

Die Kosten einer Zugfahrt in Abhängigkeit von der Fahrweise und der Anstrengung des Triebfahrzeugs.

Von Reichsbahnoberrat Ehrensberger, München.

(Schluß.)

Die Kosten des Oberbaues.

Vorbemerkung.

Von den veränderlichen Ausgaben für die Unterhaltung und Erneuerung der Bahnanlagen ist der Zugfahrt in der Regel nur der für die Unterhaltung der durchgehenden Hauptgleise anfallende Teil anzulasten. Im Folgenden werden lediglich diese Ausgaben behandelt; sie sind wegen ihrer verschieden gearteten Abhängigkeit von den Verbrauchswerten der Zugfahrt in die Kosten der laufenden Unterhaltung und der Erneuerung zu trennen.

Kostenformel 10.

Die Kosten der Unterhaltung des Oberbaues.

Die Zahl der Tagewerkköpfe T_w , die im Jahr aufgewendet werden müssen, um 1 km der Strecke in betriebssicherem Zustand zu erhalten, ist nach der Erfahrung nicht nur eine Funktion der Zahl der in beiden Richtungen täglich verkehrenden Züge ($=n$) und deren Gewichte ($=$ tägliche Verkehrsbelastung V_B in Tonnen einschließlich Gewicht der Lokomotive); sie ist noch wesentlich abhängig von der Größe der ausgeübten Zug- und Bremskräfte (Einflußziffer e_{st}), von der Fahrgeschwindigkeit (Einflußziffer e_v), von Bauart und Raddruck der Lokomotive (Einflußziffer e_{l0}) sowie von Bauart und Raddruck der Wagen (Einflußziffer e_{wa}).

Der Dienststellen-Bewertungsausschuß (Diba) der Deutschen Reichsbahngesellschaft hat aus langjährigen Aufschreibungen für die Bemessung des durchschnittlichen Jahresaufwandes für ein Streckenkilometer Flachlandhauptbahn die Formel $T_w = c_{01} + c_{02} \cdot n + c_{03} \cdot \sqrt[3]{V_B}$ abgeleitet. Hierin ist einzusetzen:

bei zweigleisigen Strecken $c_{01} = 60$ und $c_{02} = \frac{1}{3}$,

bei eingleisigen Strecken $c_{01} = 45$ und $c_{02} = \frac{2}{3}$.

$$K_{ou} = \frac{k_{tw} \cdot (1 + \varepsilon) \cdot L}{365 \cdot V_B} \cdot \left[G_z \cdot (c_{01} + c_{02}) + (e_{l0} \cdot G_l + e_{wa} \cdot G_w) \cdot e_{st} \cdot e_v \cdot \sqrt[3]{V_B} \right] \text{ in } \mathcal{R}M.$$

Bestimmung von e_{l0} .

Der Beiwert e_{l0} ist abhängig vom festen Achsstand und vom Raddruck der Lokomotive sowie von der Größe der nicht ausgeglichenen hin- und hergehenden und der überhängenden Massen. Der Einfluß des Raddrucks auf die Unterhaltung des Oberbaues wächst nach Angabe des Fachschrifttums (vergl. Röllsche Enzyklopädie 1927, Seite 317) mit der Quadratwurzel seiner Größe. Als genügend genaues Vergleichsmaß für die Einwirkung der übrigen Größen kann vorerst das auf je einen Meter Abstand der beiden geführten Endachsen der Lokomotive (ohne Tender) treffende Gewicht g_{tm} der Lokomotive in Tonnen angenommen werden. Als Einheit für die Diba-Werte kann eine Lokomotive gelten, für die der Raddruck $R_{dl} = 7$ Tonnen und $g_{tm} = 9$ Tonnen/m ist. Wird der Einfluß der Bauart der für die Zugfahrt verwendeten Lokomotive auf den Aufwand für die Unterhaltung des befahrenen Gleises verhältnisgleich dem Wert $x_1 \cdot \sqrt{R_{dl}}$ und $x_2 \cdot g_{tm}$, ferner $x = x_1 \cdot x_2$ gesetzt, so lautet die Formel für die Einfluß-

Die Funktion $c_{03} \cdot \sqrt[3]{V_B}$ umfaßt den Einfluß der Betriebs- und Streckenverhältnisse, der durch die oben angegebenen Einflußziffern gekennzeichnet ist. Vom Diba-Ausschuß ist der Wert $c_{03} = 6$ ermittelt worden. Er gilt aber nur für den Durchschnitt der Betriebs- und Streckenverhältnisse der beobachteten Flachlandstrecken. Die Untersuchungen des Ausschusses haben ergeben, daß für Strecken mit starken Neigungen — die also größeren Zug- und Bremskräften ausgesetzt waren — Zuschläge zu den Formelwerten notwendig sind. Um die besonderen Verhältnisse der Zugfahrt bei Berechnung des ihr anzulastenden Anteils an den Ausgaben für die Oberbauunterhaltung genau berücksichtigen zu können, müssen diese Einflüsse nach ihrer Eigenart in Rechnung gestellt werden.

Von den für ein Jahr erforderlichen Tagewerkköpfen T_w treffen $\frac{T_w}{365 \cdot V_B}$ auf ein Tonnenkilometer, also auf die Zugfahrt bei einer Fahrtlänge L in Kilometer und bei einem Zuggewicht G_z in Tonnen $L \cdot G_z \cdot \frac{T_w}{365 \cdot G_z}$ Tagewerke. Wird hierin der Erfahrungsausdruck für T_w eingesetzt und dessen Teilwert c_{03} zerlegt in die Einflußziffern e_{st} , e_v , e_{l0} und e_{wa} , so lautet der Ausdruck für die auf die Zugfahrt nach ihren besonderen Verhältnissen treffenden Tagewerke

$\frac{L}{365 \cdot V_B} \cdot \left[G_z \cdot (c_{01} + n \cdot c_{02}) + (e_{l0} \cdot G_l + e_{wa} \cdot G_w) \cdot e_{st} \cdot e_v \cdot \sqrt[3]{V_B} \right]$. Wird dieser Ausdruck mit der Geldausgabe für ein Tagewerk ($=k_{tw}$ in $\mathcal{R}M$) und mit dem auf ein Tagewerk treffenden Stoffverbrauch, also mit $k_{tw} \cdot (1 + \varepsilon)$ vervielfältigt, so erhält man für den der Zugfahrt anzulastenden Anteil an den Ausgaben für die Unterhaltung der durchgehenden Hauptgleise die Formel

ziffer $e_{l0} = x \cdot g_{tm} \cdot \sqrt{R_{dl}}$; für $R_{dl} = 7$ Tonnen und $g_{tm} = 9$ t/m, muß $e_{l0} = 1$ werden, also der Umrechnungsbeiwert $x = \frac{1}{9 \cdot \sqrt{7}} = 0,04$ und damit $e_{l0} = 0,04 \cdot g_{tm} \cdot \sqrt{R_{dl}}$.

Dabei ist vorausgesetzt, daß die hin- und hergehenden Massen wie üblich bis zur zulässigen Grenze ausgeglichen sind.

Bestimmung von e_{wa} .

Für die Wagen ist als Diba-Einheit ein durchschnittlicher Raddruck $R_{dw} = 4$ Tonnen einzusetzen. Da bei den Wagen die überhängenden Massen und wegen der Drehgestelle oder der freien Lenkachsen auch der Radstand keine ausschlaggebende Rolle spielen, so genügt es, $e_{wa} = \frac{\sqrt{R_{dw}}}{\sqrt{4}} = 0,5 \cdot \sqrt{R_{dw}}$ zu setzen. Hierbei ergibt sich R_{dw} durch Teilung von G_w mit der Zahl der Wagenräder des Zuges.

Bestimmung von e_v .

Der Einfluß der Geschwindigkeit ist in der Hauptsache nur für das nicht abgefederte Gewicht des Zuges in Rechnung zu stellen (Radsätze mit Federn und Achsbüchsen, Triebwerksteile der Lokomotive). Da der Einfluß der Geschwindigkeit sich überwiegend in Stoßkräfte auswirkt — Schlag an den Schienenstößen, Hämmern unrunder Räder, Schwankungen des Achsdruckes —, wird er mit V quadratisch anwachsen müssen nach einer Gleichung von der allgemeinen Form $e_v = c_1 + c_2 \cdot V^2$.

Für c_1 ist hierin das Verhältnis des abgefederten Gewichtes zum gesamten Zuggewicht einzusetzen. Wird als Diba-Einheit eine durchschnittliche Geschwindigkeit von $V_m = 42$ km/h eingesetzt, so ergibt sich für $e_v = 1$ der Wert

$$c_2 = \frac{1 - \frac{G_f}{G_z}}{1764}$$

Für einen Güterzug, der zur Hälfte aus beladenen, zur Hälfte aus leeren Wagen besteht, ist z. B. $c_1 = 0,83$, also $e_v = 0,83 + \frac{(1 - 0,83) \cdot V^2}{1764} = 0,83 + \frac{V^2}{10000}$.

Bestimmung von e_{st} .

Die Erfahrungstatsache, daß die Unterhaltung der in starken Neigungen liegenden Gleise bei gleicher Verkehrslast einen höheren Aufwand an Tagewerken erfordert, als die Gleise in Flachlandstrecken, kann nur damit erklärt werden, daß die Beförderung der gleichen Last in den starken Neigungen größere Zugkräfte und Bremskräfte bedingt, als in der Ebene, und daß der schädliche Einfluß der die Zug- und Bremskräfte auf die Schienen übertragenden Tangentialreibungskräfte auf Oberbau und Bettung mit der Größe dieser Kräfte wächst. Die Größe der Reibungsarbeit hängt aber nicht allein von der Neigung der Strecke, sondern auch von dem Aufwand an Beschleunigungsarbeit und Bremsarbeit ab. Die auf eine Tonne Zuggewicht bezogene den Oberbau beanspruchende positive und negative Zugkraft ist gekennzeichnet durch die Beziehung

$$z_{st} = \frac{(\eta_i \cdot A_1 + A_p + A_b) \cdot 1000}{G_z \cdot L} \text{ in kg/t.}$$

Dazu kommt noch gesondert die Reibungsarbeit des Bogenwiderstandes in Gleisbögen. Auf Grund dieser Überlegungen ergibt sich, wenn L_b in km die Länge der auf der Strecke L vorkommenden Bögen mit dem durchschnittlichen Bogenwiderstand w_b in kg/t, ferner z_{sts} den Diba-Einheitswert für z_{st} und c_z den Hundertsatz bezeichnet, um den der Bedarf an Tagewerkköpfen bei der Änderung von z_{st} um je 1 kg/t unter sonst gleichen Verhältnissen zu- oder abnimmt, die Beziehung:

$$e_{st} = z_{sts} + 0,01 \cdot c_z \cdot \left[\frac{(\eta_i \cdot A_1 + A_p + A_b) \cdot 1000}{G_z \cdot L} + \frac{L_b}{L} \cdot w_b - z_{sts} \right]$$

Für die Einheitswerte der Diba-Formel muß sein $e_v = 1$, $e_{10} = 1$ und $e_{wa} = 1$, demnach $c_{03} = e_{sts} = 6$. Da in diesem Fall $z_{st} + \frac{L_b}{L} \cdot w_b = z_{sts}$ ist und damit der Ausdruck

$$0,01 \cdot c_z \cdot \left[\frac{(\eta_i \cdot A_1 + A_p + A_b) \cdot 1000}{G_z \cdot L} + \frac{L_b}{L} \cdot w_b - z_{sts} \right] = 0$$

wird, ist $z_{sts} = e_{st} = 6$. Es lautet demnach die Formel

$$e_{st} = 6 + 0,01 \cdot c_z \cdot \left[\frac{(\eta_i \cdot A_1 + A_p + A_b) \cdot 1000}{G_z \cdot L} + \frac{L_b}{L} \cdot w_b - 6 \right]$$

Aus den Zuschlägen des Diba-Ausschusses berechnet sich für zweigleisige Bahnen $c_z = 4,25\%$ und für eingleisige Bahnen $c_z = 2,5\%$.

Inwieweit die aus den Feststellungen des Diba-Ausschusses abgeleiteten Festwerte für die Einflußziffern bei wesentlich

veränderten Verhältnissen — z. B. verstärkter Oberbau mit 30 m und 60 m langen Schienen usw. — Gültigkeit haben, wäre noch zu prüfen. Für die Berechnung der Kosten einer Zugfahrt sind diese Werte genügend genau.

Wie k_{tw} und ε errechnet werden, ist aus dem nachstehenden Beispiel ersichtlich.

Die Ausgaben für die in der gewöhnlichen Gleisunterhaltung verwendeten Stoffe betragen 11545200 $\mathcal{R}\mathcal{M}$ und der Verbrauch an Tagewerken 3269150 Tagewerke. Auf ein Tagewerk entfallen demnach $\frac{11545200}{3269150} = 3,53$ $\mathcal{R}\mathcal{M}$ für Stoff-

ausgaben. Die Lohnausgaben für ein Tagewerk betragen 6,65 $\mathcal{R}\mathcal{M}$. Mit einem Zuschlag von 19% für Verwaltungskosten und von 5,88% für Abnutzung der verwendeten Werkzeuge und maschinellen Hilfsmittel betragen die Personalkosten für ein Tagewerk 8,30 $\mathcal{R}\mathcal{M}$. Es wird demnach

$$\varepsilon = \frac{3,53}{8,30} = 0,43.$$

Kostenformel 11.

Die Kosten der Erneuerung des Oberbaues.

Der Aufwand für Erneuerung des Oberbaues hängt von der Liegezeit der Schienen, die Liegezeit von der zulässigen Abnutzung des Schienenkopfes ab.

Nach praktischen Erfahrungen und Ergebnissen von Laboratoriumsversuchen (siehe Frank „Verfahren zur Bestimmung der Abnutzung von Stahl und Eisen“, Verkehrstechnik 1927, Nr. 25, Seite 433, ferner Aufsatz von Fink „Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens“ Oktober 1929, Seite 407 und Füchsel „Über Verschleißbarkeit der Werkstoffe bei trockener Reibung“, Organ 1929, Heft 20, Seite 413) ist der Verschleiß des Schienenkopfes unter sonst gleichen Verhältnissen überwiegend proportional der Reibungsarbeit zwischen Rad und Schiene. Der Anteil an den Ausgaben für die Erneuerung des Oberbaues, der der Zugfahrt anzulasten ist, muß deshalb nach der Größe der durch die besonderen Verhältnisse der Zugfahrt veranlaßten Reibungsarbeit bemessen werden. Diese Reibungsarbeit setzt sich aus folgenden Teilen zusammen:

1. Aus der Reibung A_{g1} für die Überwindung des Reibungswiderstandes in den Achslagern sämtlicher Fahrzeuge des Zuges und des Reibungswiderstandes, der durch die elastische Zusammendrückung der Berührungsflächen von Rad und Schiene und durch die Schwankungen der Fahrzeuge um ihre lotrechte Achse sowie durch Gleiten der Räder einer Achse oder gekuppelter Achsen infolge ungleichen Durchmessers oder Radstandes hervorgerufen wird. Die durch A_{g1} bedingte, gewöhnlich mit Rollwiderstand bezeichnete Widerstandskraft bildet einen Teil der Beiwerte c_{11} und c_{w1} in den Laufwiderstandsformeln für Lokomotiven und Wagen. Die Größe der Geschwindigkeit hat auf die Größe dieser Widerstandskraft etwas Einfluß; dieser Einfluß darf aber bei der an sich geringen Größenordnung des Rollwiderstandes vernachlässigt werden. Wird hier als genügend genauer Durchschnitt dafür 1 kg/t eingesetzt, so berechnet sich die Reibungsarbeit des Rollwiderstandes während der Zugfahrt zu

$$A_{g1} = \frac{1000 \cdot L \cdot G_z}{10^6} = \frac{L \cdot G_z}{1000} \text{ in kmt.}$$

2. Aus der Reibungsarbeit infolge der Zugkräfte, die von den Triebrädern auf die Schiene übertragen werden. Diese Reibungsarbeit ist größengleich mit der für die Zugfahrt erforderlichen Zugkraft- und Leerlaufarbeit = $\eta_i \cdot A_1 + A_p$ in kmt.

3. Aus der Reibungsarbeit infolge der von den gebremsten Rädern des Zuges und der bei Anwendung der Gegendruckbremse statt der Klotzbremse von den Triebrädern auf die

Schienen übertragenen Bremskräfte. Sie ist größtenteils mit der für die Zugfahrt erforderlichen Bremsarbeit A_b in kmt.

4. Aus der Reibungsarbeit A_{b_0} in den Gleisbögen infolge des Anlaufdruckes aller führenden Räder und der Gleitbewegung der Räder auf den Schienen wegen ihrer nicht radialen Einstellung und der verschiedenen Länge des Laufweges auf der äußeren und inneren Bogenschiene. Der durch A_{b_0} veranlaßte Widerstand w_b in kg/t ist je nach der Bauart der Lokomotiven und Wagen verschieden. Bei seiner auf überwiegend geraden Strecken geringen Größenordnung kann er genügend genau als Durchschnittswert aus der Röchelschen Formel $w_b = \frac{650}{H - 55}$ in kg/t (H = Halbmesser des Bogens in m) berechnet werden. Für die ganze Zugfahrt ermittelt sich damit die Bogenreibungsarbeit $A_{b_0} = \frac{G_z \cdot L_b \cdot w_b}{1000}$ in kmt,

worin L_b die Länge sämtlicher Bogen der Strecke in km und w_b in kg/t den gemittelten Widerstand sämtlicher Bogen bezeichnet.

Die in Zahlentafel 3 zusammengestellten Werte des auf 1000 mkg Reibungsarbeit bezogenen Gewichtsverlustes q_r in Gramm infolge Abnutzung des Schienenkopfes — die Grundlagen für die Berechnung sind den vom Verein Deutscher Eisenbahnverwaltungen im Jahre 1911 veröffentlichten „Statistischen Aufzeichnungen über das Verhalten von Schienen mit besonderer Berücksichtigung der Materialbeschaffenheit in ein- und zweigleisigen Versuchsstrecken“ entnommen — lassen erkennen, daß die Reibungsarbeit der Bremskräfte einen größeren Verschleiß je 1000 mkg hat als die Reibungsarbeit der Zugkräfte. Die Richtigkeit dieses Ergebnisses wird dadurch bestätigt, daß nach den oben erwähnten Laboratoriumsversuchen der Verschleiß auch abhängig ist von der Größe des Schlupfes (Einflußziffer e_{sch}) zwischen den aufeinander abrollenden Flächen. Tatsächlich muß im Betriebe der durchschnittliche Schlupf der gebremsten Räder auf den Schienen größer sein als der von Treibrädern, weil bei Bremsungen näher und länger an die Grenze der Reibungskraft zwischen Rad und Schiene herangegangen werden muß als bei Fahrt mit Zugkraft.

geleistet wurde, auf die Größe von q_r sind noch nicht bekannt; ebenso ist der Einfluß des Baustoffes und der Herstellungsweise (Einflußziffer e_{ba}) noch umstritten. Das Verhältnis Arbeit

$\frac{Weg}{Weg}$ gibt zwar ein Maß für die Größe des Schlupfes; dieser hängt aber auch noch von der Reibungsziffer, also von der Geschwindigkeit und von der Beschaffenheit der Schienenoberfläche ab. Es genügt hier, je einen Durchschnittswert für die Reibung der Zugkräfte ($= q_{rz}$) und für die Reibung der Bremskräfte ($= q_{rb}$) einzusetzen.

Hiernach kann der durch die Zugfahrt bedingte Gewichtsverlust der Schienen aus der Beziehung $\left[q_{rz} \cdot \left(\frac{G_z \cdot L}{1000} + \eta_i \cdot A_1 + A_p \right) + q_{rb} \cdot \left(A_b + \frac{w_b \cdot L_b \cdot G_z}{1000} \right) \right] \cdot e_{br} \cdot e_{ba}$ in kg berechnet werden.

