

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 105/106 (1935)  
**Heft:** 23

**Artikel:** Reibungscharakteristik, Leistungscharakteristik und Betriebsleistung neuzeitlicher Dampf- und Wechselstromlokomotiven  
**Autor:** Rybika, V.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-47441>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 23.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

INHALT: Reibungscharakteristik, Leistungscharakteristik und Betriebsleistung neuzeitlicher Dampf- und Wechselstromlokomotiven. — Turnhallenanlage auf dem Emmersberg in Schaffhausen. — Die Anforderung des Krieges an die Pontoniere und ihr Material. — Mitteilungen: Resonanz bei konstanter Dämpfung. Alexander von Sengers „Baubolschewismus“. Wissenschaftliche Belastungsversuche an der

Schwandbachbrücke, Kt. Bern. Die photoelektrische Steuerung von Scheren in Walzwerken. Bemerkenswerte Flugleistung der „Swissair“. Der neue „Zeppelin“. Die internationale Beleuchtungskommission. — Nekrologe: R. F. Stockar. Hans Haueter. — Literatur. — Mitteilungen der Vereine. — Association suisse pour l'essai des matériaux, etc.

## Band 105

Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich.  
Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

## Nr. 23

## Reibungscharakteristik, Leistungscharakteristik und Betriebsleistung neuzeitlicher Dampf- und Wechselstromlokomotiven.

Von Dr. Ing. V. RYBIČKA, Wien.

Die in den letzten Jahren betriebsmässig gemessenen Reibungszahlen zwischen Rad und Schiene an Dampf- und Wechselstromlokomotiven veranlassen den Verfasser, der Frage näher zu treten, was beide Betriebsarten mit Rücksicht auf das Reibungsgesetz zu leisten vermögen. Die Grundgleichung für die Reibungszugkraft eines Fahrzeuges lautet:

$$Z_R = 1000 \mu G_R = f G_R \quad (1)$$

mit  $Z_R$  Radzugkraft in kg,  $\mu$  Reibungszahl,  $G_R$  Reibungsgewicht in t und  $f$  Reibungswert in kg/t. Heute weiss man durch die Versuche von Müller<sup>1)</sup> und Wichert<sup>2)</sup> mit Elektrolokomotiven und Prof. Nordmann mit Dampflokomoitiven<sup>3)</sup>, dass man mit dem bisher üblichen Wert  $\mu = 1/6$  nicht rechnen darf. Die Messergebnisse dieser Versuche sind in Abb. 1 eingetragen, wobei

bei den Dampflokomotiven die Reibungszahlen als mittlere im Zylinder indizierte Höchstwerte gelten. Gemäss Abb. 1 ist die Reibungszahl der Dampflokomotive nicht nur eine Funktion der Geschwindigkeit  $V$ , sondern auch der Lokomotivbauart. Die Kurven der schweizerischen Lokomotiven (1), sowie die der deutschen Dampflokomoitiven (01, 02, 43, 44) zeigen einen zur Geschwindigkeitsachse konvexen Verlauf mit Poirée'schem Charakter, im Gegensatz zu den Kurven von Wichert (2) mit zur  $V$ -Achse konkavem Charakter. Im Folgenden sind die Kurven von Wichert nicht in Betracht gezogen, weil, wie aus dem Meinungsaustausch Oertel-Müller<sup>4)</sup> hervorgeht, die Veröffentlichungen von Müller das Ergebnis mehrjähriger Messfahrten mit verschiedenen Lokomotiven sind, wobei besonders im Gebiete niedriger Geschwindigkeiten zahlreiche Aufzeichnungen gemacht wurden. Die übrigen Kurven zeigen bei Uebertragung ins halblogarithmische Koordinatensystem, dass die Funktion  $\mu = f(V)$  sich praktisch schreiben lässt:

$$\mu_V = \mu_0 e^{-\frac{V}{c}} \quad (2)$$

mit  $\mu_0$  als Anfangswert der Reibung bei  $V = 0$ ,  $\mu_V$  dem jeweiligen Wert bei der Geschwindigkeit  $V$  und  $c$  einer Konstanten, die sich nach Abb. 1 als Subtangente der Exponentialfunktion in einem Kurvenpunkt ergibt. Damit lautet die Grundgleichung (1)

$$Z_R = f_0 e^{-\frac{V}{c}} G_R \quad (3)$$

<sup>1)</sup> El. Bahnen 1928, S. 63; E. T. Z. 1928, S. 17; E. T. Z. 1929, S. 1377.

