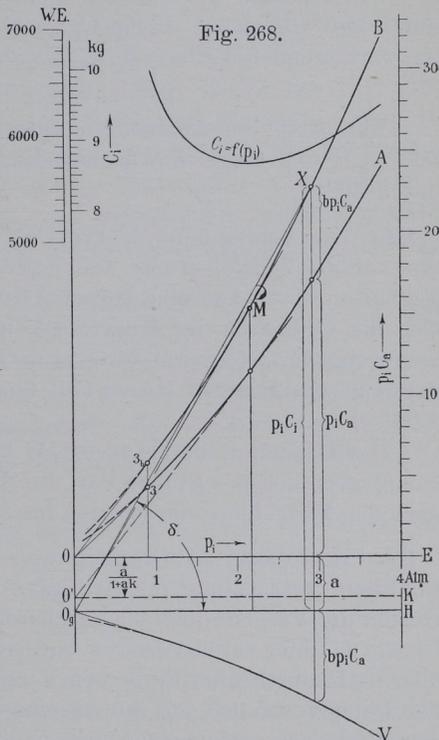
Man trage zunächst den mit p_i multiplizierten, nach Art. 10 und 11 oder 14 bis 28 berechneten adiabatischen Verbrauch $p_i C_a$ als Funktion von p_i von der Linie OE aus (Fig. 268) nach oben auf, etwa in dem in Art. 83 empfohlenen Maßstab.

Hierbei kann man sich eines Kunstgriffes bedienen, der die Verzeichnung der Kurve erleichtert, indem man einen sehr leicht

¹⁾ Sind C_{i1} und C_{a1} die gemessenen bzw. berechneten Verbrauchswerte bei der Belastung p_{i1} und C_{i2} und C_{a2} die bezüglichen Verbrauchswerte bei der Belastung p_{i2} , so wird

$$k = \frac{b}{a} = \frac{p_{i2}(C_{i2} - C_{a2}) - p_{i1}(C_{i1} - C_{a1})}{p_{i1} p_{i2} [(C_{i1} - C_{a1}) C_{a2} - (C_{i2} - C_{a2}) C_{a1}]} \quad (38)$$

auffindbaren Punkt zugleich mit der Tangente an die Kurve in diesem Punkte feststellt: Man ermittelt mit Hilfe der kleinen Tafel auf S. 359 nach Art. 24 oder genauer mit der größeren Mollier-Tafel nach Art. 28, indem man direkt bis zum Druck p_3 herabgeht, die adiabatische Arbeit für das bis auf den Ausschubgedruck p_3 spitz auslaufende Diagramm und daraus den adiabatischen Dampfverbrauch C_{a3} . Nachdem man das dabei erreichte spezifische Volumen aus der kleinen Tafel abgelesen hat, oder bei Benutzung der Mollier-Tafel aus der Dampfmasse berechnet hat, findet man p_{13} . Den gefundenen Wert trägt man als Abszisse und $p_{13} C_{a3}$ als Ordinate dazu auf; der gefundene Punkt 3 Fig. 268 ist ein Punkt der Kurve 3 A und $\overline{O3}$ die Tangente an die Kurve in diesem Punkt. Über den Punkt 3 nach innen möge die Kurve nicht hinausgeführt werden. Sie hebt sich hier, wie punktiert angedeutet ist, infolge der Schleifenbildung wieder von der Tangente des Minimalverbrauchs ab. Auch das Verlustgesetz wird von hier ab sehr unsicher.



Die $p_1 C_a$ -Kurve in Fig. 268 ist wieder für gesättigten Dampf im übrigen unter den Voraussetzungen der Aufgabe mit $p = 7$ Atm., $p_3 = 0,21$ Atm. aufgetragen.