Für die Berechnung der Zugförderungskosten ist es vorerst hinreichend genau, $e_{bv} = 1$ und für $e_{ba} \cdot q_{rz}$ und $e_{ba} \cdot q_{rb}$ einen Wert einzusetzen, der je nach der Güte des Baustoffes gleich, größer oder kleiner als die aus der Schienenstatistik gefundenen Mittelwerte $q_{rz} = 0,0027$ und $q_{rb} = 0,00395$ sind. Für die z. Z. bei der Reichsbahn verwendeten Schienen erscheint z. B. $e_{ba} = 0,9$ angemessen.

Da die Schienen infolge dieser Abnutzung während ihrer Verwendbarkeit für den Zugdienst von Strecken mit größerer Verkehrsbedeutung in Strecken mit geringerer Verkehrsbedeutung oder in Nebengleise umgelegt werden müssen und bei dieser Gelegenheit auch immer der größte Teil der Schwellen, der Bettung und des Kleineisenzeuges erneuert wird, sind in die Kosten für je 1 kg abnutzbares Gewicht auch die Ausgaben für die Auswechslung mit einzurechnen. Bezeichnet T_{wh} die Zahl der für Auswechslung von 1 km Hauptbahngleis erforderlichen Tagewerke — bezogen auf 1 kg abnutzbares Gewicht —, T_{wn} die entsprechende Zahl für die Nebenbahnen, k_{tw} die durchschnittliche Lohnausgabe für ein Tagewerk einschließlich Personalverwaltungskostenzuschlag, λ das Verhältnis der auf ein Tagewerk treffenden Ausgaben für Neustoffe (abzüglich Wert für Altstoffe) zu k_{tw} auf Hauptbahnen, μ das entsprechende Verhältnis bei Nebenbahnen, so kostet der Einbau in die Hauptbahn und eine Umlegung in die

Zahlentafel 3.

Meßstelle nach Seite und Nummer der „statistischen Aufzeichnungen 1911“	Durchschnittliche Verminderung des Querschnitts bezogen auf 10^6 Lasttonnen in mm^2	Berechnete Gewichtsabnahme der Schiene in Gramm	Reibungsarbeit je Tonnenkilometer Verkehrslast = $\frac{1000(1 + z_i + z_{br} + w_b)^*}{2}$ in mkg/tkm	Gewichtsverlust auf je 1000 mkg in Gramm
a) Mit Kraft befahrene Meßstellen: (es sind nur solche gewählt, deren betriebliche Verhältnisse bekannt sind)				
S. 28 bis 29 Nr. 35 bis 37	2,40	19 000	7 000	0,00271
S. 30 bis 34 Nr. 53 bis 54	1,21	9 575	3 700	0,00259
S. 34 bis 35 Nr. 81 bis 83	0,96	7 575	2 743	0,00276
Durchschnitt	4,57	36 150	13 443	0,00270
b) Reine Bremsstrecken:				
S. 26 bis 29 Nr. 23 bis 31	2,28	17 989	5 350	0,0034
S. 36 bis 37 Nr. 90 bis 91	2,00	15 780	3 725	0,0042
S. 36 Nr. 94 bis 97	2,14	16 885	3 725	0,0045
Durchschnitt	6,42	50 654	12 800	0,00395

* z_i = indizierte Zugkraft in kg/t. z_{br} = Bremskraft in kg/t.

Anhaltspunkte für den gegenüber der Einwirkung der Reibungsarbeit selbst jedenfalls nicht bedeutenden Einfluß der Geschwindigkeit (Einflußziffer e_{va}), bei der die Arbeit

Nebenbahn oder Nebengleise $k_{tw} \cdot [T_{wh} \cdot (1 + \lambda) + T_{wn} \cdot (1 + \mu)]$ $\mathcal{R}\mathcal{M}$ je kg abnutzbares Schienengewicht und damit der Anteil der Zugfahrt an den Erneuerungskosten des Oberbaues

$$11) K_{on} = e_{ba} \cdot \left[0,0027 \cdot \left(\frac{G_z \cdot L}{1000} + \eta_i \cdot A_1 + A_p \right) + 0,00395 \cdot \left(A_b + \frac{w_b \cdot L_b \cdot G_z}{1000} \right) \right] \cdot k_{tw} \cdot [T_{wh} \cdot (1 + \lambda) + T_{wn} \cdot (1 + \mu)] \text{ in } \mathcal{R}\mathcal{M}.$$

Wie die Werte für k_{tw} , T_{wh} und T_{wn} zu ermitteln sind, ist aus dem folgenden Beispiel ersichtlich. Es beträgt der Bedarf für die Erneuerung der Schienen und Bettung von 1 km Gleis auf der Hauptbahn 1955 Tagewerke, auf der Nebenbahn 1725 Tagewerke, der Geldwert der verwendeten Stoffe abzüglich Altwert auf der Hauptbahn 28853 $\mathcal{R}\mathcal{M}$, auf der Nebenbahn 20031 $\mathcal{R}\mathcal{M}$, das abnutzbare Gewicht für 1 km Gleis auf der Hauptbahn 3700 kg, auf der Nebenbahn 3300 kg.

Demnach ist $T_{wh} = \frac{1955}{3700} = 0,53$, $T_{wn} = \frac{1725}{3300} = 0,52$ und, für $k_{tw} = 8,3 \mathcal{R}\mathcal{M}$, $\lambda = \frac{28853}{1955 \cdot 8,3} = 1,78$ und $\mu = \frac{20038}{1735 \cdot 8,3} = 1,4$.

Kostenformel 12a und 12b.

Kosten der Unterhaltung der Radreifen und der Bremsklötze.

Für die Abnutzung der Radreifen durch die Reibungsarbeit zwischen Rad und Schiene gelten die gleichen Gesetze wie für die Abnutzung der Schienen. Da z. Z. Radreifen und Schienen angenähert die gleiche Härte haben, kann die auf je ein kmt Reibungsarbeit entfallende Gewichtsabnahme bei den Radreifen gleich der Gewichtsabnahme der Schienen gesetzt werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, daß durch das nach einer bestimmten Abnutzung zur Wiederherstellung der betriebssicheren Form des Spurkranzes erforderliche Abdrehen mehr Stoff verloren geht als durch die Abnutzung. Wenn nur der Spurkranz (also nicht auch die ebene Lauffläche) des Radreifens bis zu einer nicht mehr zulässigen Form abgenutzt wird, verhält sich nach Messungen die Gewichtsabnahme durch Abnutzung zu der durch das Abdrehen durchschnittlich wie 1:5. Wenn dagegen nur die ebene Lauffläche abgenutzt wird, verhält sich die Gewichtsabnahme zu der

12a) $K_{ru1} = [2 \cdot q_{rz} \cdot (L \cdot G_1 + 1000 \cdot (\eta_i A_1 + A_p)) + 7,8 \cdot q_{rb} \cdot G_1 \cdot w_b \cdot L_b] \cdot k_r + \frac{G_1}{G_z} \cdot 1000 \cdot A_b \cdot (k_r \cdot 3 \cdot q_{rb} + k_{rb} \cdot q_{rbk})$ in $\mathcal{R}\mathcal{M}$,

und des Wagenzuges

12b) $K_{ruw} = (2 \cdot q_{rz} \cdot L \cdot G_w + 7,8 \cdot q_{rb} \cdot G_w \cdot w_b \cdot L_b) \cdot k_r + \frac{G_w}{G_z} \cdot 1000 \cdot A_b \cdot (k_r \cdot 3 \cdot q_{rb} + k_{rb} \cdot q_{rbk})$ in $\mathcal{R}\mathcal{M}$.

Diese Formeln brauchen nur in Ausnahmefällen angewendet zu werden. Die durchschnittlichen Ausgaben für Radreifen und Bremsklötze sind in den nach Formel 6 und 9 berechneten Unterhaltungskosten mitenthalten. Der Unterschied zwischen diesem Durchschnitt und dem nach Formel 12a und 12b ermittelten wirklichen Betrag wird, sofern nicht Zugfahrten auf Strecken mit sehr starken Neigungen und Bögen oder mit außergewöhnlich vielen Halten in Frage kommen, in der Regel so klein sein, daß er das Ergebnis der Rechnung nicht fühlbar beeinflusst. (Siehe Beispiel 3d im Teil III).

Teil III.

Zahlenbeispiele.

Beispiel 1.

In Abb. 15 ist für eine Wechselstrom-Güterzuglokomotive die Abhängigkeit der p-Werte und des sekundlichen Verbrauchs β in Kilowattsekunden von der Geschwindigkeit V und der Spannung — Spannungsstufen = Schaltstufen — dargestellt. Die Größe der Schaltstufen ist durch die Bauart des Reglers der Lokomotive festgelegt: Nach oben ist die Geschwindigkeit V dadurch begrenzt, daß die zulässige Stromstärke wegen der Erwärmung des Motors nicht überschritten werden darf, nach unten dadurch, daß p immer etwas größer als w_m sein muß. Mit den p-Werten der Abb. 15 ist in Zahlentafel 4 der Verbrauch an Zeit, Weg und Energie für die Beschleunigung von 0 bis zur Beharrungsgeschwindigkeit $V = 24$ km/h in der Steigung $w_m = +10$ kg/t berechnet.

beim Abdrehen durchschnittlich wie 1:1. Außerdem ist bei Triebfahrzeugen mit Stangenantrieb noch zu beachten, daß die Spurkränze der führenden Triebäder sich rascher abnutzen, daß aber immer auch die nicht führenden Triebäder um das gleiche Maß abgedreht werden müssen. Der durch die Bogenreibung veranlaßte Gewichtsverlust ist deshalb in diesem Fall um 30% zu erhöhen. Der Gewichtsverlust durch die Reibungsarbeit der Zugkraft ist also = $2 \cdot q_{rz}$, der durch die Bogenreibrungsarbeit = $(1 + 5) \cdot 1,3 \cdot q_{rb} = 7,8 q_{rb}$ zu setzen.

Beim Bremsen kommt zu der Abnutzung des Radreifens durch die Reibung zwischen Rad und Schiene noch die Abnutzung durch die Reibung zwischen Radreifen und Bremsklotz hinzu. Da der Bremsklotz den Radreifen in seiner vollen Breite abschleift, würde, wenn der Radreifen nur wegen der Bremsabnutzung abgedreht werden müßte, fast kein Stoff beim Abdrehen verlorengehen. Da ferner die Oberfläche des Radreifens nach kurzer Laufzeit bereits hartgewalzt ist, genügt es trotz des hier 100% großen Schlupfes, den Gewichtsverlust für die Abnutzung durch Bremsarbeit $(1 + 2) \cdot q_{rb} = 3 q_{rb}$ zu setzen.

Zweckmäßig wird hier auch der Verbrauch an Bremsklötzen durch die zu leistende Bremsarbeit mitberechnet. Bei der derzeitigen Härte und Zusammensetzung des Bremsklotzmaterials in Deutschland kann nach Verschleißversuchen genügend genau mit $q_{brk} = 0,02$ g je 1000 mkg gerechnet werden.

Kostet 1 g abnutzbares Gewicht des Radreifens $k_r \mathcal{R}\mathcal{M}$ und 1 g abnutzbares Gewicht des Bremsklotzes $k_{br} \mathcal{R}\mathcal{M}$ und wird die Bremsarbeit im Verhältnis G_1 zu G_z auf Triebfahrzeug und Wagenzug verteilt, so betragen die der Zugfahrt zur Last fallenden Ausgaben für die Abnutzung der Radreifen und Bremsklötze des Triebfahrzeuges

Die genau berechnete Anfahrzeit ist hiernach um 38%, der dazu gehörige Anfahrweg um 45% länger. Bei Einhaltung der aus der Mittelwertsformel errechneten Anfahrzeit würde

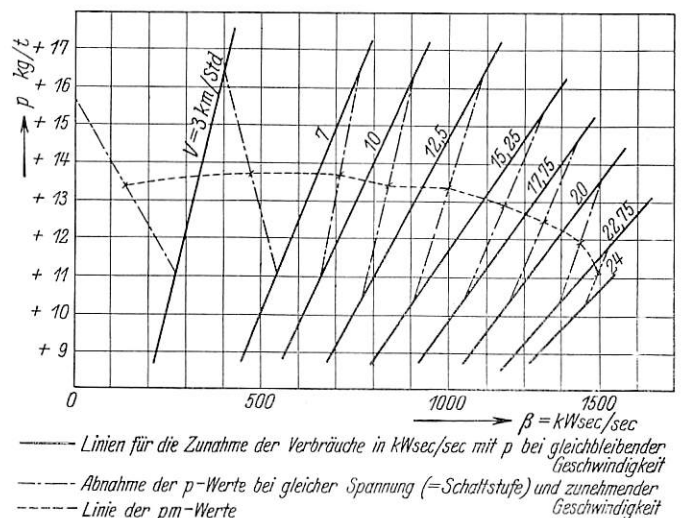


Abb. 15.

demnach die Lokomotive über die zulässige Grenze beansprucht. Auch dann, wenn der Unterschied von $1540,9 - 1056,1 = 484,8$ m der beiden Anfahrwege mit der Endgeschwindigkeit von 24 km/h durchfahren werden kann, beträgt der

Fehler immer noch 8,98% bei der Fahrzeit und 3,64% beim Energieverbrauch.

Beispiel 2.

Es wird der Weg und die Zeit für die Zunahme der Geschwindigkeit von V_1 auf V_2 eines ohne Zugkraft mit einem Laufwiderstand von $w_z = n + m \cdot V^2$ in kg/t in einem Gefälle $-w_m$ ‰ fahrenden Zuges berechnet.

a) Integration der genauen Gleichung.

$$b = \frac{1}{M} \cdot [-(\pm w_m) - (n + m \cdot 3,6^2 \cdot v^2)] = \frac{w_m - n}{M} - \frac{m \cdot 3,6^2}{M} \cdot v^2 = c_1 - c_2 \cdot v^2; \text{ damit wird nach Gl. 4) und 5)}$$

$$t = \int_{V_1}^{V_2} \frac{dv}{c_1 - c_2 \cdot v^2} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{c_1 \cdot c_2}} \cdot \left[\ln \frac{\sqrt{c_1 \cdot c_2 + c_2 \cdot v_2} - \ln \sqrt{c_1 \cdot c_2 + c_2 \cdot v_1}}{\sqrt{c_1 \cdot c_2 - c_2 \cdot v_2} - \ln \sqrt{c_1 \cdot c_2 - c_2 \cdot v_1}} \right] \text{ in sec,}$$

$$l = \int_{V_1}^{V_2} \frac{v \cdot dv}{c_1 - c_2 \cdot v^2} = \frac{1}{2 \cdot c_2} \cdot \ln \frac{c_1 - c_2 \cdot v_1^2}{c_1 - c_2 \cdot v_2^2} \text{ in m.}$$

Wird $V_1 = 20, V_2 = 60, -w_m = -4,3M = \frac{1000}{9,81} \cdot (1 + 0,01 \cdot 9) = 111,1$, ferner $n = 2,477, m = \frac{1}{2032}$, also $c_1 = \frac{4,3 - 2,477}{111,1} = \frac{1,823}{111,1}$

und $c_2 \cdot v = \frac{3,6 \cdot V}{111,1 \cdot 2032} = \frac{V}{62710}$ eingesetzt, so erhält man

$t = 1753$ Sek. und $l = 26100$ m.

b) Berechnung mit den Gleichungen 6) und 7a).

Für Stufen $\Delta V = 5$ km/h ergeben sich aus der Gleichung $p_b = 4,3 - 2,477 - \frac{V^2}{2032} = 1,823 - \frac{V^2}{2032}$ die Beschleunigungskräfte

- $p_{b40} = 1,823 - 0,787 = 1,036$ kg/t
- $p_{b45} = 1,823 - 0,997 = 0,826$ kg/t
- $p_{b50} = 1,823 - 1,230 = 0,593$ kg/t
- $p_{b55} = 1,823 - 1,489 = 0,334$ kg/t
- $p_{b60} = 1,823 - 1,772 = 0,051$ kg/t.

Für diese Werte erhält man aus den Gleichungen 6) und 7a)

- für $V = 40-45$ km/h $t = 164$ sec $= 1925$ m
- „ $V = 45-50$ km/h $t = 219$ sec $= 2892$ m
- „ $V = 50-55$ km/h $t = 342$ sec $= 5010$ m
- „ $V = 55-60$ km/h $t = 1025$ sec $= 16583$ m

für $V = 40-60$ km/h $t = 1750$ sec $l = 26410$ m.

c) Berechnung mit den Mittelwertgleichungen 8) u. 9).

Mit den gleichen Werten für p_b berechnet sich aus diesen Gleichungen

- für $V = 40-45$ km/h $t = 166$ sec $l = 1960$ m
- „ $V = 45-50$ km/h $t = 218$ sec $l = 2870$ m
- „ $V = 50-55$ km/h $t = 333$ sec $l = 4856$ m
- „ $V = 55-60$ km/h $t = 802$ sec $l = 12805$ m

für $V = 40-60$ km/h $t = 1519$ sec $l = 22491$ m.

Beispiel 3.

a) Berechnung der Verbrauchswerte.

In Zahlentafel 5 sind als Beispiel für die Durchführung der Rechnung die Verbrauchswerte für einen 550 t schweren Wagenzug gefahren von der Lokomotive, deren Leistungs- und Verbrauchstafel in Abb. 6 dargestellt ist, auf einem 50 km langen Teilabschnitt mit dem Streckenwiderstand $w_m = +1$ kg/t für einige Geschwindigkeitsstufen durchgerechnet. Zahlentafel 1 enthält die für diese Rechnung erforderlichen Werte aus der für dieses Wagenzuggewicht abgeleitete Lokomotivtafel A; in Abb. 7 ist die dazu gehörige Loko-

Zahlentafel 4.

1	2	3	Berechnung nach Mittelwertformeln 8 und 9				Berechnung nach genauen Formeln 6 und 7								
			4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$V_1 - V_2$ km/Std	$4,3 \cdot (V_2^2 - V_1^2)$	P_1 kg/t	P_2 kg/t	$\frac{P_m + P_2}{2}$ kg/t	$\frac{P_m - w_m}{2}$ kg/t	$\Delta l = \frac{7,2}{V_1 + V_2}$ m	$\Delta t = \frac{Sp. 2}{Sp. 6}$ Sek.	β kWsec/sec	$B = \frac{Sp. 10 \times Sp. 9}{Sp. 10 \times Sp. 16}$ kWsec	$x = \frac{p_1 - w_m}{p_2 - w_m}$	c_1	$lg = \frac{Sp. 13 \times Sp. 7}{m}$	ct	$tg = \frac{Sp. 15 \times Sp. 9}{Sp. 10 \times Sp. 16}$ Sek.	$B =$ kWsec
0-3	38,7	15,65	11,06	13,36	3,36	2,4000	27,6	135	3726	5,33	1,55	17,8	1,22	33,7	4550
3-7	172	16,40	11,03	13,71	3,71	0,7200	33,4	470	15698	6,22	1,41	65,4	1,26	42,1	19787
7-10	219	16,35	11,02	13,69	3,69	0,4236	25,2	709	17867	6,23	1,32	78,4	1,26	31,8	22546
10-12,5	241	16,32	10,48	13,40	3,40	0,3200	22,7	835	18955	13,17	1,57	111,3	1,50	34,1	28474
12,5-15,25	327	16,30	10,44	13,37	3,37	0,2595	25,2	1000	25200	14,32	1,60	155,4	1,54	38,8	38800
15,25-17,75	355	15,35	10,40	12,88	2,88	0,2182	26,9	1145	30800	13,38	1,56	192,2	1,51	40,6	46487
17,75-20	365	14,55	10,36	12,46	2,46	0,1907	28,3	1250	35375	12,63	1,53	227,2	1,49	42,2	52750
20-22,75	506	13,60	10,32	11,96	1,96	0,1684	43,5	1350	58725	11,24	1,49	384,5	1,45	63,1	85185
22,75-24	251	11,80	10,28	11,04	1,04	0,1540	37,2	1395	51894	6,43	1,28	308,7	1,27	47,2	65844
24	—	—	—	—	—	0,1500	72,8	1330	96824	—	—	—	—	—	—
Zusammen										—	—	1540,9	—	373,6	364423

$$ct = \frac{x+1}{2 \cdot (x-1)} \cdot \ln x; \quad c_1 = \frac{2 \cdot ct}{V_2 + V_1} \cdot \left(\frac{x \cdot V_2 - V_1}{x-1} - \frac{V_2 - V_1}{\ln x} \right)$$

Zahlentafel 5.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Station	Länge in km	Streckenwiderstand $\pm W_m$	Änderung der Geschwindigkeit $V_1 - V_2$	$4,3 \cdot (V_2^2 - V_1^2)$ aus Loktafel A	$p_m^{1)}$ aus Lok- tafel A oder B	$p_m - (\pm W_m) =$ Sp. 6 - Sp. 3	$\Delta l = \frac{Sp. 5}{Sp. 7}$		$\Sigma \Delta l$	$\frac{7,2}{V_1 + V_2}$ aus Loktafel A	$\Delta t = \Delta l \cdot \frac{7,2}{V_1 + V_2}$		β aus Loktafel A oder B	$\Delta B =$ Sp. 12 \times Sp. 14	Ind. Lok.-Arbeit		Bremsarbeit ²⁾		
							mit Kraft	ohne Kraft			mit Kraft	ohne Kraft			Zi aus Loktafel A oder B	$\Delta A_1 =$ Sp. 8 \times Sp. 16 10^6	$\frac{4,3 \cdot (V_2^2 - V_1^2)}{10^6} \cdot G_z$	$\frac{w_z \cdot G_z}{10^6} \cdot \Delta l$	$A_b =$ Sp. 18 - Sp. 19

1. Kürzeste Fahrzeit für eine größte Heizflächenanstrengung $\frac{D}{H} = 57 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$.

