

# Lokomotivberechnungen.

## A. Bewegungswiderstände.

Der bei der Zuggbewegung von der Lokomotive zu überwindende Widerstand setzt sich bei gleichförmiger Fahrgeſchwindigkeit zuſammen aus dem Lauf-, Steigungs- und Krümmungswiderſtand; man bezieht ihn in  $\text{kg}/\text{t}$  auf das Zuggewicht. Will man den Zug auf eine beſtimmte Fahrgeſchwindigkeit bringen, ſo muß die Lokomotive außerdem noch eine Arbeitsleiſtung verrichten, die gleich iſt der erlangten lebendigen Kraft des Zuges.

### 1. Allgemeines.

Von den Bewegungswiderſtänden aus wird auf die erforderliche Zugkraft geſchloſſen.

In Abb. 14 greift die Zugkraft  $Z_e$  von außen an (geſtrichelte Linie für  $Z_e$  am Puffer), alſo Lokomotive wird als Wagen gerechnet, d. h. ohne die maſchinellen, inneren Widerſtände. Dieſelbe Zugkraft  $Z_e$  wird auch durch die Maſchine an den Triebrädern auf den Schienen erweckt (ausgezogene Linie für  $Z_e$  auf der Schiene).  $Z_e$  wird hervorgerufen durch die Dampfkraft in den Arbeitszylindern. Auf dem Wege vom Zylinder zum Triebad treten Verluſte auf. Wären dieſe Verluſte gleich 0, ſo entſtände eine indizierte Zugkraft  $Z_i$ . Tatsächlich treten aber Verluſte auf, ſo daß  $Z_e < Z_i$ . Vorläufig ſei  $Z_e = \eta \cdot Z_i$ , worin  $\eta \cong 0,9$  der Wirkungsgrad des Triebwerks.

Wenn  $W_{gz}$  = Geſamt-Bewegungswiderſtand eines ganzen Zuges einschließlich Lokomotive und Tender („Zugwiderſtand“ genannt), ſo iſt im Beharrungszuſtand — d. h. wenn keine Beſchleunigung oder Verzögerung ſtattfindet —  $Z_e^{\text{kg}} = W_{gz}^{\text{kg}}$ . Zugwiderſtand  $W_{gz}^{\text{kg}}$  ſoll formelmäßig feſtgelegt werden. Hat man  $W_{gz}$  gefunden, ſo kennt man auch  $Z_e$ .

## 2. Verschiedene Arten von Widerständen.

$$W_{kg} = w_{kg/t} \cdot G^t$$

$W_{gz}^{kg}$  bzw.  $w_{gz}^{kg/t}$  setzt sich zusammen aus:

I. Laufwiderstand, in der graden und wagerechten Strecke —  $W_Q$  bzw.  $w_l$

II. Krümmungswiderstand —  $W_k$  bzw.  $w_k$

III. Steigungswiderstand —  $W_s$  bzw.  $w_s$ ;

folglich kann sein:  $w_{gz} = w_l + w_k + w_s$ .

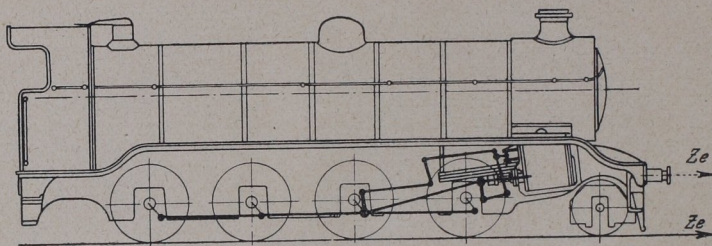


Abb. 14. Angriff der Zugkraft  $Z_e$ .

I. Laufwiderstand besteht aus:

a) Reibungswiderstand;

gleitende Reibung (Reibung der Achsschenkel in den Lagern und Maschinenreibung),  
rollende Reibung (Reibung der Räder auf den Schienen).

b) Stoßwiderstand;

infolge Unebenheiten des Gleises und wegen der Gleislücken.

c) Luftwiderstand;

alle Formeln setzen in ihrer Grundform ruhende Luft in der Atmosphäre voraus, also kein Gegenwind und kein starker Seitenwind.

Häufig wird der Gesamt-Bewegungswiderstand getrennt in den der Lokomotive (einschließlich Tender) und den der Wagen:

$$W_{gz}^{kg} = W_L^{kg^1} + W_w^{kg}$$

<sup>1)</sup> Lokomotive zunächst immer als Wagen angesehen, also ohne Maschinerie.

II. Krümmungswiderstand; ist der Widerstand in Bahnkrümmungen  $R^m$

a) R ö c k l s c h e Formel;  $R$  = Halbmesser der Bahnkrümmung in m.

$$w_k^{\text{kg/t}} = \frac{650}{R^m - 55} \text{ bei } R \geq 300 \text{ m für Hauptbahnen}$$

$$" = \frac{500}{R - 30} \text{ " } R < 300 \text{ m " regelsp. Nebenbahnen}$$

$$" = \frac{400}{R - 20} \text{ für Nebenbahnen (1000 mm Spur)}$$

$$" = \frac{300}{R - 10} \text{ " " (750 mm " )}$$

$$" = \frac{200}{R - 5} \text{ " " (600 mm " )}$$

Abb. 15 zeigt die Krümmungswiderstände  $w_k$ , die sich in Abhängigkeit von  $R$  aus diesen fünf Formeln ergeben (Schaulinie a bis e). Die Formeln können nur annähernd richtig sein; denn es kommt auf Achsstand und Art der Achsen an, d. h. ob feste oder Lenkachsen (z. B. Drehgestelle) vorhanden sind.

b) F r a n k s c h e Formel berücksichtigt den Achsstand in m.

$$w_k^{\text{kg/t}} = \frac{d^m}{R^m} \cdot \left( 180 - \frac{1000 \cdot d^m}{R^m} \right) \text{ für Personenzüge,}$$

$$" = \frac{d}{R} \cdot \left( 180 - \frac{2000 \cdot d}{R} \right) \text{ " Güterzüge.}$$

Bei vierachsigen Drehgestellwagen ist  $d$  der Achsstand des Drehgestelles (nicht derjenige vom Zapfen des einen Drehgestelles bis zu dem des zweiten). Zwischen festen Achsen und Lenkachsen wird kein Unterschied gemacht. Für Lokomotiven benutzt Frank die Formel von Röckl.