90. Für die Verluste ist wieder ein Versuchsergebnis von $C_i = 8,72$ kg, bei $p_i = 2,6$ Atm. angenommen. Die Verluste mögen zunächst wieder nach unten abgetragen werden. C_b wird (für $p_i = 2,6$) gefunden wie in Art. 86: $C_b = 8,72 - 5,62 = 3,1$. Die Verlustordinate für $p_i = 2,6$ wird danach mit dem in Art. 83 empfohlenen Maßstab $= 2,6 \cdot 3,1 = 8,06$ cm, für weitere Punkte der Verlustkurve muß zunächst $k = b/a$ angenommen werden und dann a berechnet werden.

Wenn k auf Grund eines zweiten Verbrauchsversuches nach der Anm. 1 S. 402 = 0,1 gefunden ist,¹⁾ wird aus Gleichung 37:

$$3,1 = a \left(\frac{1}{2,6} + 0,1 \cdot 5,62 \right), \quad a = 3,27.$$

Die Verluste bei anderen Belastungen werden dann gefunden durch die Gleichung 36: $p_i C_b = a(1 + k p_i C_a)$ oder, da $ka = b$ ist (im vorliegenden Falle = $0,1 \cdot 3,27 = 0,327$), aus der Gleichung:

$$p_i C_b = 3,27 + 0,327 p_i C_a.$$

Man ziehe im Abstände a unterhalb der Linie OE eine Parallele $O_g H$ und trage von da aus die Werte $b p_i C_a = 0,327 p_i C_a$ nach unten ab.

91. Die entstandene Kurve $O_g V$ unterhalb der Linie $O_g H$ ist eine affine Verkleinerung der Kurve OA über der Linie OE im Verhältnis $b:1$. Um eine Gerade-Grundlinie zu erhalten, denke man sich die Ordinaten der Kurve $O_g V$ unter $O_g H$ nach oben als Verlängerung der Ordinaten der Kurve OA aufgetragen. Die Ordinaten der neu entstandenen Kurve OB über OE sind dann $p_i C_a + b p_i C_a = (1 + b) p_i C_a$.

Die Ordinaten der Kurve OB über $O_g H$ stellen den Gesamtdampfverbrauch pro Stunde dar, die Abszissen in einem nachträglich nach den Maschinenabmessungen feststellbaren Maßstab die Leistung.

92. Bei dieser Auftragsweise (Gesamtverbrauch $p_i C_i$ als Funktion der Leistung p_i) wird ganz allgemein, d. h. auch wenn das Gesetz der Verluste und des nutzbaren Verbrauchs ein ganz anderes ist wie das hier vorausgesetzte, und vielleicht die Punkte der B-Kurve über $O_g H$ durch eine Serie von Versuchen einzeln festgestellt sind, der Dampfverbrauch für die Arbeitseinheit dargestellt durch den tg des Winkels δ , welchen ein vom Nullpunkt O_g nach dem fraglichen Ordinatenendpunkt X gezogener Strahl mit der Abszissenachse bildet.

Dieser Winkel wird ein Minimum, wenn der Strahl die B-Kurve berührt: Man findet also den Punkt M, in welchem der spezifische Dampfverbrauch ein Minimum wird, indem man von O_g aus eine Tangente an die B-Kurve zieht. Der zu M gehörige mittlere indizierte Druck wird in Fig. 268 = 2,17 Atm. gefunden.

¹⁾ Bei der Wahl von k , welche erforderlich wird, wenn nur ein Versuch vorliegt, ist wieder das in Art. 97 Gesagte zu berücksichtigen. Es ist hier ohne besondere Absicht ein verhältnismäßig hoher Wert von k eingeführt (0,1, bei den Grenzen 0,07 bis 0,1), während vorne (Art. 87) für B/A ein verhältnismäßig niedriger Wert (0,36, bei den Grenzen 0,35 bis 0,5) angenommen wurde. Bei neueren Maschinen scheinen die höheren Werte besser zu passen.

Wegen des flachen Verlaufs der Verbrauchskurve ist die graphische Bestimmung des Berührungspunktes ziemlich unsicher.