A	50	+1,00	0-5	108	6,88	5,88	18	—	18	1,4400	26,0	—	0,045	1,170	6870	0,126	—	—	—		
			5-10	323	6,70	5,70	56	—	74	0,4800	26,9	—	0,052	1,398	6730	0,377	—	—	—		
			10-20	1290	10,75	9,75	132	—	206	0,2400	31,7	—	0,154	4,880	9770	1,283	—	—	—		
			usw.																		
			85-90	3762	1,98	0,98	3840	—	12234	0,0411	158,0	—	0,412	65,090	4900	18,820	—	—	—	—	
			90-92,5	1962	1,58	0,58	3385	—	15619	0,0394	133,5	—	0,416	55,520	4790	16,200	—	—	—	—	
			usw.																		
B	50	+1,00	97,5-100	2123	1,38 ³⁾	0,38	5590	—	31669	0,0365	204,0	—	0,475	96,900	4800	26,850	—	—	—		
			100	—	—	—	17631	—	49300	0,0360	634,7	—	0,450	285,700	4600	81,100	—	—	—		
			100-0	43000	3,43	—	—	700	50000	—	—	40,8	0,040	1,632	—	—	30,229	2,174	28,055		
							49300	700	50000	—	2073,4	40,8	—	865,390	—	244,634	30,229	2,174	28,055		

2. Durch Auslauf verlängerte Fahrzeit.

A	50	+1,00	0-90	wie bei Ziffer 1			12234	—	12234	—	704,7	—	—	252,238	—	71,714	—	—	—
			90	—	—	—	31048	—	43282	0,0400	1241,9	—	0,360	446,900	4130	128,228	—	—	—
			90-85	3762	4,62 ¹⁾	5,62	—	669	43951	—	—	27,5	0,040	—	—	—	—	—	—
B	50	+1,00	usw.																
			35-30	1398	2,80	3,80	—	368	49920	0,1107	—	40,7	0,040	1,627	—	—	—	—	—
			30-0	3870	2,71	—	—	80	50000	—	—	19,0	0,040	0,760	—	—	2,450	0,148	2,302
					43282	6718	50000	—	1946,6	431,6	—	716,402	—	199,942	2,450	0,148	2,302		

¹⁾ Bei Fahrt ohne Dampf ist w_z einzusetzen;

²⁾ Für Gefälle mit $w_m > w_z$ ist die zur Einhaltung der größten zulässigen Geschwindigkeit erforderliche Bremsarbeit $A_b = \frac{G_z \cdot (w_m - w_z)}{10^6}$ in kmt;

³⁾ Berechnet mit Wert C aus Loktafel A.

motivtafel B aufgezeichnet. In dieser ist die übliche Lokomotivanstrengung, mit der die Werte in Zahlentafel 5 errechnet sind, durch die -----Linie gekennzeichnet.

b) Bildliche Darstellung der Verbrauchswerte.

Wird außer dem in Zahlentafel 5 für eine fahrplanmäßige und für die nach der üblichen Lokomotivanstrengung erzielbare kürzeste Fahrzeit berechneten Verbrauch an Kohle usw. noch der Verbrauch für weitere zwei größere und kleinere Fahrzeiten bestimmt und die gleiche Rechnung für zwei kleinere Wagenzuggewichte (z. B. 350 Tonnen und 100 Tonnen) durchgeführt, so erhält man die in Abb. 16 aufgezeichneten a-Linien und b-Linien für den Kohlenverbrauch bei günstigster Fahrweise in Abhängigkeit von der Fahrzeit und vom Wagenzuggewicht.

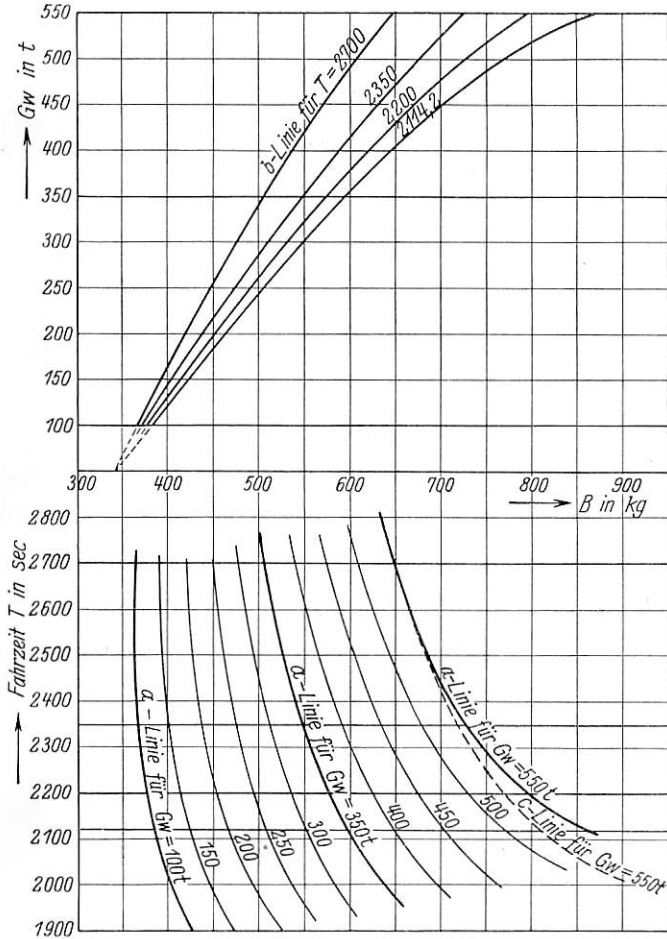


Abb. 16.

Aus diesen Linien kann für jede zwischenliegende Fahrzeit und Belastung der Kohlenverbrauch bei günstigster Fahrweise abgelesen werden.

Die Werte in der Zahlentafel 6 sind in gleicher Weise wie die der Zahlentafel 5, aber für die in der Lokomotivtafel B durch die -----Linie gekennzeichnete höhere Anstrengung während der Beschleunigungszeit berechnet. Diese höhere Anstrengung ist bei Meßfahrten mit Lokomotiven dieser Gattung bei unverändertem Blasrohr nicht nur während der Beschleunigungszeit, sondern als Durchschnitt bezogen auf die ganze Dampffahrzeit der über 100 km langen durchfahrenen Strecken durchgehalten worden, ohne daß — von erhöhter unmittelbar nicht feststellbarer Abnutzung der Lokomotive abgesehen — am Feuer oder an der Lokomotive irgendwelche schädliche Einwirkungen bemerkt werden konnten. Die mit den für die höhere Anstrengung errechneten Verbrauchswerten aufgezeichnete -----Linie c der Abb. 16 läßt erkennen, daß das Anfahren mit möglichst hohen

Zahlentafel 6.

V ₁ —V ₂	Fahrweise	Σ Δ l	Σ Δ t	Σ Δ B
0—100	Fahrt mit Dampf	12179	625	309
100	„ „ „	37121	1336	601
100—0	Bremsen	700	40	2
	zusammen . .	50009	2001	912
0—90	Fahrt mit Dampf	6474	410	192
90	„ „ „	38441	1538	554
90—50	Auslauf	4905	255	} 11
50—0	Bremsen	180	21	
	zusammen . .	50000	2224	757
0—70	Fahrt mit Dampf	2571	236	94
70	„ „ „	43325	2230	535
70—30	Auslauf	4025	294	} 13
30—0	Bremsen	80	19	
	zusammen . .	50000	2779	642

Zugkräften von einer bestimmten Fahrzeit ab für den Energieverbrauch vorteilhaft ist. So kann durch diese Fahrweise z. B. bei gleichem Kohlenverbrauch von 865 kg eine Fahrzeit von 2040 Sek. statt 2117 Sek. oder die Fahrzeit von 2117 Sek. mit einem Kohlenverbrauch von 807 kg statt von 865 kg eingehalten werden; das bedeutet also eine noch mögliche Kürzung der Fahrzeit von 3,6%, oder bei gleicher Fahrzeit eine Kohlenersparnis von 6,7%.

Die gleichen Linien werden zweckmäßig auch für die übrigen Verbrauchswerte (A₁, A_p und A_B) aufgezeichnet. Diese Linien der Verbrauchswerte haben dauernde Gültigkeit. Sie lassen die wirtschaftlichsten Fahrzeiten und Auslastungen unmittelbar erkennen, wenn sie bezogen auf ein Wagenzugtonnenkilometer umgezeichnet werden.

c) Verwendung der Verbrauchslinien für Züge mit anderem Laufwiderstand.

Die Verbrauchslinien nach Abb. 16 gelten nur für Wagenzüge, deren Laufwiderstand dem der Rechnung zugrunde gelegten entspricht. Aus den Linien kann jedoch auch der Verbrauch für Züge mit anderen Laufwiderständen in den meisten vorkommenden Fällen genügend genau abgelesen werden, wie aus der folgenden Ableitung ersichtlich ist.

Werden zwei Wagenzüge mit verschiedenen Laufwiderständen w_w und w_{wb} auf der gleichen Strecke mit der gleichen Lokomotivgattung in der gleichen Fahrzeit und Fahrweise befördert, so muß bei beiden Zügen für jede Tonne des Gesamtzuggewichts das gleiche mittlere p_m aufgewendet werden. Der auf den Wagenzug entfallende Anteil an der auf dem Weg l geleisteten Lokomotivarbeit ist demnach bei dem Zug mit dem Laufwiderstand w_{wb} in kg/t (Gewicht des Zuges =

$$= G_{wb} \text{ in t}) a_{1b} = \frac{G_{wb} \cdot (p_m + w_{wb}) \cdot l}{1 - c_{13}} \text{ in mkg und für den}$$

$$\text{Zug vom Gewicht } G_w \text{ in t, für dessen Laufwiderstand } w_w \text{ in kg/t die Verbrauchslinien gelten, } a_{1a} = \frac{G_w \cdot (p_m + w_w) \cdot l}{1 - c_{13}}$$

$$\text{d. h. es ist } a_{1a} = a_{1b}, \text{ wenn } G_w = G_{wb} \cdot \frac{p_m + w_{wb}}{p_m + w_w}.$$

$$\text{Den Wert für } p_m \text{ bezogen auf die Streckenlänge } L - L_0 \text{ in km erhält man aus der Beziehung } p_m = \frac{1000 \cdot (1 - c_{13}) \cdot A_1 - (W_1' + W_w) \cdot (L - L_0)}{(L - L_0) \cdot (G_1 + G_w)}$$

in kg/t. Der Wert für A₁ wird für den Wert von G_{wb} aus der A₁-Linie abgelesen, die Werte von W₁' und W_w für

$$V_m = \frac{(L - L_0) \cdot 60}{T - T_0} \text{ eingesetzt.}$$

$$\text{Z. B. } w_w = 2 + \frac{V^2}{4000}, \quad w_{wb} = 1,8 + \frac{V^2}{5000}; \quad G_{wb} = 550,$$

$$A_1 = 245; \quad L - L_0 = 49,3;$$

$$V_m = \frac{49,3 \cdot 60 \cdot 60}{2073,4} = 86, \quad 1 - c_{13} = 0,96,$$

$$P_m = \frac{1000 \cdot 0,96 \cdot 245 - (1180 + 2120) \cdot 49,3}{49,3 \cdot (154 + 550)} = 2,098 \text{ kg/t.}$$

$$G_w = 550 \cdot \frac{2,098 + 3,28}{2,098 + 3,85} = 497 \text{ t.}$$

Für $G_w = 497$ ist nach der b-Linie der Abb. 16 für die Fahrzeit 2114,2 der Kohlenverbrauch $B = 767$ kg, d. h. der 550 t-Zug mit dem um 14,9% kleineren spezifischen Laufwiderstand erfordert bei dieser Zugfahrt um 11,3% weniger Kohle.

d) Berechnung der Kosten.

Die Kosten werden im folgenden für die Fahrzeit nach Zahlentafel 5 Ziffer 1 für den Wagenzug mit 550 t berechnet. Die Länge $L = 50$ km sei nur ein Teilstück der ganzen Strecke von 250 km zwischen den beiden Lokomotivwechselstationen und von 500 km bis zum Wechsel des Zugbegleitpersonals. Alle vor und nach der Zugfahrt entstehenden Kosten sind deshalb diesem Teilstück nur im Verhältnis 50:250 bzw. 50:500 anzulasten.

Kostenformel 1.

Es ist nach Dienstplan und den zugewiesenen Tagewerkköpfen $l_1 = 2$, $T_{wbm} = 1,65$, $T = 35,2$, $R = 4,5$, $B_g = 865,39 + 42,8 = 908,2$, $f_r = 0,02 \cdot \left(1 + \frac{908,2}{35,2 \cdot 4,5}\right) = 0,134$, $k_{bf} = 6,85$.

Damit wird $K_{bpf} = 6,85 \cdot \left(0,2 \cdot 1,65 + 1,134 \cdot \frac{908,2}{10000}\right) = 2,950 \text{ R.M.}$

Kostenformel 2.

$B + B_0 + B_a = 865,4$, Zechenpreis der Kohle = 19 R.M/t, Zufahrtsweg 600 km, anzurechnende Frachtkosten $0,01 \cdot 600 = 6$ R.M.; also einzusetzender Kohlenpreis $19 + 6 = 25$ R.M. Damit wird

$$K_b = 0,025 \cdot 865,4 = 21,735 \text{ R.M.}$$

Nach Dienstplan ist $T_z = 31$ Min und $T_n = 448$ Min; nach besonderer Feststellung $n_a = 0,07$; $B_f = 59$, $b_k = 0,6$; da der Teilstrecke nur $\frac{1}{5}$ anzurechnen ist, wird mit $R = 4,5$, $K_{bn} = 0,2 \cdot 4,5 \cdot (0,13 \cdot 448 + 0,07 \cdot 59 + 0,6 \cdot 31) \cdot 0,025 = 1,822 \text{ R.M.}$

Kostenformel 3.

Es ist $k_w = 0,00015$ R.M/kg, $T + T_z - T_0 = 40,75$, $B_d = 865,39 + 0,2 \cdot 23,25 = 880,04$; Rostanstrengung = $\frac{60 \cdot 880,04}{40,75 \cdot 4,5} = 289 \text{ kg/m}^2/\text{h}$. Hierfür ist nach der Leistungs- und Verbrauchstafel $d = 2,7$ kg/sec. Damit wird

$$K_w = 0,00015 \cdot 40,75 \cdot 2,7 \cdot 60 = 0,987 \text{ R.M.}$$

Kostenformel 4.

Nach dem Darfverbrauch ist $k_{d1} = 0,01$ R.M., also

$$K_{d1} = 0,5 \text{ R.M.}$$

Kostenformel 5 und 6.

Nach der Werkstätten- und Lokomotivstatistik entfällt für die Unterhaltung dieser Lokomotivgattung auf einen Verbrauch von 1208 t Kohle und auf eine Wegleistung von 87000 km ein Aufwand von 1350 Arbeitsstunden für Gruppe I, von 5750 Arbeitsstunden für Gruppe II und von 600 Arbeitsstunden für Gruppe III. Nach den Zeitangaben in den vom Lokomotiv- und Zugführer geführten Lokomotivdienstzetteln fallen auf 87000 Wegkilometer 1521 Reisestunden, 122 Aufenthaltsstunden innerhalb der Zugfahrt, 966 Stunden für Fahrt vom und zum Zug, 2826 Stunden für Vorbereitungs- und Abschlusssdienst sowie für Bereithalten der Lokomotive und 27maliges Anheizen. Nach den Fahrschaulinien der Fahr-

zeitenberechnung und von Betriebsmeßfahrten sind 66% der reinen Fahrzeit, also $0,66 \cdot (1521 - 122) = 924$ Stunden und 60% des Weges, also $0,6 \cdot 87000 = 52200$ km mit Kraftverbrauch gefahren worden. Von den 1208 t des statistischen Kohlenverbrauches fallen also mit den früher angegebenen Sätzen auf die Zeit

für Fahrt zum und vom Zug 159,49 t,
für Aufenthalte während der Zugfahrt 14,82 t,
für Vorbereitungs- und Abschlusssdienst und Bereithalten 98,91 t,
für Anheizen 7,17 t,
für Fahrt ohne Kraft $(1399 - 924 \cdot 0,55 \cdot 60 \cdot 4,5) = 70,53$ t;
es verbleiben also für die Streckenfahrt mit Kraft $1208 - (156,49 + 14,82 + 98,91 + 717 + 70,53) = 960$ t.

Die durchschnittliche Rostanstrengung bezogen auf den mit Kraft befahrenen Weg ist demnach $r_s = \frac{860000}{924 \cdot 4,5} = 207 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von $V_{ms} = \frac{52200}{924} = 57 \text{ km/h}$. Für $r_s = 207$ und $V_{ms} = 57$ ist nach der Leistungs- und Verbrauchstafel $Z_{is} = 4600$, $W_{iis} = 413 + 0,04 \cdot 4600 = 597$, $1 - \eta_{is} = \frac{597}{4600} = 0,13$; $A_{is} = \frac{4600 \cdot 52200}{1000} = 240120 \text{ kmt.}$

Für die Durchschnittsgeschwindigkeit der Fahrt ohne Kraft $V_{mos} = \frac{34800}{475} = 73 \text{ km/h}$ ist nach der A_p -Linie der Lokomotivtafel B die Getriebearbeit je Minute Fahrzeit = 0,5 kmt, also $A_{mos} = 0,5 \cdot 60 \cdot 475 = 14250$ kmt; damit wird $(1 - \eta_{is}) \cdot a_{is} = \frac{0,13 \cdot 240140 + 14250}{1399 \cdot 60} = 0,54 \text{ kmt/min.}$ Mit den angegebenen Werten der Werkstättenstatistik wird $H_{ks} = \frac{1350}{860} = 1,57$, $H_{ts} = \frac{5750}{87} = 66$; nach einer Sondererhebung ist $e = 0,4$ und, da hier genügend genau mit einem Durchschnittswert gerechnet wird, $k_{HK} = k_{Ht} = 3,87$ R.M.; in diesem Betrag sind etwa 40% der gesamten Wertkosten mit-enthalten.

Aus Kostenformel 5 ergibt sich mit den vorstehend abgeleiteten Festwerten für die eingesetzte Schnellzugslokomotive

$$K_{ku} = 0,000393 \cdot \frac{B_d^2}{T - T_0}; \quad \text{für } B_d = 863,758 \text{ und } T - T_0 = 40,75$$

$$= \frac{2073,4}{60} = 34,55 \text{ wird } K_{ku} = 8,487 \text{ R.M.}$$

(Für die Fahrzeit in Zahlentafel 5 Ziffer 2 würde $K_{ku} = 0,000393 \cdot \frac{699,138^2}{32,44} = 5,891 \text{ R.M.}$.)