III. Steigungswiderstand (Abb. 16/17).

Der Bewegung eines Fahrzeuges setzt sich beim Befahren einer schiefen Ebene (Steigung) eine Kraft entgegen von der Größe  $G^t \cdot \sin a$ ; der Schienendruck ist  $G^t \cdot \cos a$  (Abb. 16). Dieser Widerstand bei einer Steigung, in kg bezeichnet, heißt:  $W_s^{\text{kg}} = 1000 \cdot G^t \cdot \sin a$ . Da Steigungswinkel  $a$  sehr klein, so kann mit genügender Genauigkeit  $\sin a = \text{tg } a$  gesetzt werden, und man erhält dann  $W_s^{\text{kg}} = 1000 \cdot G^t \cdot \text{tg } a$ . Es ist nun  $\text{tg } a = \frac{1}{n}$ , oder, wenn die Steigung in mm eingeführt und diese Größe mit  $s$  bezeichnet wird,  $\text{tg } a = \frac{1}{n} = \frac{s^{\text{mm}}}{1000}$ ;  $n$  ist also die Länge,

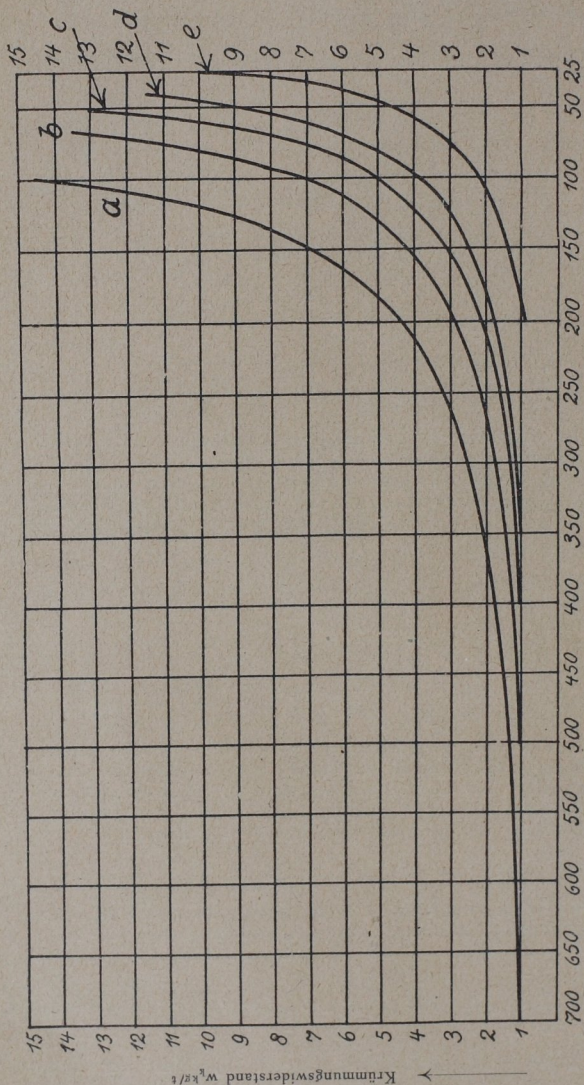


Abb. 15. Krümmungswiderstand  $w_k$  für verschiedene Krümmungshalbmesser  $R^m$  (nach Röckl)

auf die der Höhenunterschied gerade 1 beträgt. Somit erhält man  $W_s^{kg} = \frac{1000 \cdot G^t \cdot s^{mm}}{1000} = G^t \cdot s^{mm}$ . Es ist also der Steigungswiderstand pro Tonne Zuggewicht  $w_s^{kg/t} = s$ , d. h. pro Tonne Zuggewicht erhält man soviel kg Widerstand als die Steigung (in mm gemessen) pro Meter beträgt (Abb. 17).  $s$  wird bei Steigung positiv als Fahrwiderstand, bei Gefälle negativ als Triebkraft eingesetzt.

Außerdem gibt es noch folgende zusätzliche Widerstandsarten, die nicht im Beharrungszustand auftreten:

a) Beschleunigungs- oder Anfahrwiderstand  $W_a^{kg}$  bzw.  $w_a^{kg/t}$ .

Der Widerstand tritt in der Regel auf beim Anfahren; sein Gegensatz ist der

b) Verzögerungswiderstand  $W_z^{kg}$  bzw.  $w_z^{kg/t}$  beim Bremsen.

a) und b) werden gemeinsam mit  $w_p$  bezeichnet. Für beide gilt:

$$W_p^{kg} = \pm \left( \frac{G^t}{g} \cdot 1000 \right) \cdot p^{m/sek^2}$$

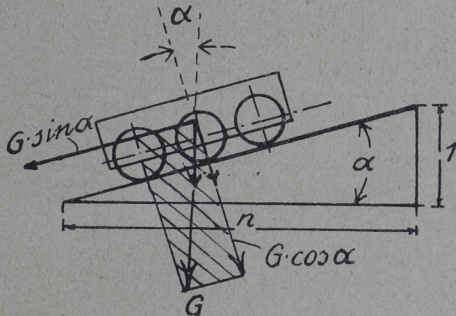


Abb. 16. Steigungswiderstand.

worin  $G$  = Fahrzeuggewicht in t,

$g$  = Erdbeschleunigung in  $m/sek^2$ ,

$p$  = größte Anfahr- bzw. Verzögerungs - Beschleunigung in  $m/sek^2$  ( $p_a$  bzw.  $p_z$ )

$$\text{oder } w_p^{kg/t} = \pm \frac{1000}{g} \cdot p$$

z. B. Stadtbahnzug hat Gesamtgewicht (Tenderlokomotive + Wagen) von

$$\left. \begin{array}{l} G_{gz} = 350 \text{ t} \\ g = 10 \text{ m/sek}^2 \\ 1) p_a = 0,2 \text{ m/sek}^2 \end{array} \right\} W_p = \frac{350 \cdot 1000}{10} \cdot 0,2 = 7000 \text{ kg}$$

Beim Anfahren ist die „Beschleunigungsarbeit  $A$ “ bis zur Erreichung der Geschwindigkeit  $V$  für 1 t Zuggewicht:

$$A^{kg \cdot m/t} = \frac{1000}{2 \cdot g} \cdot \left( \frac{1000 \cdot V}{60 \cdot 60} \right)^2 \cong 4 \cdot V^2$$

1) Vgl. S. 55.

Will man den Zug auf eine Weglänge von  $l^m$  auf die Geschwindigkeit  $V$  bringen, so braucht man hierfür eine zusätzliche Zugkraft von  $Z_p^{kg} = 1000 \text{ Gt} \cdot \left(\frac{4V^2}{l^m}\right)$ . Für die Weglängen  $l = 500$  (I), 1000 (II), 1500 (III) und 2000 m (IV) sind die hiernach errechneten Werte für  $w_p$  in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit  $V$  aus den in Abb. 18 eingetragenen Schaulinien I bis IV abzulesen.