93. Bei dem hier angewandten Verfahren der Auftragung der Verlustkonstanten nach abwärts lassen sich aus dem flachen Verlauf der Kurve

wichtige Schlüsse über den Einfluß der Verluste auf die Lage des Verbrauchsminimums

ziehen. Da die A-Kurve der B-Kurve über der Achse OE affin ist, kann man bei entsprechender Änderung des Maßstabes auch die A-Kurve als Kurve des Gesamtverbrauchs auffassen. Man muß dabei aber natürlich auch den Maßstab der Konstanten a entsprechend ändern. Das Affinitätsverhältnis der A-Kurve zur B-Kurve mit OE als Achse ist $1:(1+b)$. Diesem Verhältnis entsprechend ist OO_g zu verkleinern. Es ist

$$OO' = \frac{a}{1+b} = \frac{a}{1+ka} \quad (39)$$

zu machen und durch O' eine neue Nulllinie $O'K$ zu legen.

Zieht man von O' eine Tangente an die A-Kurve, so muß diese bei dem angenommenen Verlustgesetz die A-Kurve auf derselben Ordinate und bei demselben p_1 berühren wie die Tangente von O_g aus die B-Kurve.

94. Bei dieser Umrechnung behält die A-Kurve als Kurve des Gesamtverbrauchs ihre Lage gegen OE für veränderte Annahmen über die Verluste bei. Die Abhängigkeit des Verbrauchsgesetzes von den Verlusten wird durch die Lage der Linie $O'K$, welche die Ordinaten-Nulllinie bildet, bestimmt.

Will man für eine Maschine, deren Verluste andere sind (infolge abweichender Größe des Verhältnisses O/F oder der Tourenzahl n oder des Hubes s), das Verbrauchsgesetz finden, so hat man nur die Größe OO' in dem oben angegebenen Verhältnis zu verändern und den Punkt O' und mit ihm die Ordinaten-Nulllinie zu verschieben.

Läßt man jetzt den Punkt O' auf der Nullordinate wandern, so erkennt man, wie außerordentlich schnell der Berührungspunkt der von O' aus an die A-Kurve gezogenen Tangente auf der Kurve wegen ihres flachen Verlaufs vorschreitet und daß bei einer mäßig großen Veränderung der Verluste eine starke Verschiebung des Verbrauchsminimums eintritt.

Bei den Verbesserungen, welche die Einzylindermaschinen mit Kondensation in neuerer Zeit erfahren haben, hat sich das Verbrauchsminimum dieser Maschinen stark gegen früher verschoben nach einem

relativ niedrigen, mittleren indizierten Druck und einer im Vergleich zur Maschinengröße relativ kleinen Leistung hin. Man hat sich berechtigt gehalten, bei Vergleichen nun auch die Normalleistung entsprechend herabzusetzen. Das ist in dem Maße, wie es geschehen ist, ungerechtfertigt, weil die Maschine mit der daraus folgenden Normalleistungsgröße pro PS_1 viel zu teuer wird.

Vergleiche auch die Kurven des Verbrauchs pro PS_1 -Stunde im Führer S. 685 für drei verschiedene Maschinenarten, von denen die Kurven I_s und I_h einer Einzylindermaschine gewöhnlicher Bauart angehören. Wenn dort auch die Anfangsdampfzustände der drei miteinander verglichenen Maschinenarten verschieden sind und daher auch das theoretische Minimum nicht genau an derselben Stelle liegt, so ist doch die durch die ungleiche Größe der Verluste bedingte starke Verschiedenheit der Abszissen des Minimums charakteristisch.

Das theoretische Minimum der verlustlosen Maschine mit Kondensation und einem Ausschubgedruck von 0,2 bis 0,25 liegt bei den üblichen Admissionsdrucken und Admissionstemperaturen bei Einzylindermaschinen und bei Verbundmaschinen in der Nähe von $p_i = 1$ Atm., bei niedrigen Anfangsdrucken etwas unter 1, bei hohen Anfangsdrucken etwas über 1. Die Anfangstemperatur macht für die Lage des Minimums wenig aus.