Nach Kostenformel 6 wird mit den abgeleiteten Festwerten

$$K_{tu} = \left(0,1022 + 0,2838 \cdot \frac{(1 - \eta_i) \cdot A_1 + A_p}{T}\right) \cdot L;$$

für $A_1 = 244,634$, $T = 35,23$, $L = 50$, $1 - \eta_i = 0,123$, $A_p = 0,26$ wird $K_{tu} = 17,330 \text{ R.M.}$

(Für die Fahrzeit in Zahlentafel 5 Ziffer 2 ist $K_{tu} = \left(0,1022 + 0,2838 \cdot \frac{0,13 \cdot 199,942 + 2,42}{39,64}\right) \cdot 50 = 15,27 \text{ R.M.}$.)

Kostenformel 7.

Es ist $H_z = 600$, $k_{Hz} = 3,87$, $z_e = 5 + 3 = 8$, $K_{je} = 188000$ R.M., $T_v = 125$ (hiervon $\frac{1}{5}$ dem Teilstück anzurechnen). $D_{st1} = 5200$ (nach Dienstplan), $\eta_d = 0,536$ (nach Statistik). Demnach

$$K_{z1} = (600 \cdot 3,87 + 0,08 \cdot 188000) \cdot \frac{35,23 + 0,2 \cdot 125}{0,536 \cdot 5200 \cdot 60} = 6,26 \text{ R.M.}$$

Kostenformel 8.

Die Kosten werden getrennt nach a) Lokomotiv-, b) Zugbegleitpersonal ermittelt, unter a) ist $0,2 T_v$, unter b) $0,1 T_v$ in die Formel einzusetzen. Es ist

$$a) K_{lp} = 2 \cdot 7100 \cdot \frac{35,23 + 0,2 \cdot 148}{60 \cdot 2600 \cdot (1 - 0,15)} = 7,4 \text{ R.M.}$$

$$b) K_{zp} = 3 \cdot 5900 \cdot \frac{35,23 + 0,1 \cdot 150}{60 \cdot 2650 \cdot (1 - 0,14)} = 6,5 \text{ R.M.}$$

Kostenformel 9.

Der Wagenzug besteht aus zwölf D-Wagen und zwei Packwagen mit einem Anschaffungswert von zusammen $K_{auz} = 938800 \text{ R.M.}$ Ferner ist $I_{stw} = 2920 \text{ R.M.}$, $z_w = 5 + 3 = 8$, und $K_{auw} = 24200 \text{ R.M.}$ für sämtliche Wagen. Damit wird

$$K_{wa} = \frac{24200 + 0,08 \cdot 938000}{2920} \cdot \frac{35,23}{60} = 19,96 \text{ R.M.}$$

Kostenformel 10.

$VB = 33800$, $G_1 = 154$, $G_w = 550$, $c_{o1} = 60$, $c_{o2} = 1/3$, $n = 56$, $(1 + \epsilon) \cdot k_{tw} = 11,87 \text{ R.M.}$, $e_{wa} = 0,5 \cdot \sqrt{4,9} = 1,1$, $e_{lo} = 0,04 \cdot 9,4 \cdot \sqrt{7,9} = 1,08$, $e_v = 0,9 + \frac{V_2}{18000} = 1,17$, $e_{st} = 6 + 0,01 \cdot 4,25 \cdot \left[\frac{(0,877 \cdot 244,6 + 0,26 + 28,06) \cdot 1000}{704 \cdot 50} - 6 \right] = 6,03$, damit wird $K_{on} = 11,083 \text{ R.M.}$

Kostenformel 11.

$e_{ba} = 0,9$, $G_z = 154 + 550 = 704$, $\eta_i = 0,877$, $A_1 = 244,6$, $A_p = 0,26$, $A_b = 28,06$, $w_b \cdot L_b = 0$, $k_{tw} \cdot T_{wh} \cdot (1 + \lambda) + T_{wn} \cdot (1 + \mu) = 8,3 \cdot (0,53 \cdot 2,78 + 0,52 \cdot 2,4) = 22,59$, damit wird $K_{on} = 15,946 \text{ R.M.}$

Kostenformel 12a und 12b.

Es ist $q_{rz} = 0,0027$, $q_{rb} = 0,0039$, $q_{brk} = 0,02$, $\eta_i \cdot A_1 + A_p = 214,77$, $A_b = 28,06$, $w_b \cdot L_b = 0$, ferner nach Sondererhebungen $k_r = 0,0013 \text{ R.M.}$, und $k_{br} = 0,0005 \text{ R.M.}$; damit wird $K_{rul} = 1,718 \text{ R.M.}$ und $K_{ruw} = 0,745 \text{ R.M.}$ Nach einer Sondererhebung ist als Durchschnittsausgabe für die Unterhaltung der Radreifen und Bremsklötze in den Kosten nach Formel 6 ein Betrag von $0,0496 \text{ R.M./km}$, in den Kosten nach Formel 9 ein Betrag von $0,000037 \text{ R.M./tkm}$ enthalten; es ist also von den nach Kostenformel 6 berechneten Ausgaben $1,718 - 50 \cdot 0,0496 = - 0,762 \text{ R.M.}$ und von dem nach Kosten-

formel 9 berechneten Betrag $0,745 - 50 \cdot 0,000037 = - 0,673 \text{ R.M.}$ noch abzuziehen.

Bildliche Darstellung der Kosten.

Werden die Kosten für je drei bis vier Wagenzuggewichte und Fahrzeiten der gleichen Strecke ermittelt, auf je eine Wagentonne umgerechnet und damit die Kostenlinien über den Wagenzuggewichten und Fahrzeiten aufgezeichnet, so kennzeichnet die Form dieser Linien das Gebiet der wirtschaftlichsten Fahrzeiten und Belastungen. Die Kostenlinien gelten jedoch zum Unterschied von den Verbrauchslinien nur so lange, als die von den Löhnen und Einkaufspreisen, Arbeitsverfahren und sonstigen Grundlagen abhängigen Zahlenfestwerte und Einflußziffern der Kostenformeln sich nicht ändern.

Beispiel 4.

Einfluß der Fahrweise auf die Größe der Verbrauchswerte und der Kosten.

In Zahlentafel 7 sind die aus den in Abb. 17 aufgezeichneten Geschwindigkeits- über Weglinien 1 und 2 berechneten Ver-

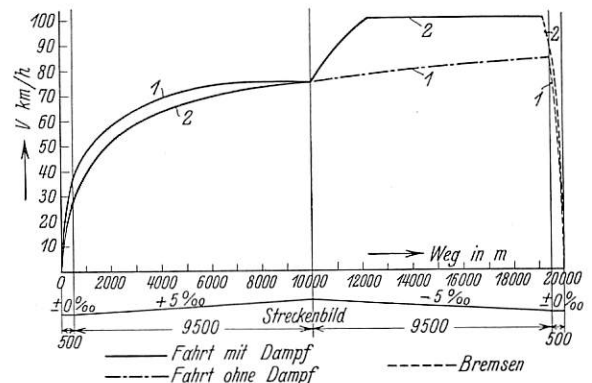


Abb. 17.

brauchswerte zusammengestellt. Die Ermittlungsweise ist aus folgendem für die Stufe $V_1 = 45$ auf $V_2 = 50$ durchgerechneten Beispiel ersichtlich. Es ist $G_1 = 154 \text{ t}$, $G_w = 450 \text{ t}$, Hundertsatz von M für die rotierenden Massen der Lokomotive $q_1 = 16,45\%$, der für die Wagen $q_w = 4,16\%$, also für den ganzen Zug $\frac{154 \cdot 16,46 + 450 \cdot 4,16}{154 + 450} = 7,3\%$. Durch die

Zahlentafel 7.

V ₁ —V ₂	Weg m	Fahrt	Verbrauch an				
			Zeit Δt in Sek.	Kohle ΔB in kg	Lokomotiv- arbeit ΔA _l in kmt	Arbeit des Getriebe- widerstandes bei Fahrt ohne Kraftverbrauch ΔA _p in kmt	Bremsarbeit ΔA _b in kmt
Fahrt nach Geschwindigkeitslinie 1:							
0—75	7482	mit Dampf	498,0	199,14	54,609	—	—
75	2518	„ „	120,8	51,34	14,569	—	—
75—83,75	9500	ohne Dampf	428,6	19,30	—	4,000	—
83,75—0	500	Bremsen	37,5	1,69	—	0,210	17,246
	20000		1084,9	271,47	69,178	4,210	17,246
Fahrt nach Geschwindigkeitslinie 2:							
0—75	10000	mit Dampf	691,6	246,51	68,441	—	—
75—100	2227	„ „	90,9	41,26	11,652	—	—
100	6993	„ „	251,8	25,18	1,838	—	—
100—0	780	Bremsen	50,6	2,28	—	0,320	23,112
	20000		1084,9	315,23	81,931	0,320	23,112

Reibungs- und Formänderungsarbeit in den Zug- und Stoßvorrichtungen sowie in den Tragfedern geht bei Geschwindigkeitsänderungen wegen der größeren Schwankungen der Zugkraft in höherem Maße Zugkraftarbeit verloren als bei Fahrt mit gleichbleibender Geschwindigkeit. Dieser Mehrverlust entspricht einer scheinbaren Vergrößerung der Masse des Zuges um etwa 2%. Demnach ist $\rho = 7,3 + 2 = 9,3\%$ einzusetzen. Nach Geschwindigkeitslinie 1 wird während der Beschleunigung von $V_1 = 45$ auf $V_2 = 50$ ein Weg $\Delta l = 330$ m durchfahren. Für $W_w = 900 + 0,1125 \cdot V^2$ und W_1' aus der Widerstandslinie der Abb. 6a ist deshalb nach früherer Ableitung

$$\Delta t = \frac{330 \cdot 7,2}{45 + 50} = 25 \text{ Sek.}, p_m = \frac{(28,23 + 0,2833 \cdot 9,3) \cdot (50 - 45)}{25} +$$

$$+ 5 = 11,2 \text{ kg/t}, Z_i = \frac{(154 + 450) \cdot 11,2 + 800 + 1154}{0,96} = 9050;$$

hierfür und für $V_m = 47,5$ km/h ist aus der Leistungs- und Verbrauchstafel $\beta = 0,452$, also $\Delta B = 0,452 \cdot 25 = 11,3$ kg,

$$\text{ferner } \Delta A_1 = \frac{9050 \cdot 330}{10^6} = 2,99 \text{ kmt.}$$

Nach Zahlentafel 7 ergibt die bei allen Stufen in gleicher Weise durchgeführte Rechnung als Endergebnis

für	Geschwindigkeitslinie	
	1	2
B	271,47 kg	315,23 kg
B — B ₀	250,48 „	312,95 „
T	18,08 min	18,08 min
T — T ₀	10,313 „	17,25 „
A ₁	69,178 kmt	81,931 kmt
A _p	4,21 „	0,32 „
$1 - \eta_i = \frac{413 \cdot (L - L_0)}{1000 \cdot A_1}$	0,0997	0,1369
$K_b = 0,025 \cdot B$	6,787 <i>R.M.</i>	7,881 <i>R.M.</i>
$K_{ku} = 0,000393 \cdot \frac{(B - B_0)^2}{T - T_0}$	2,394 „	2,231 „
$K_{tu} = L \cdot \left(0,1022 + 0,2833 \cdot \frac{(1 - \eta_i) \cdot A_1 + A_p}{T} \right)$	5,531 „	5,665 „
$K_b + K_{ku} + K_{tu}$	14,712 „	15,777 „

Demnach kostet bei gleicher Gesamtfahrzeit die Beförderung des Zuges nach Linie 2 um 7,25% mehr als nach Linie 1. Die wirtschaftlichste Fahrweise hängt von den Streckenverhältnissen ab und kann nicht überall nach der gleichen Regel durchgeführt werden. Immerhin aber kann für die Ermittlung der Fahrzeiten und für die Durchführung der Züge der Grundsatz gelten, daß bei jedem Anfahren und bei jeder Geschwindigkeitsänderung mit Zugkraft das Triebfahrzeug so stark wie möglich anzustrengen ist, weil diese Fahrweise in jedem Fall betriebliche und wirtschaftliche Vorteile bringt. (Siehe auch „Verkehrstechnische Woche“ 1930, Heft 39, S. 528 ff.).

Schlußbemerkung.

Die Vorteile genauer Berechnungen können voll erst dann ausgeschöpft werden, wenn sie nicht auf Einzeluntersuchungen beschränkt, sondern nach großen Richtlinien systematisch durchgeführt und die Ergebnisse übersichtlich zusammengestellt und gesammelt werden. Die Notwendigkeit einer Veredlung der rein statistisch ermittelten Selbstkosten z. B. eines Tonnenkilometers oder eines Zugkilometers für Kalkulationszwecke ist bekannt. Diese statistischen Selbstkostensätze geben an, was war, nicht aber, was werden wird, wenn sich die Verhältnisse der Vergangenheit irgendwie ändern. Sie lassen auch nicht unmittelbar erkennen, ob und inwieweit das Vergangene hätte wirtschaftlicher sein können. Das wünschenswerte Endziel ist deshalb, durch die genaueren Berechnungen Unterlagen zu schaffen, mit Hilfe deren die statistisch ermittelten Selbstkostensätze ohne weitläufige Einzeluntersuchungen so veredelt werden können, daß sie auch den Grad der Wirtschaftlichkeit wiedergeben. Dann wird es auch möglich sein, die statistischen Festwerte und sonstigen Einflußziffern der Kostenformeln so genau zu erfassen, daß z. B. die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Bau- und Betriebsarten nicht nur nach wenigen Versuchen angenähert geschätzt, sondern unmittelbar aus statistischen Zahlen rechnerisch bestimmt werden kann. Die in der „Zuko“ von der Hauptverwaltung der Deutschen Reichsbahngesellschaft angeordnete Aufnahme berechneter Verbrauchswerte in besondere Karteiblätter ist deshalb ganz besonders zu begrüßen.

Leistungs- und Verbrauchstafeln für Triebfahrzeuge.

Von W. Wetzler, Reichsbahnrat, München.

Vorbemerkung.

Während beim elektrischen Betrieb der Energieverbrauch für die Zugfahrten immer schon im Anschluß an die Fahrzeitberechnung mittels der genauen Motorkennlinien berechnet worden ist und die Berechnungsverfahren längst Gegenstände des technischen Unterrichtes bilden, sind Versuche dieser Art beim viel älteren Dampftrieb bis vor wenigen Jahren entweder überhaupt unterblieben oder doch nicht in die Öffentlichkeit gelangt.

Dieser auffallende Unterschied erklärt sich daraus, daß der elektrische Betrieb, von Anfang an vor die Notwendigkeit gestellt, seine Wettbewerbsfähigkeit beweisen zu müssen, viel früher gezwungen war, genaue Wirtschaftlichkeitsberechnungen aufzumachen, wie der Dampftrieb und sich hierbei nicht wie dieser auf ein vieljähriges Erfahrungsmaterial stützen konnte, sondern auf Vorausberechnungen angewiesen war. Dazu kam, daß beim elektrischen Betrieb die Kennlinien der Motoren auf ortsfesten Prüfständen mit großer Genauigkeit aufgenommen werden konnten, während beim Dampftrieb besondere Prüfanlagen mit wenigen Ausnahmen fehlten und sich der genauen Messung des Wasser- und Kohlenverbrauches während der Fahrt erhebliche Schwierigkeiten entgegenstellten.

Aus diesen Gründen konnten sich beim Dampftrieb die herkömmlichen Verfahren der Energieberechnung aus den im Mittel auf ein Kilometer oder ein Tonnenkilometer nach der Statistik treffenden Verbrauchsziffern trotz ihrer offensichtlichen Mängel überraschend lange behaupten. Es war ein beträchtlicher Schritt auf dem Weg zur größeren Genauigkeit, als man als Maß für den zu erwartenden Energieverbrauch die Arbeitsleistung in Pferdekraftstunden wählte. Als in den Jahren der Rationalisierung das Bedürfnis nach schärferer Rechnung wuchs, verbesserte man dieses Verfahren noch dadurch, daß man die auf die Arbeitseinheit treffenden Verbrauchssätze je nach der durchschnittlichen Leistung der Lokomotive während der Zugfahrt so genau wie möglich abzustufen versuchte. Einen so großen Fortschritt dieses Verfahren auch bedeutete, praktisch wurde wegen der Schwierigkeit den Lokomotivwirkungsgrad und damit die auf die Arbeitseinheit treffenden Verbrauchssätze richtig zu bemessen, nicht viel erreicht.

Als im Jahre 1924 die Aufgabe gestellt war, zum Zwecke der betriebswirtschaftlichen Wertung der Strecken*) für eine überaus große Zahl von Zugfahrten unter genauester Berücksichtigung

*) Ehrensberger, Betriebswirtschaftliche Wertung der Strecken. Organ 1925, S. 400.

sichtigung ihrer besonderen Verhältnisse — Gattung und Anstrengungsgrad der Lokomotiven, Gewicht und Zusammensetzung des Zuges, Streckenverhältnisse, Fahrzeit, Zahl der Halte und Fahrweise — den Energieverbrauch vorzuberechnen, mußten hierfür neue Hilfsmittel geschaffen werden. Diese sollten für jede, auch kleinste Leistung der Lokomotive unter Berücksichtigung ihres augenblicklichen Anstrengungsgrades in einfacher, aber einwandfreier Weise den zugehörigen Energieverbrauch liefern.

Die für ortsfeste, mit unveränderter Drehzahl laufende Dampfmaschinen gebräuchliche Darstellung — spez. Dampfverbrauch über der Leistung — erschien für Triebfahrzeuge nicht vorteilhaft, da bei diesen die beiden Faktoren, aus denen sich die Leistung zusammensetzt, Zugkraft sowohl wie Geschwindigkeit, beständig raschem Wechsel unterworfen sind. Da der Energieverbrauchsberechnung immer eine Berechnung der Fahrzeit auf Grund der zur Verfügung stehenden Zugkräfte vorausgeht, mußte eine Darstellung am geeignetsten sein, aus der für jede dieser Zugkräfte der auf die Einheit der Fahrzeit treffende Verbrauch entnommen werden kann.

Als Zugkraft wurde nicht die von der befahrenen Neigung abhängige effektive Zugkraft am Zughaken, sondern der unbeschränkten Verwendung der Tafel halber die indizierte Zylinderzugkraft Z_i gewählt. Damit war auch die Möglichkeit gegeben, im Verlauf der weiteren Berechnung die neueren Widerstandsformeln für Lokomotiven, die ein von Z_i abhängiges Glied besitzen, anzuwenden.

Das Ziel war deshalb eine Leistungs- und Verbrauchstafel für den ganzen Leistungsbereich der Lokomotive mit Schaulinien des sekundlichen Brennstoffverbrauchs β in Abhängigkeit von der Zylinderzugkraft Z_i für alle Fahrgeschwindigkeiten V .

I. Rechnerische Aufstellung der Tafeln für Dampflokomotiven.

Die zunächst als Unterlagen für die Aufstellung der Tafeln zur Verfügung stehenden Ergebnisse früherer Meßfahrten genügten nicht, da diese soweit sie überhaupt im Beharrungszustand der Lokomotive durchgeführt worden waren, sich auf die Feststellung der Grenzleistung und des ihr entsprechenden Verbrauchs beschränkt hatten.

Es blieb demnach vorerst nur übrig, den rechnerischen Weg zu beschreiten. Hierfür lagen in den Akten des ehemaligen bayerischen Staatsministeriums für Verkehrsangelegenheiten aus dem Jahre 1917 seinerzeit durch die Neuberechnung der Fahrzeiten veranlaßt, aber dann wegen der Kriegsverhältnisse unterbrochene Vorarbeiten von Ehrensberger vor, der damals schon auf Grund amerikanischer Prüfstandversuche und früherer Arbeiten von Strahl und Sanzin für Dampflokomotiven Schaulinien für den Zusammenhang zwischen Leistung und Verbrauch für das gesamte Leistungsgebiet der Lokomotive entwickelt hatte.