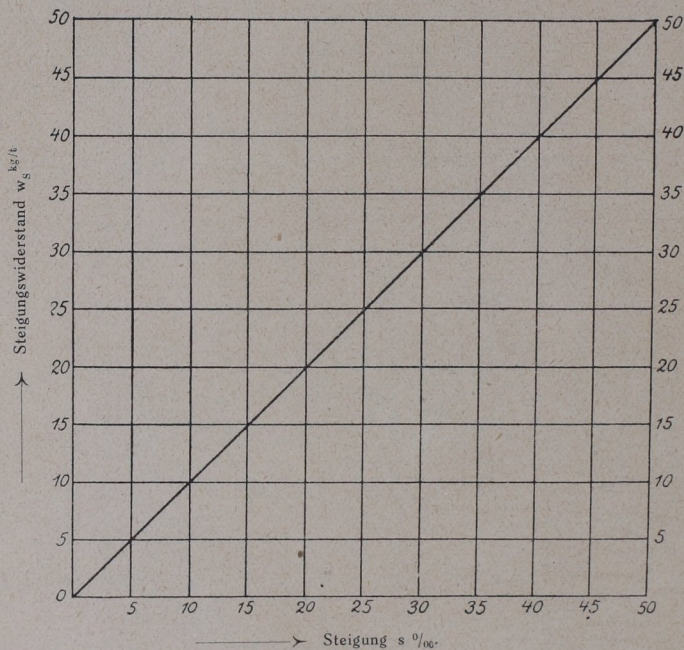


Abb. 17. Steigungswiderstand  $w_s^{kg/t}$  für verschiedene Steigungen.

### 3. Widerstandsformeln in der geraden wagerechten Strecke.

I. Clark, älteste Widerstandsformel:

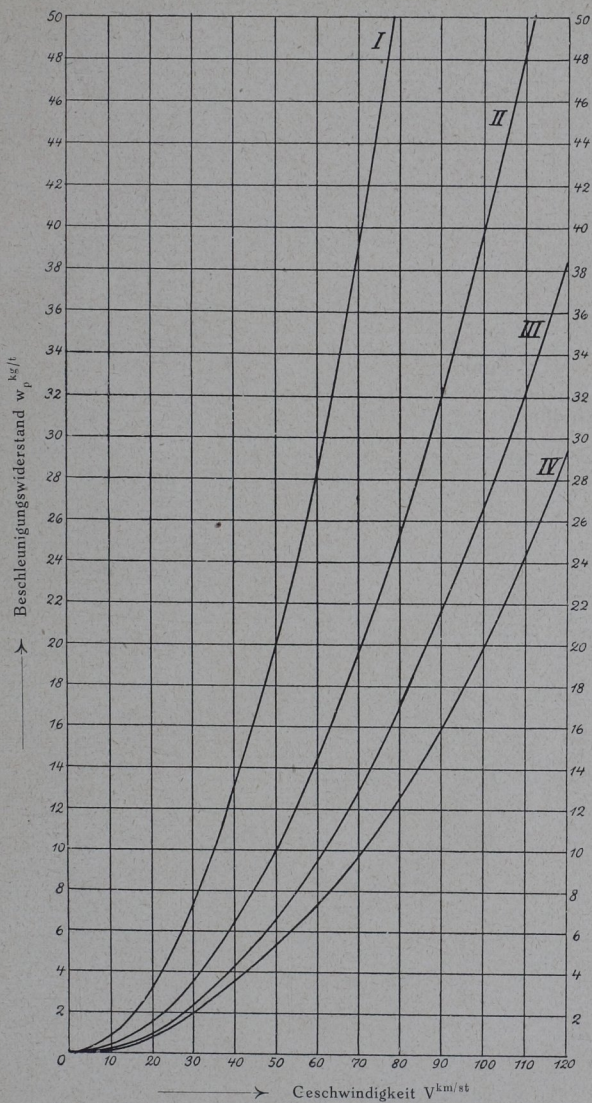
$$W^{kg} = (G_L + G_w)t \cdot \left(2,4 + \frac{V^2}{1000}\right). \text{ Hierin ist}$$

$G_L$  = Gewicht von Lokomotive nebst Tender in t

$G_w$  = " der Wagen in t

$V$  = Fahrgeschwindigkeit in km/st

$$\text{oder } w^{kg/t} = 2,4 + \frac{V^2}{1000}$$



Schaulinie I . . .  $l = 500$  m      Schaulinie III . . .  $l = 1500$  m  
 " II . . .  $l = 1000$  m      " IV . . .  $l = 2000$  m

Abb. 18. Beschleunigungswiderstand  $w_p$   $\frac{\text{kg}}{\text{t}}$  für verschiedene  $V$  nach 500, 1000, 1500 und 2000 m Anfahrweg  $l$ .

Die Clark'sche Formel gab ziemlich richtige Werte, solange die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge noch klein waren. Als sie größer wurden, erkannte man, daß das zweite Glied mit  $V^2$  zu große Werte ergab. Daher stellte aus Versuchen heraus die E. D. Erfurt die sogenannte „Erfurter Formel“ auf.

II. Erfurter Formel:

$$w_{\text{kg/t}} = 2,4 + \frac{V^2}{1300}$$

In Formel I und II ist der Reibungswiderstand bei Lokomotiven und Wagen derselbe, was tatsächlich nicht zutrifft. Später erkannte man richtiger, daß der Zugwiderstand auf  $1 : \infty$  in einer Geraden nicht eine Funktion des Gewichtes allein sein kann, sondern eine Funktion des Gewichtes und der dem Wind entgegenstehenden Flächen (Windäquivalentflächen), daß also der Luftwiderstand von der Zusammensetzung des Zuges abhängt. Am vordersten Fahrzeug ist er am stärksten, geringer bei den über das vorhergehende Fahrzeug hervorragenden Querschnittsflächen der Wagen, und am kleinsten an den nicht vorstehenden Endflächen jedes Wagens. Man kann den Luftwiderstand herabmindern durch schneidensförmige Ausbildung der Flächen am vorderen und hinteren Zugende; ferner durch Verkleinerung der Abstände zwischen den einzelnen Fahrzeugen. Bei langen Wagen ist der Einfluß des Windes am kleinsten, und er läßt sich bedeutend verkleinern durch Verbindung der Wagen mittels Faltenbälgen.

III. Frank.

Er hat zur Berücksichtigung der vorerwähnten Einflüsse und der verschiedenen Zugzusammensetzungen an Stelle der wirklichen Lokomotivquerflächen und Wagenquerflächen, zwecks Feststellung des Luftwiderstandes, Rechnungsflächen eingeführt und nach angestellten Ablaufversuchen mit einzelnen Lokomotiven und ganzen Zügen die folgenden Formeln aufgestellt:

$$\text{für Lokomotiven } w_1^{\text{kg/t}} = 2,5 + 0,0142 \cdot \left(\frac{V}{10}\right)^2 + 0,54 \cdot 1,1 \cdot \frac{FL}{GL} \cdot \left(\frac{V}{10}\right)^2$$

$$\text{für Wagen } \dots w_w^{\text{kg/t}} = 2,5 + 0,0142 \cdot \left(\frac{V}{10}\right)^2 + 0,54 \cdot \frac{2 + n \cdot f_w}{n \cdot q} \cdot \left(\frac{V}{10}\right)^2$$

Hierin bedeuten:

- FL die Größe der Lokomotiv-Querprojektion in Quadratmeter, FL = 10 qm bei großen, regelspurigen Lokomotiven;
- 1,1 einen Beiwert, um die verschiedenen, hintereinanderliegenden Flächen zu berücksichtigen, die zur Vergrößerung des Windwiderstandes beitragen;
- 1,1 FL die Rechnungsfläche (Windäquivalentfläche) zur Berechnung des Luftwiderstandes der Lokomotive in qm;
- $f_w$  die mittlere Windäquivalentfläche eines Wagens; sie ist 0,56 für jeden Personen- und bedeckten Güterwagen, 1,62 für jeden offenen leeren Güterwagen, 0,32 für jeden offenen beladenen Güterwagen.