95. Die Auffassung der A-Kurve als Kurve des Gesamtverbrauchs über der Linie $O'K$ unter gleichzeitiger Einführung einer Maßstabsveränderung wurde lediglich für die vorstehenden Schlussfolgerungen über den Einfluß der Größe der Verluste auf die Lage des Minimums eingeführt. Für die Untersuchung der Abhängigkeit des Verbrauchs von der Belastung bei einer bestimmten Maschine wird man zweckmäßiger den alten Maßstab und die Linie O_gH als Ordinaten-Nulllinie beibehalten und, wenn man die Verzeichnung einer der beiden Linien (A oder B) sparen will, nur die B-Linie verzeichnen, indem man die Werte $p_i C_a$ vorweg mit $1 + b$ multipliziert.

Der für die bequeme Verzeichnung der B-Linie wichtige Punkt 3_b , in welchem die Tangente von O aus die B-Linie berührt, liegt auf derselben Ordinate (bei demselben p_i) wie der nach Art. 89 berechnete Punkt 3, aber über OE im Verhältnis $(1 + b):1$ höher.

96. Mit Hilfe der Kurve des Gesamtdampfverbrauchs kann man sehr leicht die in Art. 379 berührte Frage des Einflusses der ungleichen Füllung auf beiden Zylinderseiten auf den Dampfverbrauch beantworten. Soll der mittlere indizierte Druck z. B. 2,6 Atm. betragen

und ist er durch ungleiche Füllung ungleichmäßig auf beide Seiten verteilt, z. B. derart, daß er auf der einen Seite 3 Atm., auf der anderen nur 2,2 beträgt, so kann man getrennt für die Kurbelseite und für die Deckelseite auf der Kurve des Gesamtdampfverbrauchs, die mit dem in Frage kommenden Teil in Fig. 269 herausgezeichnet ist, den Dampfverbrauch durch die Punkte X und Y finden.

Der Mittelwert des Verbrauchs liegt auf der Mitte der geraden Verbindungslinie beider Punkte. Der Verbrauch für die beiderseits gleiche Füllung mit $p_i = 2,6$ liegt auf der Kurve selbst senkrecht unter dem Mittelpunkt Z der Geraden XY.

Der Füllungsunterschied ist in dem vorstehenden Beispiel der Deutlichkeit wegen sehr groß angenommen, viel größer als er aus anderen Gründen (wie z. B. zur Vermeidung vorzeitiger Erreichung der größten Füllung auf der einen Seite) sein dürfte. Man erkennt aber, daß der Einfluß auf den Dampfverbrauch doch nur sehr gering ist. Die mit ΔC_i bezeichnete Höhe gibt den Mehrverbrauch im Vergleich zur Ordinate von Z über der Grundlinie $O_g H$ an.

Fig. 269.



Einfluß der Voreinströmung auf das Verlustgesetz.

97. Die Erwägungen, welche auf das vorstehend (Art. 77 bis 96) erläuterte Gesetz für die Verluste in Abhängigkeit von der Belastung führten und eine starke Anfangskonstante ergaben, setzen voraus, daß der vor Erreichung des Totpunktes liegende Verlust bei Veränderung der Belastung und Füllung unverändert bleibt. Das wird einigermaßen der Fall sein bei solchen Steuerungen, deren Voreinströmung von der Füllungsveränderung nicht berührt wird (Doppelschiebersteuerungen, auslösende Ventil- und Schiebersteuerungen).

Bei zwangsläufigen, einfach abschließenden Steuerungen mit veränderlicher Füllung ändert sich jedoch stets die Voreinströmung, und zwar entweder der Voreinströmungswinkel oder das lineare Voröffnen oder beide Größen. Der Einfluß dieser Veränderungen auf die Verluste mag nicht ganz unbedeutend sein, auch wenn die verschiedenen Voreinströmung aus den Dampfdiagrammen gar nicht ersehen werden kann (vgl. dazu auch Art. 328). Es wird von diesen Einflüssen besonders die Konstante a berührt werden, die dadurch aufhört einigermaßen eine Konstante zu sein.

Es wird ein Änderungsgesetz von Voreinströmungswinkel und linearem Voröffnen geben, das bezüglich der Wirkung auf die vor