Bei der Fortführung dieser Arbeiten im Jahre 1924 wurde von dem eben erschienenen nachgelassenen Werk Strahls „Der Einfluß der Steuerung auf Leistung, Dampf- und Kohlenverbrauch der Heißdampflokomotiven“*) weitgehend Gebrauch gemacht. Strahl leitet darin Näherungsformeln ab, mit denen sich unter Berücksichtigung der besonderen Abmessungen von Schieber und Zylinder einer Lokomotive deren Leistung und der zugehörige Dampfverbrauch berechnen lassen. Statt nun, wie zu erwarten, mit diesen Formeln einige Lokomotivgattungen individuell durchzurechnen, beschränkt sich Strahl auf die Berechnung für zwei angenommene mittlere Zylindergrößen und Kesseldrücke bei gleichem Einheitskolbenschieber. Auf Grund der Ergebnisse dieser

Berechnung, die er in Schaubildern und Tabellen niederlegt, kommt er schließlich zu der mit Recht angezweifelte Schlußfolgerung*), daß für alle preußischen Heißdampflokomotiven unbedenklich die gleiche Betriebscharakteristik angewendet werden könne.

Bei der Aufstellung der Leistungs- und Verbrauchstafeln wurde von diesen Schaulinien und Tabellen kein Gebrauch gemacht, da von vornherein feststand, daß für Lokomotiven bayerischer Bauart mit ihren wesentlich verschiedenen Schieberabmessungen derartige Durchschnittsannahmen zu größeren Fehlern führen mußten.

Es ist aus Raummangel nicht möglich, die außerordentlich umfangreichen Gleichungen Strahls aufzuführen; es wird vielmehr im folgenden nur der Rechnungsgang kurz angegeben und nur dort länger verweilt werden, wo von den Angaben Strahls abgewichen worden ist.

1. Zylinderzugkräfte für verschiedene Füllungsgrade und Fahrgeschwindigkeiten.

Für die Ermittlung der Zylinderzugkräfte Z_i mußten zunächst die Spannungsabfälle Δp des in den Zylinder eintretenden Dampfes berechnet werden. In seiner Gleichung 1) gibt Strahl eine Näherungsformel für das Verhältnis von Δp zum Dampfdruck p_s im Schieberkasten in Abhängigkeit vom Füllungsgrad ε und von der sekundlichen Umdrehungszahl n unter Berücksichtigung des Zylinderinhaltes J in Liter und der Steuerungsabmessungen der Lokomotive. Mit der Abhängigkeit von n ist auch die Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit V km/h gegeben.

Die Gleichung wurde für eine Reihe von Füllungsgraden und bei jedem Füllungsgrad für mehrere Fahrgeschwindigkeiten V ausgewertet. In Abb. 1 sind die Werte $\frac{\Delta p}{p_s}$ in Abhängigkeit von n für $\varepsilon = 20$ und $\varepsilon = 40$ aufgezeichnet. Wie daraus ersichtlich, ordnen sich die preußischen Lokomotiven mit gleichem Schieber in der Reihenfolge ihres Zylinderinhaltes, während die beiden bayerischen Zwillingsschienenlokomotiven mit ihren größeren Schiebern erheblich tiefer liegen. Der Spannungsabfall selbst ist $\Delta p = \frac{\Delta p}{p_s} p_s$ at.

Bei allen Zwillingsschienenlokomotiven wurde als voller Schieberkastendruck p_s ein um 1 at unter dem Kesseldruck liegender Druck, als kleinster Füllungsgrad $\varepsilon = 20\%$ angenommen. Um auch kleinere Zugkräfte, als diesem Füllungsgrad und dem vollen Druck p_s entsprechen, in die aufzustellenden Schaubilder aufnehmen zu können, wurde für den Füllungsgrad $\varepsilon = 20$ die Berechnung noch für zwei verminderte Schieberkastendrücke ($\frac{2}{3} p_s$ und $\frac{1}{3} p_s$) durchgeführt.

Für die gleichen Füllungsgrade und Fahrgeschwindigkeiten wurden nach der Strahlschen Gleichung 3) die mittleren Gegendrücke p_0 beim Rückgang des Kolbens berechnet und die Werte von Δp und p_0 in die Strahlsche Gleichung 2) für den mittleren indizierten Dampfdruck p_i eingesetzt.

Damit waren die indizierten Zylinderzugkräfte $Z_i = z \frac{d^2 s}{2D} p_i$ für die verschiedenen Füllungsgrade und Fahrgeschwindigkeiten bekannt. Hierbei ist

z = Zahl der Zylinder

d = Zylinderdurchmesser in cm

s = Kolbenhub in cm

D = Triebbraddurchmesser in cm.

Bei Verbundlokomotiven wurde Δp und p_0 in gleicher Weise für Hoch- und Niederdruckzylinder berechnet, wobei für den Niederdruckzylinder an Stelle von p_s der Aufnehmer-

*) Hanomag-Nachrichten-Verlag 1924.

*) Dr. Schneider, Organ 1924, S. 387. Dr. Velte, Organ 1924, S. 402. Prof. Nordmann, Glasers Annalen 1926, S. 146.

druck p_a zu setzen war, und damit die Dampfdruckschaulinien aufgezeichnet. Aus ihnen konnten in bekannter Weise die reduzierten Dampfdrücke p_{red} und daraus die Zylinderzugkräfte Z_i für verschiedene Füllungsgrade und Fahrgeschwindigkeiten ermittelt werden.

2. Dampfverbrauch (Temperatur 300° C) für verschiedene Füllungsgrade und Fahrgeschwindigkeiten.

Für die Berechnung des stündlichen Dampfverbrauchs M einer Zwillingslokomotive gibt Strahl in seiner Gleichung 6) eine auf 100 l Zylinderinhalt bezogene Näherungsformel

$$M = \frac{4 \cdot 60 \cdot 60}{10} n \left[\frac{100 p_s (X - Y)}{i_s - 466} + \frac{C}{i_s - 466} \right] \text{ kg/h.}$$

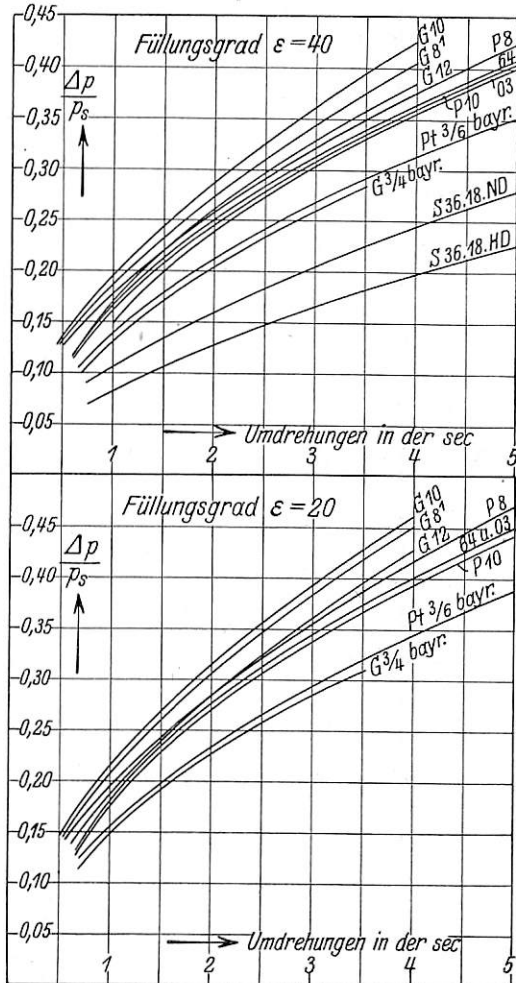


Abb. 1.

Hierin ist $4n$ die Hubzahl in einer Sekunde, i_s der Wärmehalt von 1 kg Dampf im Augenblick des Schieberabschlusses, das erste Glied in der Klammer das nutzbare, das zweite Glied das zur Deckung der Verluste einem Dampfzylinder von 1 cbm Inhalt je Hub zuzuführende Dampfgewicht in kg. X und Y sind längere von ϵ abhängige Näherungsausdrücke.

Der Dampfverbrauch für eine Sekunde ist dann

$$d = \frac{M J}{100 \cdot 3600} \frac{z}{2} \text{ kg/sec.}$$

Die Bestimmung der Größe des Verlustgliedes ist der unsicherste Teil der Berechnung. Strahl nimmt den Wärmewert des Verlustes mit $C = 60$ WE für einen Hub konstant, oder für die Zeiteinheit mit $4n$ C WE als mit n oder V linear proportional an. Diese Formel des Verlustgliedes gibt, wie sich bald herausstellte, im Gebiet der kleinen Leistungen,

bei welchen die Verluste einen wesentlichen Anteil am gesamten Dampfverbrauch ausmachen, bei den kleinen Fahrgeschwindigkeiten unwahrscheinlich niedrige, bei den großen Fahrgeschwindigkeiten unwahrscheinlich hohe Verbräuche.

Es handelt sich hier nur um die sogenannten unsichtbaren Verluste, d. h. um den Lässigkeitsverlust und den Abkühlungsverlust, da die im Zylinderdruckdiagramm sichtbaren Verluste bereits bei der Ermittlung von Z_i berücksichtigt worden sind.

Beide Verluste wachsen mit den Zylinderabmessungen und zwar der Lässigkeitsverlust mit dem Zylinderumfang und der Abkühlungsverlust mit der berührten Fläche. Als Maß kann in erster Annäherung der Zylinderinhalt J gelten. Dieser Abhängigkeit ist durch die Beziehung des Verlustgliedes auf 100 l Zylinderinhalt bereits Rechnung getragen. Beide Verluste wachsen ferner mit dem Dampfdruck; und zwar der Lässigkeitsverlust mit der Druckdifferenz vor und hinter der Undichtigkeitsstelle, der Abkühlungsverlust mit der mit dem Eintrittsdruck steigenden Dampfdichte. Als Maß für diese Abhängigkeit kann annähernd der mittlere indizierte Dampfdruck p_i gewählt werden. Schließlich wachsen beide Verluste mit der Zeitdauer ihrer Wirksamkeit, sind also für einen Hub der Umdrehungszahl umgekehrt proportional.

Man befindet sich in Übereinstimmung mit den Angaben in der Fachliteratur, wenn man für die beiden letzteren Abhängigkeiten Potenzen mit Exponenten < 1 zugrunde legt. Für das Verlustglied kann dann in erster Annäherung für einen Hub statt wie bei Strahl $C = 60$ WE gesetzt werden

$$C' \frac{\sqrt{p_i}}{\sqrt{n}} \text{ WE;}$$

für die Zeiteinheit erhält man entsprechend statt $4n \cdot 60$ WE den Wert $4n C' \frac{\sqrt{p_i}}{\sqrt{n}} = 4 C' \sqrt{p_i n}$. Der

konstante Faktor wurde mit $C' = 50$ WE so gewählt, daß sich im Gebiet der vollen Leistung der Lokomotive annähernd die gleichen Werte ergeben, wie mit der von Strahl angegebenen Größe. Die Abhängigkeit von p_i hat zur Folge, daß sich die errechneten Werte auch bei den kleinsten Fahrgeschwindigkeiten und hohen Zugkräften (Rangierbetrieb) in guter Übereinstimmung mit den hierbei von Dr. Uebelacker*) festgestellten hohen Dampfverbrauchsziffern befinden.

Es könnte auffallen, daß in dem Ausdruck für den Verlust ein konstantes Glied fehlt, also der Verlust für den praktisch möglichen Fall $p_i = 0$ ebenfalls $= 0$ wird. Der mittlere indizierte Dampfdruck wird $= 0$, wenn bei Leerlauf der Lokomotive im Auslauf oder in Gefällsfahrt stark gedrosselter Dampf aufgegeben wird, so daß sich unter starker Schleifenbildung im Zylinderdruckdiagramm die positiven und negativen Flächen aufheben. In diesem Falle wird die Temperatur des Dampfes am Ende der Kompression nicht niedriger sein als die des Eintrittsdampfes, ein Wärmeverlust beim Eintritt also vermieden werden. Da aus der Dampfwärme selbst keine Arbeit entnommen wird, muß die Arbeit für die Überwindung des Leerlaufwiderstandes beim Auslauf von der kinetischen, im Gefälle von der potentiellen Energie des Zuges geliefert werden.

Die Berechnung des Dampfverbrauchs nach der obigen Näherungsgleichung kann unter der zulässigen Annahme, daß sich der Exponent der Expansion mit dem Grad der Überhitzung nicht wesentlich ändert, nach Einsetzen des entsprechenden Wertes für i_s für Heißdampf beliebiger Temperatur erfolgen. Da aber die Überhitzung vorerst noch nicht bekannt ist, vielmehr durch den Dampfverbrauch selbst erst bestimmt wird, muß man sich zunächst mit der Ermittlung des Verbrauchs an Dampf bestimmter Temperatur begnügen. Gewählt wurde hierfür eine Heißdampf temperatur $t_{ii} = 300^\circ \text{C}$.

*) Untersuchungen über den Dampf- und Brennstoffverbrauch der Verschiebelokomotiven. Organ 1928, S. 127.

Der Dampfverbrauch d_0 kg/sec für 300°C wurde nach der für den Wert C abgeänderten Gleichung für die gleichen Füllungsgrade und Fahrgeschwindigkeiten berechnet, für welche die Zylinderzugkräfte ermittelt worden waren.

Für Verbundlokomotiven erfolgte die Berechnung nach den Angaben Strahls ebenfalls mit dieser Gleichung, die hierzu mit dem Verhältnis v der Inhalte von Hochdruck- und Niederdruckzylinder erweitert wurde. An Stelle von C

wurde hierbei $50 \sqrt{\frac{\text{Pred}}{n}}$ gesetzt.

3. Dampfverbrauch (Temperatur 300°C) in Abhängigkeit von der Zylinderzugkraft für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten.

Aus den zusammengehörigen Werten der unter Ziffer 1 bestimmten Werte Z_1 und der unter Ziffer 2 berechneten Werte d_0 wurden die Linien gleicher Fahrgeschwindigkeit und die Linien gleichen Füllungsgrades aufgezeichnet. Diese Schaulinien geben die Leistungs- und Verbrauchstafel der mit Dampf gleicher Temperatur belieferten Lokomotivdampfmaschine. Im ersten Quadranten der Abb. 2 ist sie für eine Lokomotive der Gattung S 36.18 aufgezeichnet. Die Linien gleicher Fahrgeschwindigkeit krümmen sich mit zunehmendem Füllungsgrad wegen der schlechter werdenden Dampfausnützung nach unten; die Linien gleichen Füllungsgrades fallen wegen der steigenden Drosselungsverluste mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit.

4. Dampfverbrauch (Temperatur $t_{\text{ü}}^\circ\text{C}$) in Abhängigkeit von der Zylinderzugkraft für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten.

Wenn das für eine vorgeschriebene Leistung erforderliche sekundliche Dampfgewicht bestimmter Temperatur festliegt, kann auch angegeben werden, mit welcher Temperatur der Kessel dieses Dampfgewicht zur Verfügung stellt. Für diese Temperatur wäre der Verbrauch erneut zu berechnen. Mit großer Annäherung führt zum gleichen Ergebnis die aus der Wärmeleichung ableitbare Faustformel, nach der einer um 5° höheren Überhitzung ein Minderverbrauch an Dampf von 10% entspricht. Da die Heißdampf Temperatur $t_{\text{ü}}$ nicht in ihrer Abhängigkeit von d_0 , sondern nur von dem erst zu ermittelnden wirklichen Dampfverbrauch d kg/sec bei dieser Temperatur $t_{\text{ü}}$ gegeben ist, würde die Umrechnung von d_0 auf d eine Näherungsrechnung erfordern.

Einfacher ist es, für mehrere Werte d von der Temperatur $t_{\text{ü}}$ mittels der Faustformel

$$d = d_0 \left(1 - \frac{t_{\text{ü}} - 300}{500} \right)$$
 das zugehörige Dampfgewicht d_0 von 300° zu bestimmen, das dieselbe Leistung in der Lokomotivdampfmaschine hervorzubringen imstande ist, wie d . Aus der Schaulinie $d = f(d_0)$ kann dann umgekehrt für jedes d_0 das zugehörige d abgelesen werden.

Im zweiten Quadranten der Abb. 2 stellt das Geradenbündel die Funktionen $d = d_0 \left(1 - \frac{t_{\text{ü}} - 300}{500} \right)$ für verschiedene Werte der Heißdampf Temperatur $t_{\text{ü}}$ dar. Die Heißdampf Temperaturen liegen entweder in Abhängigkeit von der Heizflächenbelastung $D/H = \frac{3600 d}{H}$ kg/m² h vor oder sie sind in ihrer Abhängigkeit von der Rostanstrengung

$B/R = \frac{3600 \beta}{R}$ kg/m² h bekannt und können für eine bestimmte

Lokomotive und Kohlensorte mittels der Verdampfungsziffer β auf die Heizflächenanstrengung bezogen werden. Horizontale durch die zu den Heißdampf Temperaturen $t_{\text{ü}}$ gehörenden Heizflächenanstrengungen schneiden die zugehörigen Strahlen für $t_{\text{ü}}$ nach der gesuchten Schaulinie $d = f(d_0)$.

Über die Höhe der Heißdampf Temperaturen macht Strahl in seinem letzten Werk keine Angaben. Bei der Aufstellung der Tafel wurde deshalb auf eine frühere Arbeit

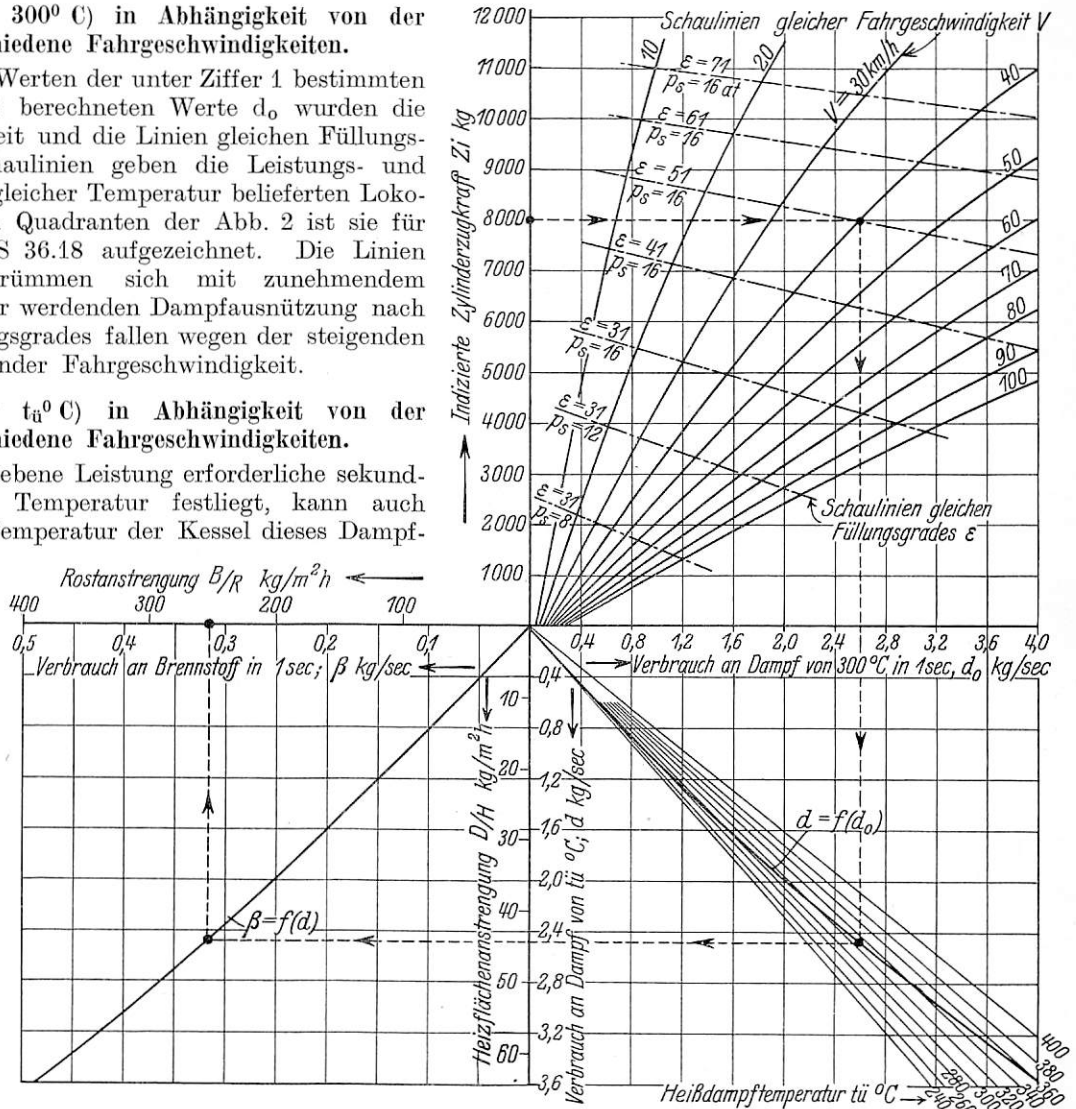


Abb. 2.