0,76 ein Mittelwert für jeden Güterwagenzug, bestehend  
 aus  $n/2$  gedeckten Wagen,  
 „  $n/4$  offenen leeren Wagen,  
 „  $n/4$  offenen beladenen Wagen;

$n$  die Wagenzahl;

2 die Querfläche des ersten der Lokomotive folgenden Wagens in  $q_m$ ;

$q$  das mittlere Gewicht eines Wagens in  $t$ .

Für den ganzen Zug wird

$$W_{gz} = W_L + W_w \text{ oder } W_{gz}^{kg} = (G_L + G_w) t \cdot \left[ 2,5 + 0,0142 \cdot \left(\frac{V}{10}\right)^2 \right] \\ + 0,54 \cdot 1,1 \cdot F_L^{qm} \cdot \left(\frac{V}{10}\right)^2 + 0,54 \cdot (2 + n \cdot f_w) q_m \cdot \left(\frac{V}{10}\right)^2$$

Die Formel gilt für alle Züge, ausgenommen für D-Züge (Wagen mit Faltenbälgen) und für Züge mit Kurzkuppelungen, weil Frank mit solchen Zügen keine Versuche gemacht hat. Beispiele für einen Abteilwagenzug, bestehend aus 10 Abteilwagen und für einen „mittleren“ Güterwagenzug sind in den Zusammenstellungen 4 und 5 durchgerechnet.

Im Aufbau muß man die Frank'sche Formel als richtig ansehen; höchstens könnten Änderungen in folgender Weise notwendig werden. Da bei Frank der Reibungswiderstand für Lokomotiven und Wagen jedesmal der gleiche, nämlich  $2,5 \text{ kg/t}$ , er aber bei Lokomotiven höher sein muß als bei Wagen, empfiehlt es sich, den nach Frank errechneten Lokomotivwiderstand nachträglich nach einem der beiden folgenden Grundsätze zu vergrößern:

- a) Man denke sich,  $W_L$  gelte für zweigekuppelte Lokomotiven; für dreigekuppelte Lokomotiven mache man einen Zuschlag von  $0,5 \text{ kg/t}$  Lokomotivgewicht, entsprechend für mehr Kuppelachsen. Wenn also für Zweikuppler der Reibungswiderstand  $2,5 \text{ kg/t}$  war, so ist er

für Dreikuppler . . . . .	3,0 kg/t,
„ Vierkuppler . . . . .	3,5 „
„ Fünfkuppler . . . . .	4,0 „

- b)  $Z_i = \frac{Z_e}{\eta}$ . Man kann  $Z_e$  belassen, wie es sich aus der Widerstandsformel ergeben hatte und erhält daraus  $Z_i$ , indem zu setzen ist

$\eta = 0,93$	bei 1 Kuppelachse,
$\eta = 0,90$	„ 2 Kuppelachsen,
$\eta = 0,87$	„ 3 „
$\eta = 0,85$	„ 4 „
$\eta = 0,82$	„ 5 „

#### IV. Schnellbahn-Studiengesellschaft.

Berücksichtigt — im Gegensatz zu Frank — verschieden große Reibungswiderstände bei Lokomotiven und Wagen. Die „Studiengesellschaft für elektrische Schnellbahnen“ stellte in den Jahren 1902 bis

Zusammenstellung 4.

## Widerstandsberechnung nach „Frank“ für „Abteil-Wagenzug“.

$$W_L + W_w = GL \cdot \left[ 2,5 + 0,0142 \cdot \left( \frac{V_1}{10} \right)^2 \right] + 0,54 \cdot 1,1 \cdot FL \cdot \left( \frac{V}{10} \right)^2$$

$$+ G_w \cdot \left[ 2,5 + 0,0142 \cdot \left( \frac{V}{10} \right)^2 \right] + 0,54 \cdot (2 + n \cdot f_w) \cdot \left( \frac{V}{10} \right)^2$$

$$= 520 \left[ 2,5 + 0,0142 \cdot \left( \frac{V}{10} \right)^2 \right] + 0,54 \cdot 18,6 \cdot \left( \frac{V}{10} \right)^2$$

Zugzusammensetzung:

10 Abteilwagen zu je  $q = 40$  t Gewicht<sup>1)</sup>Wagengewicht  $G_w = 40 \times 10 = 400$  tLok.- und Tendergewicht  $GL = 120$  tGesamt-Zuggewicht  $G_{gz} = 520$  t $f_w = 0,56$  qm;  $FL = 10$  qm.

$$W_{gz} = 1300 + 17,428 \cdot \left( \frac{V}{10} \right)^2 = 1300 + 5,73$$

Steigungen	Widerstände $W$ in kg bei $V$ in km/st bzw. $v$ in m/sek											
	$V=10$ $v=2,77$	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
1:∞	1 320	1 370	1 460	1 580	1 735	1 930	2 155	2 420	2 720	3 045	3 420	3 830
1: 500	2 360	2 410	2 500	2 620	2 775	2 970	3 195	3 460	3 760	4 085	4 460	4 870
1: 400	2 620	2 670	2 760	2 880	3 035	3 230	3 455	3 720	4 020	4 345	4 720	5 130
1: 300	3 055	3 105	3 195	3 315	3 470	3 665	3 890	4 155	4 455	4 780	5 155	5 565
1: 250	3 400	3 450	3 540	3 660	3 855	4 010	4 235	4 500	4 800	5 125	5 500	5 910
1: 200	3 920	3 970	4 060	4 180	4 335	4 530	4 755	5 020	5 320	5 645	6 020	6 430
1: 150	4 785	4 835	4 925	5 045	5 200	5 395	5 620	5 885	6 185	6 510	6 885	7 295
1: 125	5 480	5 530	5 620	5 740	5 835	6 030	6 315	6 580	6 880	7 205	7 580	7 990
1: 100	6 520	6 570	6 660	6 780	6 935	7 130	7 355	7 620	7 920	8 245	8 620	9 030
1: 60	10 020	10 070	10 160	10 280	10 435	10 630	10 855	11 120	11 420	11 745	12 120	12 530
1: 40	14 320	14 370	14 460	14 580	14 735	14 930	15 155	15 420	15 720	16 045	16 420	16 830

1) Das eigentliche Gewicht ist etwas niedriger, aber auf 40 t abgerundet der leichteren Rechnung wegen.

Zusammenstellung 5.

Widerstandsberechnung nach „Frank“ für „Güterzug“.