Strahls*) zurückgegriffen, in der sich Näherungsformeln für die Bestimmung von $t_{\text{ü}}$ in Abhängigkeit von der Rostanstrengung unter Berücksichtigung der Kesselabmessungen finden.

5. Kohlenverbrauch.

Ist die Verdampfungsziffer $\beta = \frac{d}{\beta}$ in ihrer Abhängigkeit von der Heizflächen- oder Rostanstrengung bekannt, so kann in einem weiteren Quadranten (Abb. 2) die Schaulinie $\beta = f(d)$ eingetragen und über ihr der Kohlenverbrauch β kg/sec abgelesen werden. Für β gibt Strahl in seinem letzten Buch nur eine als für alle preußischen Heißdampf-

*) Der Wert der Heizfläche eines Lokomotivkessels für Verdampfung usw. Z. d. V. d. I. 1917, S. 257.

lokomotiven allgemein gültig bezeichnete Formel an. Es wurden deshalb die in der früheren Arbeit Strahls für β unter Berücksichtigung der Kesselabmessungen entwickelten Näherungsgleichungen angewendet.

Wie aus dem eingezeichneten Linienzug in Abb. 2 ersichtlich ist, kann nunmehr für jede Zylinderzugkraft Z_i und Fahrgeschwindigkeit V der Füllungsgrad ε , der Dampfverbrauch d_0 für 300°, die Dampftemperatur $t_{ü}$, der wirkliche Dampfverbrauch d , die Heizflächenanstrengung D/H , der Kohlenverbrauch β und die Rostanstrengung B/R abgelesen werden. Schaubilder dieser Art wurden für die im bayerischen Netz meist verwendeten Lokomotivgattungen entwickelt und aus ihnen durch Umzeichnen die Leistungs- und Verbrauchstafeln hergestellt. In Abb. 6 des vorausgehenden Aufsatzes von Ehrensberger „Die Kosten einer Zugfahrt in Abhängigkeit von der Fahrweise und der Anstrengung des Triebfahrzeuges“ ist die Tafel für die S 36.18 Lokomotive abgebildet.

Die Schaulinien dieser Tafeln wurden in Richtung der Ordinate durch die Linie der größten im normalen Betrieb durch die Reibung zwischen Rad und Schiene erreichbaren Zugkraft abgegrenzt. Die Größe dieser Zugkraft hängt von der Gleichmäßigkeit des Zylinderdruckdiagramms ab und fällt mit der Fahrgeschwindigkeit. Praktisch erprobte mittlere Werte der je t Reibungsgewicht erreichbaren Zylinderzugkraft Z_i sind 220 kg für $V=0$ km/h, 200 für $V=20$ und 180 für $V=40$.

In der Richtung der Abszisse besteht wegen der Elastizität des Kessels keine so scharfe Grenze. Für die Fahrzeitberechnung wird gewöhnlich vorgeschrieben, daß eine bestimmte Heizflächenanstrengung, in der Regel 57 kg/m²h nicht überschritten werden soll. Es wurde deshalb in dem zugehörigen Abszissenpunkt eine Senkrechte errichtet, die auf den Linien gleicher Fahrgeschwindigkeit Zugkräfte abschneidet, die um den Zugwiderstand vermindert, auf eine Tonne bezogen und über V aufgetragen das übliche s/V -Diagramm der Lokomotive liefern.

II. Vergleich der gerechneten Werte mit Meßergebnissen.

Leistungs- und Verbrauchstafeln dieser Art wurden im Jahre 1924 und 1925 für die im bayerischen Netz meist verwendeten Lokomotiven bayerischer und preußischer Bauart aufgestellt. Die wichtigste Aufgabe war nunmehr, festzustellen, wieweit die theoretische Rechnung mit der Wirklichkeit übereinstimmt. Der Vergleich mit den Ergebnissen früherer Versuchsfahrten war nicht überzeugend, da die gemessenen Verbrauchswerte nur auf die Durchschnittsgeschwindigkeiten über größere Abschnitte bezogen werden konnten.

Eine genaue Überprüfung konnte erst nach Herausgabe der umfangreichen Meßergebnisse der vom Reichsbahn-Zentralamt in vorbildlicher Weise durchgeführten Versuchsfahrten erfolgen. Wie bekannt war es durch Verwendung einer Bremslokomotive als Zugbelastung hierbei möglich gewesen, durch Fahrten im Beharrungszustand der Lokomotive bei gleichbleibender Füllung und Fahrgeschwindigkeit die Leistungs- und Verbrauchsgrößen in ihren funktionellen Zusammenhängen zu ermitteln.

Dieser Vergleich wurde zur besonderen Pflicht, nachdem Prof. Nordmann*) auf Grund einer Gegenüberstellung der den Tabellen in Strahls letztem Werk entnommenen und der gemessenen Dampfverbrauchswerte vor der Anwendung der Strahlschen Werte warnte und insbesondere darauf hinwies, daß auch die Arbeiten Ehrensbergers über die Wirtschaftlichkeit der Strecken in dieser Beziehung einer ersten Nachprüfung bedürften. Die bei den Arbeiten Ehrens-

*) Neuere Ergebnisse aus den Versuchen des Eisenbahn-Zentralamtes mit Dampflokomotiven. Glasers Annalen 1926, S. 147.

bergers verwendeten Verbrauchswerte stammen jedoch nicht aus diesen Tabellen, sondern sind mit den Näherungsformeln für jede Lokomotive unter Berücksichtigung ihrer besonderen Schieber- und Zylinderabmessungen berechnet worden, so daß der Nachweis, wieweit die so berechneten Werte mit den Meßergebnissen übereinstimmen, noch aussteht. Im folgenden soll versucht werden, diesen Nachweis zu erbringen. Dabei werden auch die errechneten Heißdampftemperaturen und Verdampfungsziffern mit den Versuchswerten verglichen werden.

1. Dampfverbrauch. Die zu vergleichenden Werte müssen vor allem auf eine völlig einheitliche Grundlage gebracht werden. Die berechneten Dampfverbrauchswerte liegen in kg/sec in Abhängigkeit von Z_i für alle Fahrgeschwindigkeiten vor, die gemessenen in kg/PS₁h und kg/PS₀h in Abhängigkeit von der Zughakenleistung N_e für zwei bis vier Fahrgeschwindigkeiten. Für die Gegenüberstellung erschien es zweckmäßiger, die gerechneten Werte in die Form der gemessenen zu bringen, da die Zahlenwerte kg/PS_h durch Veröffentlichungen in weiten Kreisen bereits bekannt sind.

Auf den nächstliegenden und beweiskräftigsten Vergleich auf Grund der indizierten spez. Dampfverbrauchsziffern mußte leider verzichtet werden, da auch vom Reichsbahn-Zentralamt*) in Übereinstimmung mit Erfahrungen im bayerischen Netze die indizierten Leistungen wegen des Indikatorfehlers nicht genau ermittelt werden konnten. Um die effektiven spez. Dampfverbrauchsziffern vergleichen zu können, muß der Lokomotivwiderstand, der aus dem gleichen Grunde aus den Meßergebnissen nicht einwandfrei feststellbar und deshalb nach einer Erfahrungsformel zu bestimmen ist, in die Umrechnung eingeführt werden.

Verglichen wurden alle Lokomotiven und Fahrgeschwindigkeiten, für die sowohl Berechnungen als auch ausführliche Meßergebnisse vorlagen; in die Zahlentafel konnten jedoch aus Raummangel nur einige wenige Lokomotiven und Fahrgeschwindigkeiten aufgenommen werden. Die Auswahl hierfür erfolgte nach dem Gesichtspunkt, Lokomotiven mit verschiedener Achsanordnung, Dampfdehnung, Fahrgeschwindigkeit und Überhitzung zu vergleichen. Von den durchgerechneten Güterzuglokomotiven standen ausreichende Meßwerte leider nur für die Gattung G 12 und zwei Fahrgeschwindigkeiten zur Verfügung. Die Zahlentafel enthält in

Spalte 1. Die gemessene Fahrgeschwindigkeit V km/h.

Spalte 2. Die gemessene effektive Leistung am Zughaken auf der Waagerechten N_e in PS.

Spalte 3. Die daraus errechnete effektive Zugkraft am Zughaken auf der Waagerechten $Z_e = \frac{N_e \cdot 270}{V}$ kg.

Spalte 4. Die zugehörige indizierte Zugkraft $Z_i = Z_e + W_1$, wobei W_1 der Lokomotivwiderstand auf der Waagerechten ist. Für seine Berechnung wurde die auch von Strahl vorge-

schlagene Form $W_1 = 2,5 G_1 + c_{12} G_2 + 6 \left(\frac{V}{10}\right)^2 + c_{13} Z_i = W_1' + c_{13} Z_i$ verwendet. G_1 ist das auf Lauf- und Tenderachsen, G_2 das auf den gekuppelten Achsen ruhende Gewicht in Tonnen, c_{12} ein von der Zahl der Kuppelachsen und Zylinder abhängender Festwert, $c_{13} Z_i$ der zusätzliche innere Widerstand der Lokomotive. Eine Nachprüfung auf Grund von Versuchen hat ergeben, daß die Strahlsche Annahme eines für alle Lokomotivgattungen gültigen Wertes für c_{13} in Höhe von 4% der Zylinderzugkraft ohne fühlbaren Fehler zulässig ist.

Spalte 5. Den errechneten zu Z_i und V gehörenden Verbrauch an Dampf d_0 kg/sec von 300°. Er wird für den Wert Z_i

*) Nordmann, Theorie der Dampflokomotive auf versuchsmäßiger Grundlage. Organ 1930, S. 244.

Zahlentafel.

1	2	3	S 36.18. (S 3/6 bayr.)					P 46.19. (P 10 pr.)				
			4	5	6	7	8	4	5	6	7	8
60	400	1800	2750	1,28	300	11,60	12,00	3010	1,60	289	14,73	14,00
	600	2700	3700	1,68	320	9,66	9,80	3940	1,96	302	11,70	11,50
	800	3600	4140	2,11	334	8,84	8,80	4880	2,36	314	10,62	10,50
	1000	4500	5550	2,56	346	8,35	8,25	5810	2,81	324	9,60	9,55
	1200	5400	6500	3,05	353	8,15	7,85	6750	3,29	332	9,25	9,05
	1400	6300	7310	3,51	357	8,00	7,55	7700	3,82	336	9,12	8,70
80	400	1350	2460	1,56	315	13,64	14,40	2710	1,87	312	16,42	16,30
	600	2075	3150	1,96	331	11,02	11,30	3410	2,30	321	13,22	13,00
	800	2700	3860	2,38	343	9,70	9,80	4120	2,73	328	11,65	11,40
	1000	3370	4560	2,84	351	9,18	9,15	4800	3,22	335	10,78	10,40
	1200	4050	5240	3,30	358	8,75	8,45	5520	3,74	341	10,28	9,85
	1400	4725	5960	3,80	360	8,55	8,20	6220	4,27	346	9,98	9,55
100	400	1080	2410	1,94	333	16,30	17,20	2650	2,11	300	19,00	17,90
	600	1620	2970	2,34	343	12,85	13,20	3210	2,56	314	14,91	14,15
	800	2160	3430	2,72	352	10,98	11,40	3790	3,00	325	12,82	12,50
	1000	2700	4080	3,27	358	10,40	10,60	4350	3,52	333	11,87	11,80
	1200	3240	4650	3,74	359	9,88	10,00	4900	4,07	340	11,25	11,25

1	2	3	G 56.16. (G 12 pr.)				
			4	5	6	7	8
25	400	4320	5490	1,29	311	11,30	11,35
	600	6580	7820	1,74	330	9,85	9,90
	800	8640	9980	2,20	348	8,95	9,30
	1000	10800	12250	2,80	365	8,76	8,90
	1200	12900	14400	3,45	376	8,80	8,90
	40	400	2700	3920	1,53	310	13,45
600		4050	5260	1,91	327	11,00	9,45
800		5400	6650	2,31	345	9,48	8,85
1000		6750	8050	2,74	361	8,65	8,65
1200		8100	9510	3,26	373	8,35	8,45
1400		9450	10900	3,88	379	8,35	8,45

1	2	3	P 35.17. (P 8 pr.)					Pt 35.15. (64)				
			4	5	6	7	8	4	5	6	7	8
40	300	2025	2820	1,00	285	12,36	11,40	2630	0,825	344	9,04	9,40
	400	2700	3520	1,21	300	10,88	10,30	3310	1,045	352	8,40	8,60
	500	3375	4220	1,46	312	10,26	9,80	4010	1,28	362	8,06	8,10
	600	4050	4930	1,73	322	9,92	9,50	4720	1,54	371	7,92	7,85
	700	4725	5620	2,03	330	9,81	9,30	5410	1,80	381	7,72	7,65
	800	5400	6340	2,36	336	9,86	9,25	6120	2,08	392	7,63	7,60
	900	6075	7050	2,70	343	9,86	9,25	6800	2,40	403	7,62	7,60
60	300	1350	2240	1,15	302	13,74	12,80	2030	0,93	345	10,15	10,30
	400	1800	2710	1,39	316	12,12	11,40	2500	1,13	354	9,06	9,05
	500	2250	3170	1,58	327	10,78	10,55	2960	1,32	363	8,30	8,25
	600	2700	3650	1,83	333	10,24	10,20	3440	1,56	372	8,00	7,90
	700	3150	4120	2,10	338	10,21	9,90	3900	1,79	382	7,67	7,60
	800	3600	4580	2,36	342	9,73	9,75	4370	2,05	392	7,50	7,45
80	300	1013	2060	1,41	316	16,39	15,40	1860	1,09	360	11,50	11,90
	400	1350	2420	1,62	325	13,85	13,30	2210	1,28	367	10,00	10,15
	500	1687	2770	1,84	333	12,44	12,10	2550	1,46	371	9,02	9,00
	600	2075	3120	2,06	341	11,49	11,30	2910	1,68	377	8,48	8,45
	700	2362	3470	2,31	347	10,88	10,90	3260	1,90	385	8,13	8,15
	800	2700	3820	2,61	354	10,45	10,60	3620	2,03	393	8,00	8,00

aus Spalte 4 den Schaulinien $d_o = f(Z_i)$, die als Ergebnis der Berechnung für jede Lokomotive vorliegen, entnommen. Sie sind in Abb. 2 für eine Lokomotive der Gattung S 36.18 angegeben und können für die übrigen in den Vergleich einbezogenen Lokomotiven und Fahrgeschwindigkeiten aus den zusammengehörigen Werten von Z_i (Spalte 4) und d_o (Spalte 5) aufgezeichnet werden.

Spalte 6. Die bei der Fahrgeschwindigkeit V und der Leistung N_e gemessene Dampf Temperatur $t_{ü}$. Gewöhnlich

ist sie in Abhängigkeit von der Heizflächenanstrengung D/H angegeben, kann aber, da $N_e = D/H \frac{H}{D/N_e}$ ist, auf N_e bezogen werden. Hierbei ist der gemessene spez. Dampfverbrauch D/N_e den Schaulinien zu entnehmen.

Spalte 7. Den gerechneten spez. Verbrauch an Dampf D'/N_e bei der gemessenen Temperatur $t_{ü}$ nach Spalte 6. Der für Z_i und V abgelesene gerechnete sekundliche Verbrauch an Dampf für 300^0 (Spalte 5) wird zunächst auf die Temperatur $t_{ü}$ mit der Faustformel $d' = d_o \left(1 - \frac{t_{ü} - 300}{500}\right)$ umgerechnet und dann auf die Leistung N_e und 1 Stunde bezogen $D'/N_e = \frac{d' \cdot 3600}{N_e}$ kg/PS_eh.

Spalte 8. Den bei der Temperatur $t_{ü}$ gemessenen spez. Verbrauch an Dampf D/N_e kg/PS_eh aus den Versuchsschaulinien. Soweit in diesen Werten der Speisepumpendampf mit enthalten ist, wurde er entsprechend der Angabe von Prof. Nordmann in Höhe von 2% des Dampfverbrauchs in Abzug gebracht.

Die Werte D'/N_e und D/N_e sind, da sie sich auf gleiche Dampfspannung, Dampftemperatur, Zugkraft und Fahrgeschwindigkeit beziehen, vollkommen vergleichsfähig.

Die Übereinstimmung der gerechneten Dampfverbrauchszahlen mit den gemessenen ist im allgemeinen sehr gut; sie ist, wie zu erwarten, besser im Gebiet der großen, nicht so gut im Gebiet der kleinen Leistungen, wo sowohl die Rechnung wegen des Einflusses des Verlustgliedes als auch die Messung unsicherer sind. Immerhin ist die Übereinstimmung noch so, daß die bei der Entwicklung des Verlustgliedes getroffenen Annahmen als genügend genau bestätigt sind.

Wäre die für den Lokomotivwiderstand verwendete Formel zu ungenau, so müßten sich größere Abweichungen bestimmter Richtung insbesondere bei den kleinen Leistungen und hohen Fahrgeschwindigkeiten ergeben; wäre der Einfluß der Überhitzung auf den Dampfverbrauch falsch bewertet, müßte dies in größeren Abweichungen bei hohen Dampftemperaturen in Erscheinung treten. Abweichungen im

bestimmten Sinne konnten weder bei den in die Zahlentafel aufgenommenen, noch bei den übrigen zum Vergleich herangezogenen Lokomotiven festgestellt werden. Bei einigen besonders weit auseinander liegenden Werten der G 12-Lokomotive bei 40 km/h Fahrgeschwindigkeit läßt ein Vergleich mit anderen Lokomotiven einen Fehler in der Messung nicht ausgeschlossen erscheinen. Sehr gut ist die Übereinstimmung auch bei der Verbundlokomotive S 36.18.

2. Dampftemperaturen und Kohlenverbrauch. Die nach den früheren Angaben Strahls für jede Lokomotive besonders berechneten Dampftemperaturen lagen höher, die Verdampfungsziffern niedriger als die gemessenen. Um auch die Brauchbarkeit der von Strahl in seinem nachgelassenen

Werk angegebenen Formel $\delta = 4,48 + \sqrt{20 - \frac{4,45}{1000} \frac{D}{R}}$ für $t_{ii} = 330^\circ$ und Kohle von 6700 WE nachprüfen zu können, wurden in Abb. 3 neben den nach dieser Formel berechneten Werten δ noch die gemessenen, auf gleichen Heizwert und gleiche Überhitzung umgerechneten Werte für eine Anzahl von Lokomotivgattungen aufgezeichnet.

Die Abbildung zeigt, daß die Strahlsche Funktion mindestens in ihren Festwerten einer Abänderung bedürfte,

Wert D/N_e kg/PS_e h abgelesen und daraus der stündliche Dampfverbrauch $D = D/N_e \cdot N_e$ kg/h und die Heizflächenanstrengung D/H kg/m² h berechnet. Hierfür wird B kg/h und t_{ii} den Schaulinien entnommen. Es ist dann der sekundliche

Brennstoffverbrauch $\beta = \frac{B}{3600}$ kg/sec und der sekundliche

Dampfverbrauch $d = \frac{D}{3600}$ kg/sec. Mit den zusammen-

gehörigen Werten von Z_1 und β kann die Leistungs- und Verbrauchstafel aufgezeichnet werden.

IV. Aufstellung der Tafeln für andere Triebfahrzeuge.

Die Darstellungsform der Leistungs- und Verbrauchstafel ist in gleicher Weise für alle Triebfahrzeuge geeignet. Wie bei Dampflokomotiven können auch bei Fahrzeugen mit elektrischen Motoren oder Verbrennungsmotoren die Tafeln rein rechnerisch ermittelt werden. Im folgenden soll jedoch für eine elektrische Lokomotive und einen Dieseltreibwagen nur kurz angegeben werden, wie die Tafeln aufgestellt werden können, wenn ausreichende Prüfstandmessungen für die Motoren vorliegen.