Zugzusammensetzung:

30 Wagen gedeckt  
 15 „ offen leer  
15 „ offen beladen

60 = Wagenanzahl

$f_w = 0,76$  qm;  $FL = 10$  qm

Mittleres Gewicht eines Wagens  $q = 20$  t

Wagengewicht  $G_w = 60 \times 20 = 1200$  t  
 Lok.- und Tendergewicht  $GL = 120$  t  
 Gesamt-Zuggewicht  $G_{gz} = 1320$  t

$$\begin{aligned}
 W_L + W_w &= GL \cdot \left[ 2,5 + 0,0142 \cdot \left(\frac{V}{10}\right)^2 \right] + 0,54 \cdot 1,1 \cdot FL \cdot \left(\frac{V}{10}\right)^2 \\
 &+ G_w \cdot \left[ 2,5 + 0,0142 \cdot \left(\frac{V}{10}\right)^2 \right] + 0,54 \cdot (2 + n \cdot f_w) \cdot \left(\frac{V}{10}\right)^2 \\
 &= 1320 \cdot \left[ 2,5 + 0,0142 \cdot \left(\frac{V}{10}\right)^2 \right] + 0,54 \cdot (11 + 2 + 60 \cdot 0,76) \cdot \left(\frac{V}{10}\right)^2 \\
 W_{gz} &= 3300 + 50,388 \cdot \left(\frac{V}{10}\right)^2 = 3300 + \frac{V^2}{1,98}
 \end{aligned}$$

Steigungen		Widerstände W in kg bei V in km/st bzw. v in m/sek					
		V = 10 v = 2,77	20 5,55	30 8,33	40 11,11	50 13,85	60 16,66
1 : ∞		3 351	3 502	3 754	4 108	4 562	5 118
1 : 500	2 ‰	5 991	6 142	6 394	6 748	7 202	7 758
1 : 400	2,5 ‰	6 651	6 802	7 054	7 408	7 862	8 418
1 : 300	3,33 ‰	7 747	7 898	8 150	8 504	8 958	9 514
1 : 250	4 ‰	8 631	8 782	9 034	9 388	9 842	10 398
1 : 200	5 ‰	9 951	10 102	10 354	10 708	11 162	11 718
1 : 150	6,66 ‰	12 142	12 293	12 545	12 899	13 353	13 909
1 : 125	8 ‰	13 911	14 062	14 314	14 668	15 122	15 678
1 : 100	10 ‰	16 551	16 702	16 954	17 308	17 762	18 318
1 : 60	16,66 ‰	25 342	29 902	30 154	30 508	30 962	31 518
1 : 40	25 ‰	36 351	36 502	36 754	37 108	37 562	38 118

1906 Schnellbahnversuche auf der Strecke Berlin-Zossen an, woraus die folgende Widerstandsformel entstand. Sie ist besonders geeignet für D-Züge, weil Versuche mit solchen zugrunde liegen.

$$W_{gz}^{kg} = W_L^{kg} + W_w^{kg} = G_L^t \cdot (4 + 0,027 \cdot V) + 0,0052 V^2 \cdot F_L^{qm} + G_w^t \cdot (1,3 + 0,0067 \cdot V) + 0,0052 V^2 \cdot \Sigma f_w^{qm}$$

Hierin bedeuten:  $F_L \cong 10$  qm bei großen, regelspurigen Lokomotiven  
 die Größe der Lokomotiv-Querprojektion,  
 „  $\cong 7,5$  qm bei zugeschärfter Rauchkammertür,  
 $f_w = 1$  qm für jeden D-Wagen,  
 „  $= 2$  qm für jeden Abteilwagen.

In den Zusammenstellungen 6 und 7 sind Beispiele für einen Abteilwagen- und einen D-Zug durchgerechnet.

Für „Schnellbahn-Motorwagen“ gilt die Formel:

$$W^{kg} = G^t \cdot (1,8 + 0,0067 \cdot V) + 0,0052 \cdot V^2 \cdot F^{qm}, \text{ worin } F = 7,5 \text{ qm.}$$

#### V. Vereinfachte Widerstandsformeln.

Widerstand nur als Funktion des Gewichtes, nicht auch als Funktion der dem Wind entgegenstehenden Flächen.

$$\begin{aligned} w_{gz}^{kg/t} &\cong 2,5 + \frac{V^2}{4000} \quad \left. \begin{array}{l} \text{D-Wagen,} \\ \text{vollbeladene offene Güterwagen,} \end{array} \right\} \\ \text{„} &\cong 2,5 + \frac{V^2}{3500} \quad \text{vierachsige Abteilwagen,} \\ \text{„} &\cong 2,5 + \frac{V^2}{2500} \quad \left. \begin{array}{l} \text{zwei- oder dreiachsige Abteilwagen,} \\ \text{bedeckte Güterwagen,} \end{array} \right\} \\ \text{„} &\cong 2,5 + \frac{V^2}{2000} \quad \begin{array}{l} \text{Güterzug, bestehend aus:} \\ \quad \frac{1}{2} \text{ gedeckte Wagen, wenigstens halb beladen,} \\ \quad \frac{1}{4} \text{ offene leere Wagen,} \\ \quad \frac{1}{4} \text{ offene beladene Wagen,} \end{array} \\ \text{„} &\cong 2,5 + \frac{V^2}{1000} \quad \text{offene leere Wagen,} \\ w_l^{kg/t} &\cong 2,5 + \frac{V^2}{1500} \quad \text{Lokomotive (nebst Tender) ohne Widerstand} \\ &\quad \text{des Triebwerkes, also wenn dieselbe „kalt ge-} \\ &\quad \text{zogen“ mit ausgehängtem Triebwerk.} \end{aligned}$$

Als Hilfstabelle zum Ausrechnen der Widerstände nach den „vereinfachten Widerstandsformeln“ dient die Zusammenstellung 8. Die Widerstände sind dort für ein Gesamtzuggewicht von 1000 t errechnet. Für leichtere bzw. schwerere Zuggewichte lassen sich die Fahrwiderstände hieraus leicht ermitteln.

#### VI. Sanzin<sup>1)</sup>.

Gibt den Lokomotiv- und Tenderwiderstand nur für Lokomotiven unter Dampf. Sanzin trennt das Gewicht  $L_1$  auf den Lokomotiv- und Tenderlaufachsen von dem Gewicht  $L_2$  auf den Lokomotivkuppelachsen.

$$W_i^{kg} = 0,006 \cdot F \cdot V^2 + L_1^t \cdot (1,8 + 0,015 \cdot V) + L_2^t \cdot \left( a + \frac{0,1075}{D_m} \cdot V \right)$$

<sup>1)</sup> Z. V. D. I. 1907, S. 1699; Organ 1907, S. 69.

Zusammenstellung 6.

Widerstandsberechnung nach „Studiengesellschaft“ für „Abteil-Wagenzug“.

Zugzusammensetzung:

10 Abteilwagen zu je  $q = 40$  t Gewicht<sup>1)</sup>

Wagengewicht  $G_w = 40 \times 10 = 400$  t

Lok- und Tendergewicht  $GL = \frac{120}{520}$  t

Gesamt-Zuggewicht  $G_{gz} =$

$$f = 2 \text{ qm}; \Sigma (f) = 20$$

$$F = 10 \text{ qm}$$

$$W_L + W_w = GL \cdot (4 + 0,025 \cdot V) + 0,0052 \cdot V^2 \cdot F$$

$$+ G_w \cdot (1,3 + 0,0067 \cdot V) + 0,0052 \cdot V^2 \cdot \Sigma (f)$$

$$= 120 \cdot (4 + 0,027 \cdot V) + 0,052 \cdot V^2 + 400 \cdot (1,3 + 0,0067 \cdot V)$$

$$+ 0,104 \cdot V^2$$

$$W_{gz} = 1000 + 5,92 \cdot V + 0,156 \cdot V^2$$

Steigungen	Widerstände W in kg bei V in km/st bzw. v in m/sek											
	V = 10 v = 2,77	20 5,55	30 8,33	40 11,11	50 13,85	60 16,66	70 19,44	80 22,22	90 25,0	100 27,77	110 30,55	120 33,33
1:∞	1 075	1 185	1 320	1 490	1 685	1 920	2 175	2 475	2 780	3 152	3 540	3 960
1:500	2 115	2 225	2 360	1 530	2 725	2 960	3 215	3 515	3 820	4 192	4 580	5 000
1:400	2 375	1 485	2 620	2 790	2 985	3 220	3 475	3 775	4 080	4 452	4 840	5 260
1:300	2 810	2 920	3 055	3 225	3 420	3 655	3 910	4 210	4 515	4 887	5 275	5 695
1:250	3 155	3 265	3 400	3 570	3 765	4 000	4 255	4 555	4 860	5 232	5 620	6 040
1:200	3 675	3 785	3 920	4 090	4 285	4 520	4 775	5 075	5 380	5 752	6 140	6 560
1:150	4 535	4 650	4 785	4 955	5 150	5 385	5 640	5 940	6 245	6 617	7 005	7 425
1:125	5 235	5 345	5 480	5 650	5 845	6 080	6 335	6 635	6 940	7 312	7 700	8 120
1:100	6 275	6 385	6 520	6 690	6 885	7 120	7 375	7 675	7 980	8 352	8 740	9 160
1:80	9 775	9 885	10 020	10 490	10 885	10 820	10 875	11 175	11 480	11 852	12 240	12 660
1:40	14 075	14 185	14 320	14 490	14 685	14 920	15 175	15 475	15 780	16 152	16 540	16 960

<sup>1)</sup> Das eigentliche Gewicht ist etwas niedriger, aber auf 40 t abgerundet der leichteren Rechnung wegen.

## Zusammenstellung 7.

## Widerstandsberechnung nach „Studiengesellschaft“ für „D-Wagenzug“.

Zugzusammensetzung:

7 vierachsige D-Wagen zu je  $q = 40$  t Gewicht  
 4 sechachsige " "  $q = 50$  t  
 Wagengewicht  $G_w = (7 \cdot 40) + (4 \cdot 50) = 480$  t  
 Lok.- u. Tendergewicht  $G_L = 130$  t  
 Gesamt-Zuggewicht  $G_{gz} = 610$  t

 $f = 1$  qm;  $\Sigma(f) = 11$  $F = 10$  qm

$$\begin{aligned}
 W_L + W_w &= G_L \cdot (4 + 0,027 \cdot V) + 0,0052 \cdot V^2 F \\
 &+ G_w \cdot (1,3 + 0,0067 \cdot V) + 0,0052 \cdot V^2 \Sigma(f) \\
 &= 130 \cdot (4 + 0,027 \cdot V) + 0,052 \cdot V^2 + 480 \cdot (1,3 + 0,0067 \cdot V) \\
 &\quad + 0,0572 \cdot V^2
 \end{aligned}$$

$$W_{gz} = 1144 + 6,726 \cdot V + 0,1092 \cdot V^2$$

Steigungen	Widerstände $W$ in kg bei $V$ in km/st bzw. $v$ in m/sek											
	$V = 10$ $v = 2,77$	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
1:∞	1 220	1 320	1 445	1 590	1 755	1 940	2 150	2 380	2 635	2 910	3 205	3 535
1:500	2 500	2 600	2 725	2 870	3 035	3 220	3 430	3 660	3 915	4 190	4 485	4 815
1:400	2 745	2 845	2 970	3 115	3 280	3 465	3 675	3 905	4 155	4 435	4 830	5 060
1:300	3 250	3 350	3 475	3 620	3 785	3 970	4 180	4 410	4 665	4 940	5 235	5 565
1:250	3 660	3 760	3 885	4 030	4 195	4 380	4 590	4 820	5 075	5 350	5 645	5 975
1:200	4 270	4 370	4 495	4 640	4 805	4 990	5 200	5 430	5 685	5 960	6 255	6 584
1:150	5 290	5 390	5 515	5 660	5 825	6 010	6 220	6 450	6 705	6 980	7 275	7 600
1:125	6 100	6 200	6 325	6 470	6 635	6 820	7 030	7 260	7 515	7 790	8 085	8 415
1:100	7 320	7 420	7 545	7 690	7 855	8 040	8 250	8 480	8 735	9 010	9 305	9 635
1:60	11 385	11 485	11 610	11 755	11 920	12 105	12 315	12 545	12 800	13 075	13 370	13 700
1:40	16 470	16 550	16 695	16 840	17 005	17 190	17 400	17 630	17 885	18 160	18 455	18 785

Hierin bedeuten:

- $L_1$  das Gewicht auf den Lokomotiv- und Tenderlaufachsen in t,  
 $L_2$  das Gewicht auf den gekuppelten Achsen in t,  
 $D$  den Kuppelraddurchmesser in m,  
 $F$  die Windäquivalentfläche  $\cong$  8 bis 9 qm,  
 $a = 5,5$  für Zweikuppler,  
 $a = 7,0$  „ Dreikuppler,  
 $a = 8,0$  „ Vierkuppler,  
 $a = 8,8$  „ Fünfkuppler.

#### VII. Strahl<sup>1)</sup>.

Nur für Lokomotiven unter Dampf und für Dauerleistungen, also bei Anstrengung bis zur Grenze der Verdampfungsfähigkeit.

$$w_i^{\text{kg/t}} = 2,5 + 0,067 \cdot \left(\frac{V}{10}\right)^2 + \left[ a + 0,116 \cdot \frac{V}{D_m} \right] \cdot \left(\frac{G_r}{G_{L+T}}\right)^t$$

Hierin bedeuten:

- $D$  den Kuppelraddurchmesser in m,  
 $G_r$  das Lokomotivgewicht auf den gekuppelten Achsen in t,  
 $G_{L+T}$  das betriebsfähige Gesamtgewicht von Lokomotive  
 nebst Tender in t,  
 $a = 2,5$  für Zweikuppler,  
 $a = 4,0$  „ Dreikuppler,  
 $a = 5,5$  „ Vierkuppler,  
 $a = 7,0$  „ Fünfkuppler.