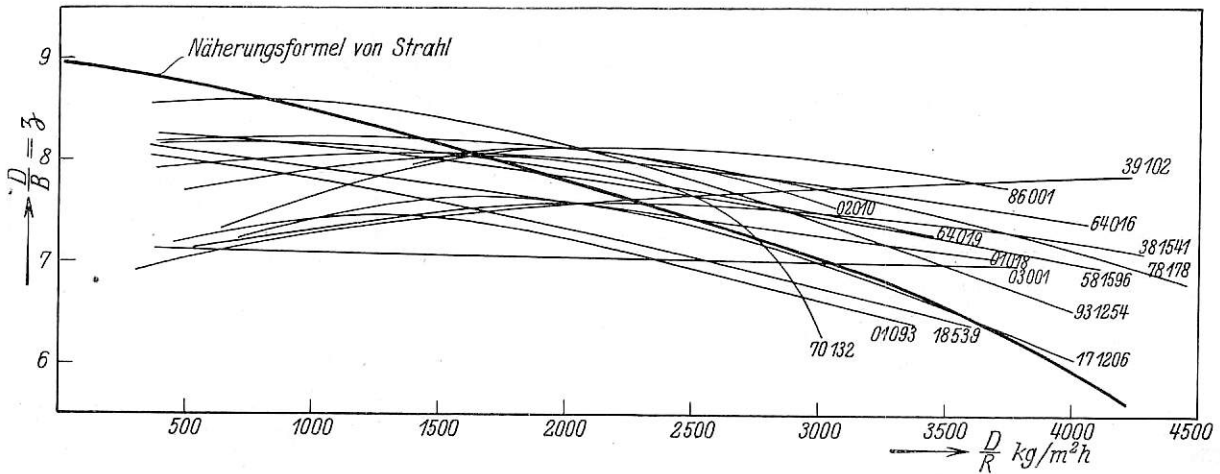


Abb. 3. Verdampfungsziffer δ in Abhängigkeit von der auf 1 m² Rostfläche und Stunde treffende Dampfmenge.

um in die Mitte der gemessenen Werte liegen zu kommen. Im übrigen sind die Abweichungen zwischen den einzelnen Lokomotivgattungen doch so groß, daß es entsprechend der Ansicht von Prof. Nordmann nicht zulässig ist, eine wie immer geartete für alle Lokomotiven gültige Form der Verdampfungsziffer zu verwenden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß mit den von Strahl in seinem nachgelassenen Buch angegebenen Formeln die Leistung und der Dampfverbrauch einer Lokomotive in hinreichender Übereinstimmung mit der Wirklichkeit berechnet werden können, wenn die Heißdampftemperaturen bekannt sind. Diese, wie auch die Verdampfungsziffern müssen aus unmittelbaren Versuchen entnommen oder unter Anlehnung an Meßergebnisse für Kessel ähnlicher Bauart gewählt werden.

III. Aufstellung der Tafeln für Dampflokomotiven auf Grund von Meßergebnissen.

Die Meßergebnisse stehen in der Regel in Form folgender Schaulinien zur Verfügung: Spez. Dampfverbrauch D/N_e über N_e für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten, stündlicher Brennstoffverbrauch B und Heißdampftemperaturen t_{ii} über der Heizflächenanstrengung D/H . Für jede Fahrgeschwindigkeit und einige Werte von N_e wird, wie in Abschnitt II bei Spalte 1 bis 4 angegeben, Z_1 ermittelt. Für die gleichen Werte V und N_e wird aus den gegebenen Schaulinien der zugehörige

Elektrische Lokomotive.

Die Kennlinien der Motoren, d. h. Drehzahl n, Strom J, zugeführte elektrische Leistung N_e , Wirkungsgrad η und bei Wechselstrom $\cos \varphi$ in Abhängigkeit vom Drehmoment M_d seien für die einzelnen Spannungsstufen U gegeben. Der indizierten Zylinderzugkraft der Dampflokomotive würde die auf den Luftraum des Motors bezogene Zugkraft entsprechen. Wegen der Schwierigkeit, die mechanischen und elektrischen Verluste im Motor zu trennen, wird die Zugkraft Z auf die Motorwelle oder, wie der Verbrauch an elektrischer Arbeit, auf die Motorklemme bezogen. Der Verbrauch der Hilfsmotore n und bei Wechselstrom der des Transformators ist getrennt zu berechnen. Für jede Spannungsstufe U Volt und mehrere Werte von $V = 60 n \frac{D \pi}{1000}$ km/h, wobei $\frac{D \pi}{1000}$ das Übersetzungsverhältnis und n die Drehzahl in der Min. ist, wird M_d mkg, J Amp., N_e kW, η und bei Wechselstrom $\cos \varphi$ den Kennlinien entnommen. Es ist dann $Z_{motor} = \frac{M_d \cdot 2}{\frac{D \pi}{1000}}$ kg und der Verbrauch an elektrischer Arbeit $\beta_{motor} = \frac{U J}{1000} = N_e$ kWsec bei Gleichstrom und $\frac{U J \cos \varphi}{1000} = N_e$ kWsec bei Wechselstrom. Die elektrische Arbeit an der Motorklemme läßt sich auch aus der mechanischen Arbeit an der Motorwelle und

den gesamten Motorverlusten ermitteln. Mit den zusammengehörigen Werten von Z und β für gleiche Fahrgeschwindigkeiten wird die Leistungs- und Verbrauchstafel aufgezeichnet. In die Tafel werden noch die den Füllungsradlinien der Dampflokomotiven entsprechenden Linien gleicher Spannung U eingetragen, und die Zugkräfte und Leistungen durch die Linien der nach besonderer Vorschrift festzusetzenden Anfahrzugkraft, Stunden- und Dauerleistung abgegrenzt. In Abb. 4 ist die Leistungs- und Verbrauchstafel für eine elektrische Wechselstrom-Schnellzuglokomotive aufgezeichnet.

Dieseltreibwagen.

Aus Prüfstandversuchen sind in der Regel gegeben: Der spez. effektive Brennstoffverbrauch B/N_e g/PS_eh, der

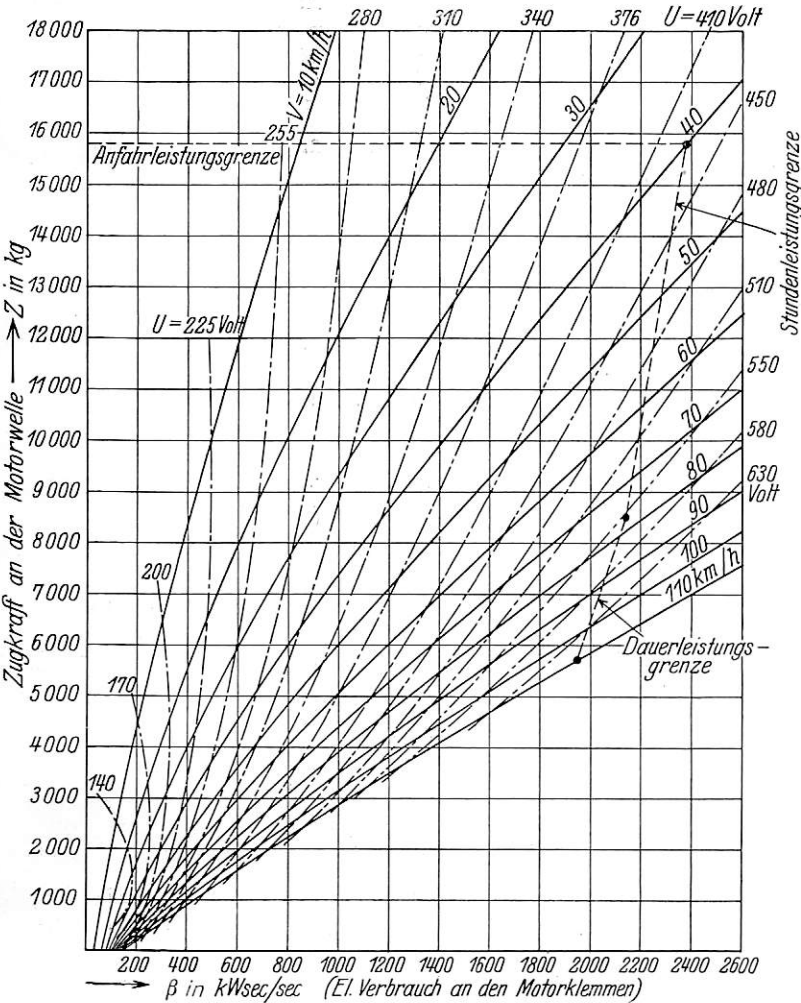


Abb. 4.

mechanische Wirkungsgrad η_m in Abhängigkeit von der effektiven Leistung an der Motorwelle für verschiedene Drehzahlen n in der Min., der indizierte oder der effektive Druck in Abhängigkeit von der Drehzahl für verschiedene Füllungs-einstellungen. Zu jeder Drehzahl n des Motors gehören so viele Fahrgeschwindigkeiten $V = 60 n \frac{D\pi}{1000}$ km/h des Triebwagens als Schaltstufen mit dem Übersetzungsverhältnis \ddot{u} vorhanden sind. Die Schaulinien B/N_e und η_m über N_e für verschiedene V werden für jede Schaltstufe umgezeichnet in Schaulinien B/N_e und η_m über V für verschiedene N_e . Für jede Schaltstufe und bestimmte Werte von V und N_e wird η_m und B/N_e g/PS_eh aus den Schaulinien abgelesen und daraus $Z_i = \frac{N_e \cdot 270}{V \cdot \eta_m}$ kg und $\beta = B/N_e \frac{N_e}{3600}$ g/sec bestimmt.

Mit den zusammengehörigen Werten von Z_i und β kann für jede Schaltstufe der zu ihrem Geschwindigkeitsbereich gehörende Teil der Leistungs- und Verbrauchstafel aufgezeichnet werden. Für jede Schaltstufe und einige Werte von V werden ferner die zu einer bestimmten Füllungseinstellung ε gehörigen Werte p_i oder $p_e = p_i \eta_m$ abgelesen und daraus $Z_i = \frac{\ddot{u} d^2 s}{c \cdot 2 D} p_i$ kg berechnet, wobei c die Zahl der für den Arbeitsvorgang erforderlichen Kolbenhöhe ist. Die Verbindung der Schnittpunkte der Horizontalen durch diese

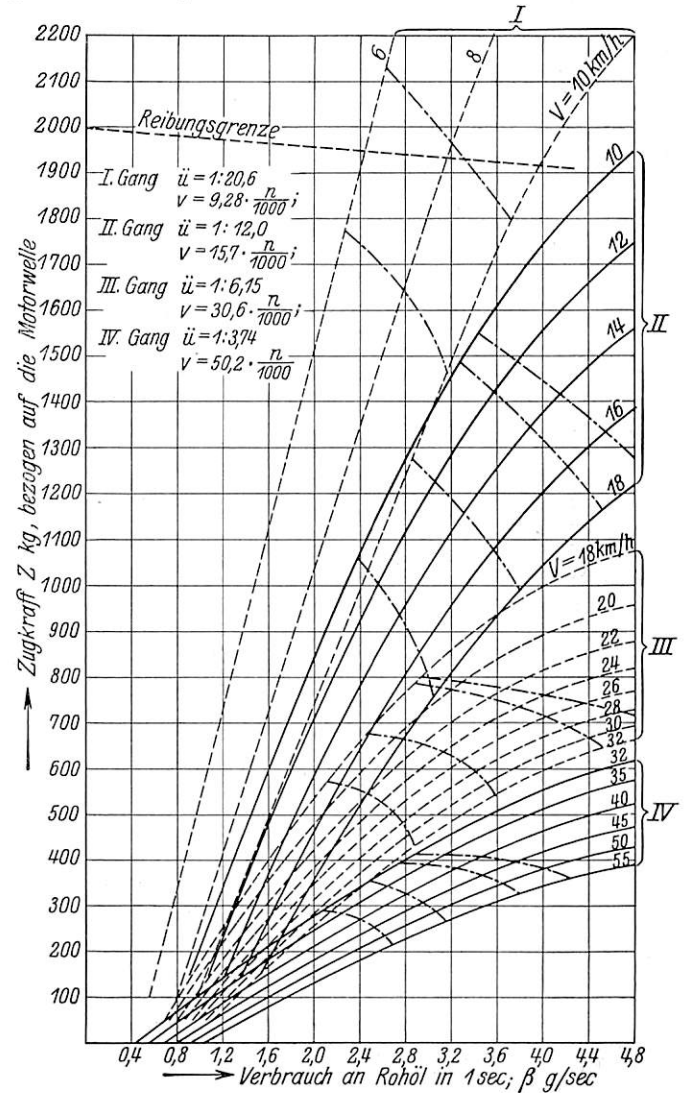


Abb. 5. Leistungs- und Verbrauchstafel für einen 68 PS-Dieseltreibwagen.

Werte von Z_i mit den zugehörigen Linien gleicher Fahrgeschwindigkeit ergibt die Linien gleicher Füllungseinstellung (--- Linien in Abb. 5). Die Zugkräfte werden noch durch die Linie der größten Reibungszugkraft abgegrenzt.

Leider sind für schnellaufende Fahrzeugdieselmotoren vollständige Prüfstandmeßwerte, die sich über einen größeren Drehzahlbereich erstrecken, in der Literatur kaum zu finden. Auch die Mitteilungen von Dr. Riehm*) über Prüfstandversuche mit einem MAN-Fahrzeugdiesel lassen die Angabe des mechanischen Wirkungsgrades vermissen. Aus diesem Grunde wurde bei der in Abb. 5 aufgezeichneten Leistungs- und Verbrauchstafel für einen mit diesem Dieselmotor in sechszyndriger Ausführung ausgerüsteten Leichttriebwagen an Stelle der indizierten Zugkraft die auf die Motorwelle be-

*) Schnellaufende Fahrzeugdieselmotore. Der Motorwagen 1928, Heft 6, S. 89.

zogene Zugkraft genommen. Bei der Bemessung des abziehenden Triebwagenwiderstandes ist dies zu berücksichtigen.

Schlußbemerkung.

Versuche können nicht entbehrt werden. Gleichwohl ist es zweckmäßig und wie in Abschnitt II für Dampflokomotiven nachgewiesen, mit hinreichender Genauigkeit möglich, die Leistungs- und Verbrauchsgrößen in ihren funktionellen Zusammenhängen rechnerisch vorher festzulegen. Liegt für ein Triebfahrzeug in der berechneten Leistungs- und Verbrauchstafel ein Gerippe des gesamten Leistungsgebietes vor, so ist es nicht mehr notwendig, die Schaulinien für Leistung und Verbrauch punktweise aus den Ergebnissen der einzelnen Versuchsfahrten aufzubauen, sondern man kann sich darauf beschränken, besonders ausgewählte Punkte der Tafel durch Versuchsfahrten nachzuprüfen. Abweichungen infolge der

Neue Versuche über den Fahrwiderstand von Personen- und D-Zugwagen.

In der Zeit vom 22. April bis 25. November 1929 fanden auf der Strecke Berlin—Magdeburg eingehende Versuche über die Widerstände von Personenzügen durch die Lokomotiv-Versuchsabteilung Grunewald der D.R.G. statt. Durch die Versuche sollte u. a. der Einfluß des Eigengewichts der Wagen, der neuzeitlichen eisernen Wagenbauart und der Zuglänge auf die Zugförderung ermittelt werden. Hierzu war die Feststellung des genauen Fahrwiderstandes erforderlich.

Die Untersuchung erstreckte sich auf Züge aus D-Zugwagen der neuen eisernen Bauart, aus D-Zugwagen der hölzernen Bauart, aus neuen Durchgangs-Personenwagen im belasteten und leeren Zustand, sowie aus älteren zwei- und dreiachsigen Personenwagen. Bei den D-Zugwagen der Stahlbauart wurde noch die Zuglänge gewechselt. Die Züge wurden soweit möglich aus Wagen gebildet, die aus dem Betrieb gezogen worden waren.

Die Messungen wurden durchweg im Beharrungszustand, d. h. bei gleichmäßiger Geschwindigkeit und Zugkraft, vorgenommen, nachdem sich der Wagenzug auf einer längeren Strecke eingelaufen hatte. Gemessen wurde für jeden einzelnen Meßabschnitt: Die Zugkraft am Zughaken hinter dem Meßwagen, ferner Weg, Geschwindigkeit und Arbeit. Zu diesen Messungen wurde der bayerische Lokomotivmeßwagen benützt, da dieser die Zugkraft in besonders großem Maßstab aufzeichnet. Weiterhin wurden relative Windgeschwindigkeit und Windrichtung mit einem Windmeßgerät ermittelt, das mit den Askaniawerken, Berlin, durchgebildet worden war. Es bestand aus einem Venturirohr für die Stärke und einer Windfahne für die Richtung des Windes und war an einem langvorgestreckten Fachwerkarm etwa 4 m vor der Stirnwand der Lokomotive angebracht. Das Meßergebnis wurde auf registrierende Instrumente im Meßwagen übertragen. Für die Gesamtstrecke wurde noch die indizierte Lokomotivleistung mit dem Böttcherschen Arbeitszähler und die der Achslagertemperatur festgestellt.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse gestaltete sich außerordentlich mühevoll. Die sehr zahlreichen Einzelpunkte bei den verschiedenen Geschwindigkeiten von 20 km/h bis 100 km/h ergaben ein verhältnismäßig verstreutes Bild, so daß es je nach den Windverhältnissen galt, nicht nur die Mittelkurven herauszufinden, sondern diese Kurven auch noch so zu gestalten, daß sie mit geringen Abweichungen einer einheitlich aufgebauten Formel gehorchten. Bei der Formelaufstellung ging man von den Einflüssen aus, für die genauere Anhaltspunkte vorlagen, nämlich von der Achslagerreibung, über welche Versuche der Lager-Versuchsabteilung Göttingen vorhanden waren, und vom Luftwiderstand. Die so ermittelten Formeln für den spez. Widerstand in kg/t in ruhender Luft (die streng genommen nur für den Oberbau der Versuchsstrecke gelten), lauten:

D-Zugwagen eiserner Bauart:

$$w = \mu \cdot \frac{r}{R} + 0,98 + 0,012 \cdot v + 0,0663 \cdot v_{rel}^2 \cdot \frac{F}{G}; \quad F = \frac{238}{130} \cdot \frac{n + 0,5}{n}$$

D-Zugwagen hölzerner Bauart:

$$w = \mu \cdot \frac{r}{R} + 0,9 + 0,014 \cdot v + 0,0663 \cdot v_{rel}^2 \cdot \frac{F}{G}; \quad F = \frac{221}{130} \cdot \frac{n + 0,5}{n} \cdot 1,06$$

nie ganz vermeidbaren Fehler in der Messung und durch Unregelmäßigkeiten und besondere Einflüsse während der Versuchsfahrt lassen sich leicht erkennen und verbessern.

Es gibt zwei Methoden der wissenschaftlichen Arbeit, die bei der vorliegenden Untersuchung überwiegend angewendete induktive und die deduktive, der Prof. Nordmann gefolgt ist, dessen letzte zusammenfassende Arbeit den Titel „Theorie der Dampflokomotive auf versuchsmäßiger Grundlage“ trägt. Beide Wege treffen sich hier in dem einen Ziel: Hilfsmittel zu schaffen für die genaue individuelle Berechnung an Stelle der bisherigen schematischen Durchschnittsberechnung. Sind einmal auf dem einen oder dem anderen Wege Gesetzmäßigkeiten ermittelt, so geben sie die Möglichkeit, künftig aus Versuchsergebnissen und statistischen Erhebungen ein höheres Maß von Erkenntnis zu gewinnen, als bisher. Dies trifft auch dann noch zu, wenn die gefundenen Gesetzmäßigkeiten nur in erster Annäherung gelten.