Tafel I<sup>2)</sup> zeigt eine Übersicht älterer und neuerer Widerstandsformeln, ihre Formen und Benutzungsarten nebst Literaturangaben. In Abb. 19 sind die für einen bestimmten D-Zug nach verschiedenen Widerstandsformeln errechneten Gesamt widerstände vergleichsweise aufgetragen.

#### 4. Widerstände für Schmalspurlokomotiven.

$$w_{gz}^{\text{kg/t}} = w_l^{\text{kg/t}} + w_s^{\text{kg/t}} + w_k^{\text{kg/t}} = \text{Lauf-, Steigungs- und Krümmungswiderstand.}$$

Der Luftwiderstand (sonst ein Bestandteil von  $w_l$ ) wird bei den vorkommenden geringen Geschwindigkeiten vernachlässigt.

$$w_l = 2,4 + \frac{V^2}{1000} \quad (\text{nach „Clark“}); \quad w_s = s \text{ ‰};$$

$$w_k = \frac{400}{R_m - 20} \quad \text{für 1000mm Spur,}$$

$$w_k = \frac{300}{R_m - 10} \quad \text{für 750mm Spur,}$$

$$w_k = \frac{200}{R_m - 5} \quad \text{für 600mm Spur und weniger.}$$

<sup>1)</sup> Anstrengung der Dampflokomotiven, Strahl, S. 30.

<sup>2)</sup> Vgl. Anhang.

Zusammenstellung 8.

Fahrwiderstände  $W_{kg}$  für Gesamt-Zuggewicht  $G_{Gz} = 1000 \text{ t}$ ,

$$V_{kg/t} = 2,5 + \frac{V^2}{x}$$

errechnet nach den „vereinfachten Widerstandsformeln“  $w_{Gz}$

Steigung	x	Fahrwiderstände W in kg für V in km/st										
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
1 : ∞	1 500	2 570	2 770	3 100	3 570	4 170	4 900	5 770	6 770	7 900	9 170	10 570
	2 000	2 550	2 700	2 950	3 300	3 750	4 300	4 950	5 700	6 550	7 500	8 550
	2 500	2 540	2 660	2 860	3 140	3 500	3 940	4 460	5 060	5 740	6 500	7 340
	3 000	2 535	2 635	2 800	3 035	3 335	3 700	4 135	4 635	5 200	5 835	6 535
	3 500	2 530	2 615	2 755	2 955	3 215	3 530	3 900	4 330	4 815	5 355	5 955
4 000	2 525	2 600	2 725	2 900	3 125	3 400	3 750	4 100	4 525	5 000	5 525	
1 : 500	1 500	4 570	4 770	5 100	5 570	6 170	6 900	7 770	8 770	9 900	11 170	12 570
	2 000	4 550	4 700	4 950	5 300	5 750	6 300	6 950	7 700	8 550	9 500	10 550
	2 500	4 540	4 660	4 860	5 140	5 500	5 940	6 460	7 060	7 740	8 500	9 340
	3 000	4 535	4 635	4 800	5 035	5 335	5 700	6 135	6 635	7 200	7 835	8 535
	3 500	4 530	4 615	4 755	4 955	5 215	5 530	5 900	6 330	6 815	7 355	7 955
4 000	4 525	4 600	4 725	4 900	5 125	5 400	5 750	6 100	6 525	7 000	7 525	
1 : 400	1 500	5 070	5 270	5 600	6 070	6 670	7 400	8 270	9 270	10 400	11 670	13 070
	2 000	5 050	5 200	5 450	5 800	6 250	6 800	7 450	8 200	9 050	10 000	11 050
	2 500	5 040	5 160	5 360	5 640	6 000	6 440	6 960	7 560	8 240	9 000	9 840
	3 000	5 035	5 135	5 300	5 535	5 835	6 200	6 635	7 135	7 700	8 335	9 035
	3 500	5 030	5 115	5 255	5 455	5 715	6 030	6 400	6 830	7 315	7 855	8 455
4 000	5 025	5 100	5 225	5 400	5 625	5 900	6 250	6 600	7 025	7 500	8 025	
1 : 300	1 500	5 900	6 100	6 435	6 900	7 510	8 235	9 100	10 100	11 235	12 500	13 900
	2 000	5 885	6 035	6 285	6 635	7 085	7 635	8 285	9 035	9 885	10 835	11 885
	2 500	5 875	5 995	6 195	6 475	6 835	7 275	7 795	8 395	9 075	9 835	10 675
	3 000	5 870	5 970	6 135	6 370	6 670	7 035	7 440	7 940	8 535	9 170	9 870
	3 500	5 865	5 950	6 090	6 290	6 560	6 865	7 235	7 665	8 150	8 690	9 290
4 000	5 860	5 935	6 060	6 235	6 460	6 735	7 055	7 435	7 860	8 335	8 860	



1 : 200	1 500	7 570	7 770	8 100	8 570	9 170	9 900	10 770	11 770	12 900	14 170	15 570
	2 000	7 550	7 700	7 950	8 300	8 750	9 300	9 950	10 700	11 550	12 500	13 550
	2 500	7 540	7 660	7 860	8 140	8 500	8 940	9 460	10 060	10 740	11 500	12 340
	3 000	7 535	7 635	7 800	8 035	8 335	8 700	9 135	9 635	10 200	10 835	11 535
	3 500	7 530	7 615	7 755	7 955	8 215	8 530	8 900	9 330	9 815	10 355	10 955
4 000	7 525	7 600	7 725	7 900	8 125	8 400	8 750	9 100	9 525	10 000	10 525	
1 : 150	1 500	9 235	9 435	9 770	10 230	10 830	11 570	12 430	13 430	14 570	15 730	17 230
	2 000	9 220	9 370	9 620	9 970	10 420	10 970	11 620	12 370	13 220	14 170	15 220
	2 500	9 210	9 330	9 530	9 810	10 170	10 610	11 130	11 730	12 410	13 170	14 010
	3 000	9 200	9 300	9 470	9 700	10 000	10 370	10 800	11 200	11 870	12 400	13 200
	3 500	9 195	9 280	9 420	9 620	10 195	10 565	10 995	11 480	12 020	12 620	13 260
4 000	9 190	9 265	9 390	9 565	9 790	10 065	10 415	10 765	11 190	11 665	12 190	
1 : 100	1 500	12 570	12 770	13 100	13 570	14 170	14 900	15 770	16 770	17 900	19 170	20 570
	2 000	12 550	12 700	12 950	13 300	13 750	14 300	14 950	15 700	16 550	17 500	18 550
	2 500	12 540	12 660	12 860	13 140	13 500	13 940	14 460	15 060	15 740	16 500	17 340
	3 000	12 535	12 635	12 800	13 035	13 335	13 700	14 135	14 635	15 200	15 835	16 535
	3 500	12 530	12 615	12 755	12 955	13 215	13 530	13 900	14 330	14 815	15 355	15 955
4 000	12 525	12 600	12 725	12 900	13 125	13 400	13 750	14 100	14 525	15 000	15 525	
1 : 60	1 500	19 270	19 470	19 800	20 270	20 870	21 600	22 470	23 470	24 600	25 870	27 297
	2 000	19 220	19 370	19 620	19 970	20 420	20 970	21 620	22 370	23 220	24 170	25 220
	2 500	19 210	19 330	19 530	19 810	20 170	20 610	21 130	21 730	22 410	23 170	24 010
	3 000	19 200	19 300	19 470	19 700	20 000	20 370	20 800	21 200	21 870	22 400	23 200
	3 500	19 195	19 280	19 420	19 620	19 880	20 195	20 565	20 995	21 480	22 020	22 620
4 000	19 190	19 265	19 390	19 565	19 790	20 065	20 415	20 765	21 190	21 665	22 190	
1 : 40	1 500	27 570	27 770	28 100	28 570	29 170	29 900	30 770	31 770	32 900	34 170	35 570
	2 000	27 550	27 700	27 950	28 300	28 750	29 300	29 950	30 700	31 550	32 500	33 550
	2 500	27 540	27 660	27 860	28 140	28 500	28 940	29 460	30 060	30 740	31 500	32 340
	3 000	27 535	27 635	27 800	28 035	28 335	28 700	29 135	29 635	30 200	30 835	31 535
	3 500	27 530	27 615	27 755	27 955	28 215	28 530	28 900	29 330	29 815	30 355	31 055
4 000	27 525	27 600	27 725	27 900	28 125	28 400	28 750	29 100	29 525	30 000	30 525	