Durchgangs-Personenwagen:

$$w = \mu \cdot \frac{r}{R} + 0,94 + 0,018 \cdot v + 0,0663 \cdot v_{rel}^2 \cdot \frac{F}{G};$$

$$F = \frac{239}{130} \cdot \frac{n + 0,5}{n} \cdot 1,033$$

Zweiachsige Personenwagen:

$$w = \mu \cdot \frac{r}{R} + 0,66 + 0,02 \cdot v + 0,0663 \cdot v_{rel}^2 \cdot \frac{F}{G};$$

$$F = \frac{155}{130} \cdot \frac{n + 0,5}{n} \cdot 1,033$$

Dreiachsige Personenwagen:

$$w = \mu \cdot \frac{r}{R} + 0,36 + 0,012 \cdot v + 0,0663 \cdot v_{rel}^2 \cdot \frac{F}{G};$$

$$F = \frac{148}{130} \cdot \frac{n + 0,5}{n} \cdot 1,033 \cdot 1,06$$

In diesen Formeln bedeuten:

μ = Lagerreibungsbeiwert (aus Göttinger Versuchen)

r = Achsschenkelhalbmesser

R = Radhalbmesser

v und v_{rel} = Geschwindigkeit in m/sec

G = Gewicht des Wagens in to

n = Anzahl der Wagen

F = Äquivalenzfläche.

Den einzelnen Gliedern der Formeln kommt folgende Bedeutung zu:

1. $\mu \cdot \frac{r}{R}$ = Lagerreibung.

2. Konstante Reibung; sie ist abhängig von der Bauart des Fahrzeugs, seinem Unterhaltungszustand und dem verwendeten Baustoff.

3. Reibung, ansteigend mit der 1. Potenz der Geschwindigkeit; diese Werte dürften etwa den Laufeigenschaften des Wagens entsprechen.

4. Luftwiderstand. Der Luftwiderstand wird zunächst nach einer dem reinen Staudruck der Luft entsprechenden Formel, also proportional der Luftdichte und dem Quadrat der Geschwindigkeit angesetzt. Dem Ausdruck für die Äquivalenzfläche dagegen wurde eine Form gegeben, die auf die luftumströmte Wagenfläche Rücksicht nimmt. Der Mehraufwand für den Luftwiderstand des letzten Wagens wird durch das Glied $\frac{n + 0,5}{n}$ dargestellt.

Ferner wurde zur Vereinfachung des mathematischen Aufbaues die Formel für die eisernen D-Zugwagen als Grundformel angenommen und bei fehlenden Faltenbälgen 3,3%, sowie bei alter Bauform von Dach und Türen 6% hinzugeschlagen.

Der Einfluß des Seitenwindes wird als Zuschlag zum Luftwiderstand und zwar abhängig von der relativen Windgeschwindigkeit und vom Anblasewinkel berücksichtigt, indem die Werte für den Luftwiderstand ohne Seitenwind mit einem Berichtigungsglied ΔF multipliziert werden. Als Grundform für ΔF wurde wiederum die Widerstandszunahme bei Seitenwind für einen Zug von 12 D-Zugwagen eiserner Bauart angenommen. Sie stellt sich

in der Form $\Delta F = 1 + 1,1 \cdot \sin \alpha$ dar. Die sin-Funktion ergibt sich aus der gleichfalls mit $\sin \alpha$ wachsenden, dem Wind sich darbietenden Projektionsfläche des Zuges. Die Werte für ΔF sind je nach Zuglänge und Wagenart verschieden.

Ergänzend wurde versucht, die Formel für die neuen eisernen D-Zugwagen auf eine einfachere Form zu bringen, nämlich:

$$w = 1,85 + 0,0025 V_f + \frac{1}{55} \left(\frac{V_r}{10} \right)^2 + \frac{V_s - 4,5}{22}$$

wobei V_f = Fahrgeschwindigkeit des Zuges, V_r = relative Geschwindigkeit, also Fahrgeschw. \pm Windgeschw. und V_s = Windgeschwindigkeit des Seitenwindes bedeutet.

In bezug auf die Bauart der Wagen haben die Versuche ergeben, daß die neuen eisernen D-Zugwagen vor allem bei hohen

Geschwindigkeiten am vorteilhaftesten sind. Der spez. Widerstand bleibt mit 3,8 kg/t bei 100 km/h Geschwindigkeit weit unter allen übrigen zum Teil bis auf 5,3 kg/t heraufgehenden Werten.

Auch auf das s-V-Diagramm werden die neuen Versuche Einfluß haben. Die ermittelten Zugwiderstände sind wesentlich geringer als die nach der bisher gebräuchlichen Strahlschen Formel errechneten. Der in der Strahlschen Formel enthaltene Zugkraftüberschuß könnte zwar als bewußte Reserve für ungünstige Witterungsverhältnisse dienen, wenn man es nicht vorziehen will, die auf den einzelnen Strecken maßgebenden Witterungseinflüsse genau zu erfassen, wozu die neue Formel Unterlagen liefern würde.

Die Versuche sind eingehend von dem Versuchsleiter, Reichsbahnbaumeister Nocon, in Glasers Annalen vom 1. März 1931 beschrieben. Lett.

Reinigung von Lokomotiven durch Abspritzen.

Die Bestrebungen, die Reinigungsarbeit an Lokomotiven und Tendern wirtschaftlich und wirksamer zu gestalten, hat zur Konstruktion eines Reinigungsapparates seitens der Firma Weilinger, wärmetech. Industrie, München, geführt, bei dem ein Flüssigkeitsstrahl reinen Wassers oder mit Zusatz von schmutzlösenden Mitteln unter hohem Druck auf die zu reinigenden Flächen gespritzt wird. Der Druck ist hierbei auf 15 at gesteigert. Die Temperatur des Spritzwassers beträgt 90°.

Mit dieser Anlage ist es einem Mann möglich, an einem Tag fünf bis sechs Lokomotiven bei sparsamem Wasserverbrauch selbst bei größtem Schmutz vollständig zu reinigen.

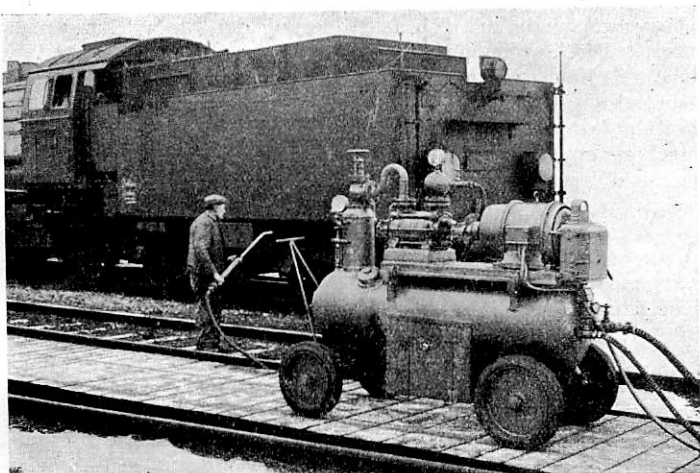


Abb. 1.

Die Anlage (Abb. 1) besteht in der Hauptsache aus einem autogen geschweißten Flüssigkeitskessel von 350 l Inhalt mit Dampfanwärmung durch einen mit der Lokomotive oder einer ortsfesten Anlage in Verbindung stehenden Schlauch. Der Kessel ist bis oben mit Wasser gefüllt, während der Dampf mit einem Druck von 4 bis 5 atü in das Wasser eingeblasen wird. Besteht die Möglichkeit zum Anschluß an eine Warmwasserleitung oder ist Gelegenheit vorhanden, enthärtetes Wasser zu verwenden, so ist dies vorzuziehen. Ein an dem Kessel angebrachter Wasserstandsanzeiger gibt über den Stand des Wassers im Kessel, ein Thermometer über die Spritztemperatur Aufschluß. Auf dem Behälter befindet sich eine Hochdruck-Kreiselpumpe, die mit einem Elektromotor gekuppelt ist und das unter einem Druck von 4 bis 5 atü stehende Wasser auf einen Druck von 15 atü bringt. Dies entspricht einer Förderhöhe von 150 bis 160 m bei einem Kraftbedarf von 8 bis 10 PS. Der Druck kann an einem in die Druckleitung eingebauten Manometer abgelesen werden. Das Fördervermögen der Hochdruckpumpe beträgt bei einer Umdrehungszahl von 2900 pro Minute 100 l/min. Als Strahlrohr können verschiedene einfach gebogene und S-förmig gekrümmte Mundstücke verwendet werden, wie sie zum Waschen

der Lokomotivkessel gebräuchlich sind. Das Mundstück liefert einen glatten Strahl. Durch ein in die Hochdruckleitung eingebautes Ventil kann der Strahl in weiten Grenzen geregelt werden. Auch als Beihilfe für Feuerlöschzwecke läßt sich die Pumpe, wo Wasseranschluß vorhanden ist, verwenden. Ein weiterer Anschluß ist niederdruckseitig, d. h. vor der Kreiselpumpe, und dient zur Verwendung des Gerätes für eine Flächenreinigung oder zum Füllen der Lokomotivkessel mit Warmwasser.

Der Wasserdruck im Kessel und der etwas höher einzustellende Dampfdruck können in den Grenzen des verfügbaren

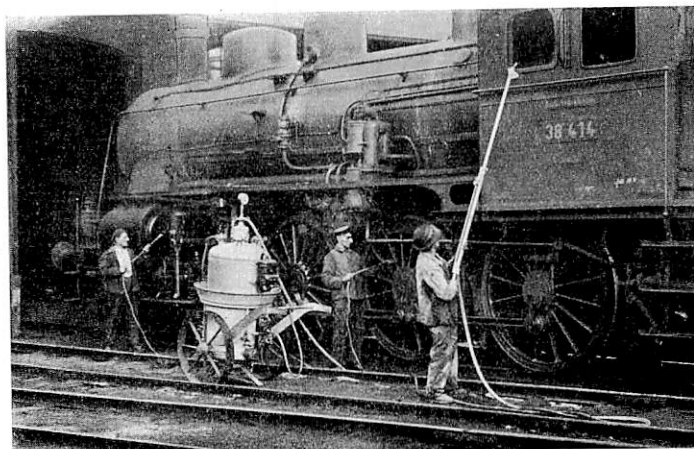


Abb. 2.

Wasserleitungsdruckes wirtschaftlich eingestellt werden. Zur Sicherheit ist am Armaturkopf ein Ventil angebracht, das bei Überschreitung des höchst zulässigen Flüssigkeitsdruckes am Kessel abbläst.

Die ganze Anlage ruht auf vier Rädern, so daß es möglich ist, die Lokomotive auf jedem beliebigen Gleis abzuspritzen. Waschmittel können durch Einsätze am Kessel dem Kesselinhalt zugeführt werden.

Einen einfacheren, unter Anschluß an das Preßluftnetz und mit dem gewöhnlichen Preßluftdruck arbeitenden Apparat, stellt die Abb. 2 dar; auf einem zweirädrigen Untergestell sind zwei bis vier Ölbehälter für verschiedene Öle und Mischungen oder flüssige Paste zu einer Einheit vereinigt. Es können somit mehrere Bedienstete gleichzeitig die verschiedenen Stellen eines Fahrzeuges — Lokomotive oder Wagen — bearbeiten. Endlich — einfachste Ausführung — sind tragbare Apparate in Verwendung; sie sind mit einem ausziehbaren Doppelstrahlrohr und mit schwenkbarem Doppeldüse ausgerüstet. — Für Personenwagenreinigung werden Apparate unter Vereinigung mit Staubsaugern benützt, zum Auswaschen von Lokomotivkesseln können die Apparate auch ortsfest aufgestellt werden. Sch—m.

Buchbesprechungen.

Hütte, des Ingenieurs Taschenbuch, 26. neubearbeitete Auflage 1931, 1. Band, Grundlagen der Technik, Berlin, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn.

In einem größeren zeitlichen Abstände als bei den früheren Auflagen ist die neue 26. Auflage der „Hütte“ erschienen, wohl mit Rücksicht auf das Jubiläumsjahr des Vereins Deutscher Ingenieure, dessen Begründer ja auch gleichzeitig die Begründer und ersten Mitarbeiter des Taschenbuches sind. Vor 75 Jahren, am 20. April 1856 wurde von der „Hütte“, die die Urzelle des jetzt so weit ausgedehnten Vereins darstellt, der Beschluß gefaßt, ein Ingenieur-Taschenbuch zu schaffen, das das gesamte technische Wissen umfassen sollte. Diesem Ziel ist die „Hütte“ in ihren vielen Auflagen, die sie erlebt hat, treu geblieben. Entsprechend der außerordentlichen Zunahme des technischen Wissens mußte auch der Umfang des Buches stetig wachsen. Auf vier Bände ist daher schon seit der 25. Auflage der Umfang angewachsen.

Das Anwachsen des Inhaltes setzt vor allem eine besondere Vorsorge für die übersichtliche Ordnung und Darstellung des Stoffes voraus, um dem Leser rasch das Gesuchte finden zu lassen, und so zeichnet sich die neue „Hütte“ durch einige neue Einrichtungen vor den früheren aus. So wird neben dem systematischen und dem Sachverzeichnis der einzelnen Bände noch ein Gesamt-sachverzeichnis herausgegeben werden. Jedem Hauptabschnitt ist ferner ein Sachverzeichnis vorangestellt, aus welchem die Formeln und Tafeln, die der Erfahrung gemäß besonders häufig gebraucht werden, rasch ersehen werden können. Eine praktische Neuerung ist die Daumeneinkerbung, die in einem Teil der Auflage probeweise angewendet ist.

Was die sachlichen Neuerungen des ersten Bandes, der die Grundlagen der Technik enthält, anlangt, so sei erwähnt, daß die Mechanik der bildsamen Körper durch die fortschreitende wirtschaftliche Erkenntnis eine klarere und kürzere Fassung der Gesetzmäßigkeit gestattetete. Der Abschnitt Hydraulik und Ärodynamik hat eine tiefgehende Umarbeitung, unter Einteilung in Mechanik unelastischer und Mechanik elastischer Flüssigkeiten erfahren. Sehr zweckmäßig ist die Aufnahme von Nomogrammtafeln für rasche Berechnung von Rohrleitungen. Das wichtige Gebiet der Schwingungen enthält neben der Klarstellung der Begriffe auf den einzelnen Schwingungsgebieten die Berechnung von Fundamentrahmenswingungen, Membranen und Platten. Die „Wärme“ gibt Forschungsergebnisse der letzten Jahre auf dem Gebiet der Verbrennung, Zündung und Explosion wieder. Auch der Abschnitt Festigkeitslehre enthält Neues, wie das Prandtl'sche Membranvergleichnis und die bei Untersuchungen über die Berührung von Körpern wichtigen Hertz'schen Gleichungen.

Eine weitreichende Neubearbeitung hat ferner infolge der lebhaften wissenschaftlichen Tätigkeit die Stoffkunde gefunden, wo die Normung der Baustoffe berücksichtigt wurde. Neue Tafeln wurden in großer Zahl beigegeben.

So ist die „Hütte“ auch in der neuen Auflage das geblieben, was sie bisher gewesen ist, der treue Freund und zuverlässige Berater eines jeden Ingenieurs. Dr. Uebelacker.

Wegele, Prof. Dr. Ing., Bahnhofsanlagen, II. Hoch- und Tiefbauten der Bahnhöfe. Sammlung Göschen Bd. 1036. Berlin 1931, Verlag Walter de Gruyter u. Co. Preis in Leinen geb. 1,80 *R.M.*

Der Inhalt umfaßt: Hochbauten für den Personenverkehr (Empfangsgebäude, Bahnsteigdächer und -Hallen), Hochbauten für den Güterverkehr, für Betrieb, Verwaltung und für Wohlfahrtszwecke. An Tiefbauanlagen (kürzer gefaßt): Entwässerung, Bahnsteigbrücken und -Tunnel, Wasserwerke, Lokomotivversorgungsanlagen. Ein erstaunlicher Stoffreichtum ist auf engstem Raum behandelt. Von neueren und neuesten Anlagen fehlt schlechthin nichts. Die Behandlung des Textes wie der 88 Abbildungen vereinigt treffende Kürze mit lichtvoller Durchdringung. Umfassende Literaturangaben erhöhen den Gebrauchswert. Ein vortreffliches Büchlein, das umfängliche architektonische Bücher recht wohl ersetzen kann, namentlich dem Bauingenieur.

Dr. Bl.

Druckwechsel und Stöße an Kolbenmaschinen mit Schubkurbelgetriebe. Von Dr. techn. Franz Kuba. Wien 1931. Julius Springer. Textband: 68 S. mit 18 Abb. Tafelband: 48 Taf. mit 78 Abb. Preis 18,— *R.M.*

Für diese theoretische Untersuchung der Druckwechselvorgänge sind die Verhältnisse einer liegenden, doppeltwirkenden Kolbendampfmaschine zugrunde gelegt. In analytischen Betrachtungen und zeichnerischen Darstellungen von vorbildlicher Übersichtlichkeit wird gezeigt, wie sich die Vorgänge gestalten, wobei von dem idealen, spielfreien Getriebe ausgegangen wird, um daran die Veränderungen zu sehen, welche durch das Zapfenspiel, jedoch ohne Berücksichtigung der Reibung und der dämpfenden Wirkung des Schmieröles entstehen. Dabei wird ein Verfahren entwickelt zur Bestimmung der Relativgeschwindigkeit bei den Druckwechselvorgängen und die Beeinflussung der Größe der Relativgeschwindigkeit behufs Milderung der Stoßwirkungen erläutert. Die Untersuchungen Kubas zeigen, daß es einen Weg zur Auffindung des „günstigsten Druckwechsels“ nicht gibt und sie bewahren dadurch davor, ein allgemein gehaltenes unrichtiges Gesetz aufzustellen, wie dies schon von verschiedenen namhaften Forschern geschah. Solche frühere Arbeiten werden von Kuba eingehend besprochen und ihre Widersprüche und Irrtümer aufgezeigt.

Wer sich mit den Eigenschaften des Schubkurbelgetriebes zu befassen hat, wird die gründliche Kubasche Veröffentlichung nicht mehr missen wollen. Da die Lokomotive eines der wichtigsten Anwendungsgebiete der Kolbendampfmaschine ist, wäre die Übertragung und Anwendung der Untersuchungen auf einen oder mehrere solcher Fälle wünschenswert. Grundsätzliche Schwierigkeiten dürften nach der vorliegenden, wegweisenden Arbeit nicht zu erwarten sein. Nach Dr. Kuba üben auf die Größe der Relativgeschwindigkeit Einfluß: Die Größe der Spiele, die Lage des Druckwechsels, die Größe der Dampfdruck-Arbeitszunahme vom Augenblick der Ablösung an, die Größe der Massen und die Drehzahl. Bei der Lokomotive erreichen die Spiele, die Massen und die Drehzahl verhältnismäßig hohe Werte, bei der üblichen Zwillingmaschine auch die Dampfdruck-Arbeitszunahme, also vier von den angegebenen fünf Einflußgrößen. Dabei wäre die Untersuchung unbedingt auch auf den Leerlauf ohne Dampf z. B. im Gefälle auszudehnen.

Die Ausstattung des Werkes durch den Springerschen Verlag ist die gewohnt vorzügliche. Die Gesellschaft der Freunde der Technischen Hochschule in Wien hat die Herausgabe des Werkes dankenswerter Weise unterstützt.

Dr. Ing. L. Schneider, München.

Berichtigung.

Im 1. Teil des Aufsatzes „Die Kosten einer Zugfahrt in Abhängigkeit von der Fahrweise und der Anstrengung des Triebfahrzeuges“ im Heft 21 sind folgende Berichtigungen vorzunehmen:

Seite 431: In Gleichung 1 ist w_m statt w_w zu setzen.

Seite 435: Die letzten 3 Zeilen mit dem Wortlaut: „Brems-tafel. Für die und Brems-“ sind zu streichen und am Schluß der Seite 436 einzusetzen.

Seite 436: Im linken unteren Quadranten der Abb. 7 muß es „Reibungsarbeit ΔAp “ statt „Luftpumparbeit Ap “ heißen.

Seite 443: In Abb. 14 unten muß es heißen: $(1 - \eta_{is}) \cdot d_{is}$ statt $\frac{r}{r_s} = 1$.

Seite 444: In der Gleichung für K_{brw} muß es J_{br} statt G_{br} heißen.