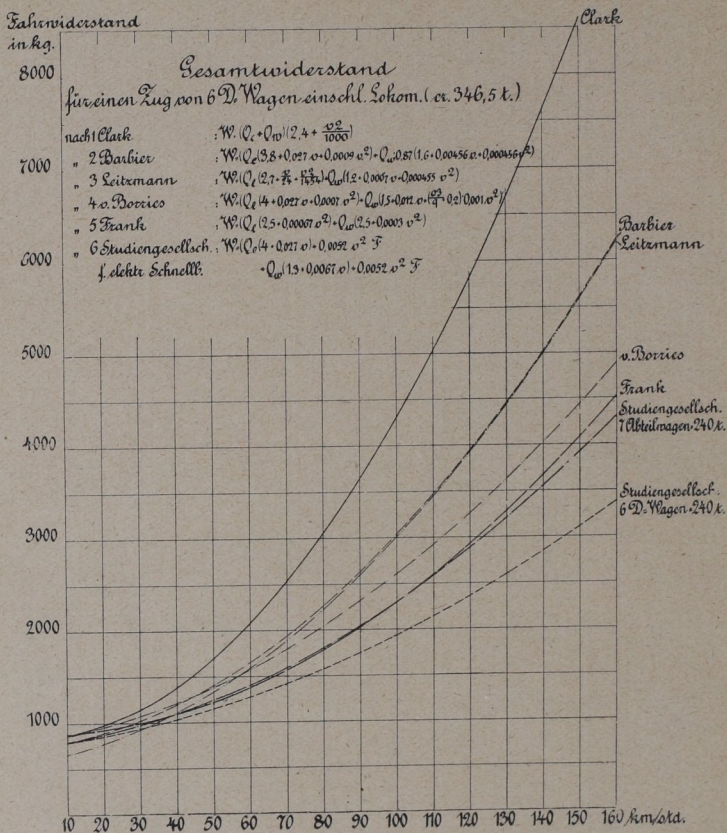


Abb. 19. Laufwiderstand für bestimmten Zug, berechnet nach verschiedenen Widerstandsformeln.

Für Schmalspur fehlt es an Versuchen. Man rechnet häufig nach folgender Tabelle: <sup>1)</sup>

Spur mm	Wagen $w_w$	Lokomotiven $w_l$	Krümmung $w_k$
1000	$2,6 + 0,0003 \cdot V^2$	$2,7 \cdot \sqrt{a + 0,0015 \cdot V^2}$	400 : (R - 20)
750	$2,7 + 0,0002 \cdot V^2$	$2,8 \cdot \sqrt{a + 0,001 \cdot V^2}$	350 : (R - 10)
600	$2,8 + 0,0002 \cdot V^2$	$2,9 \cdot \sqrt{a + 0,0008 \cdot V^2}$	200 : (R - 5)

Hierin ist  $a = 3$  für schwere Güterzuglokomotiven,  
 $a = 2$  für Personenzuglokomotiven.

<sup>1)</sup> Vgl. Hütte, 22. Aufl., Bd. III, S. 718.

## 5. Anwendung der Widerstandsformeln.

I. Bei Lokomotivversuchen, wenn deren Zweck ist, einerseits genau Zugkraft und Leistungen (Z und N), andererseits den Verbrauch an Dampf und Kohlen hierfür ( $\mathfrak{D}/N$ -st und  $B/N$ -st) möglichst genau festzustellen. In diesem Falle müssen genaue Widerstandsformeln, mit Berücksichtigung der Windflächen, für den betreffenden Versuchszug geeignet, genommen werden. Bei Vorhandensein eines Meßwagens im Versuchszug lassen sich nachträglich die gemessenen Kräfte mit den aus den Widerstandsformeln berechneten vergleichen.

II. Für die Konstruktion einer Lokomotive, wenn das Leistungsprogramm (Geschwindigkeit, Steigung, Zuglast) gegeben ist.

III. Zur Berechnung der „Schleppleistungen“<sup>1)</sup> einer vorhandenen Lokomotive.

Es ist dies eine Aufgabe, die der Betrieb stellt. Es sollen für vorhandene Lokomotiven, d. h. Lokomotivgattungen, die „Belastungen“ festgesetzt werden, die von diesen Lokomotiven auf bestimmten Strecken (also nach dem Strecken-Längsprofil) mit bestimmten Geschwindigkeiten gefahren werden können. Hierfür ist es nicht vorteilhaft, Widerstandsformeln zu benutzen, die Windflächen enthalten. Das Zuggewicht soll ja erst gesucht werden, und daher kann über die Windflächen (Zugzusammensetzung) nicht vorher schon etwas gesagt werden. Es ist also wichtig, vereinfachte Widerstandsformeln zu benutzen, die den Widerstand nur vom Gewicht abhängig feststellen lassen. Solche vereinfachten Formeln können nicht allgemein, sondern nur für bestimmte Zugarten einigermaßen genau festgestellt werden. Nachher steht es frei, mit Hilfe der genaueren Formeln nachzuprüfen. Selbstverständlich spielen hierbei auch die vorher gemachten Betriebserfahrungen eine Rolle. Denn aus dem Betrieb ist bekannt, welche Lasten zwischen zwei Haltestellen von bestimmten Lokomotivbauarten befördert werden können.

<sup>1)</sup> Vgl. S. 94.