<sup>2)</sup> El. Bahnen 1927, S. 90, Bild 30.

<sup>3)</sup> Glasers Annalen 1928, Bd. 103, S. 143.

<sup>4)</sup> El. Bahnen 1928, S. 192.

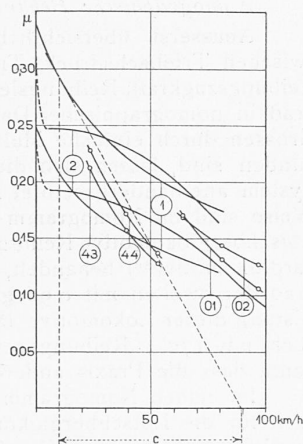


Abb. 1. Betriebsmässig ermittelte Reibungszahlen von elektr. und Dampflokomotiven an der Reibungsgrenze.

1 Ergebnisse Müllers für trockenen und feuchten Schienenzustand.

2 Desgl. Ergebnisse Wicherts.

43 Heissdampfzwillings-Güterzuglokomotive Reihe 43 der D. R.

44 Heissdampfdrillings-Güterzuglokomotive Reihe 44 der D. R.

01 Heissdampfzwillings-Schnellzuglokomotive Reihe 01 der D. R.

02 Heissdampfvierzylinderverbund-Schnellzuglok. Reihe 02 der D. R.

Die vom Schienenzustand, Geschwindigkeitsbereich und den einzelnen Lokomotivbauarten abhängigen Koeffizienten  $f_0$  und  $c$  zeigt eine Zusammenstellung in Tabelle 1.

Tabelle 1.

Reibungswerte  $f_0$  und  $c$  für verschiedene Lokomotiven, Geschwindigkeiten und Schienenzustände.

| $V$ in km/h | Lok. Nr.               | $f_0$ in kg/t | $c$ in km/h | Schienenzustand       |
|-------------|------------------------|---------------|-------------|-----------------------|
| 0 ÷ 25,13   | elektrische Lokomotive | 335,4         | 79,45       | trocken (gut)         |
| 25,13 ÷ 80  |                        | 285,4         | 162,2       | "                     |
| 0 ÷ 22,96   |                        | 243,8         | 66,37       | nass (feucht, neblig) |
| 22,96 ÷ 80  | 01                     | 200,0         | 154,9       | "                     |
| 60 ÷ 100    |                        | 430,5         | 68,5        | trocken               |
| 60 ÷ 100    |                        | 286,4         | 118,8       | "                     |
| 20 ÷ 55     |                        | 318,2         | 57,1        | "                     |
| 20 ÷ 55     |                        | 338,9         | 58,7        | "                     |
|             |                        |               |             | "                     |

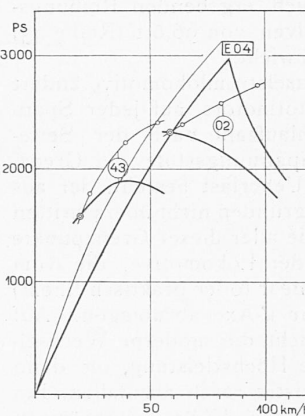


Abb. 2. Leistungs- und Reibungscharakteristik von Dampf- und Wechselstromlokomotiven.

Reibungsgewicht, Zylinder- und Kesselabmessungen müssen bei jeder Dampflokomotive in einem bestimmten harmonischen Verhältnis stehen. Elektrische Lokomotiven werden charakterisiert durch die von Prof. Dr. W. Kummer<sup>5)</sup> eingeführten beiden Kennziffern:

$$k_1 = \frac{M_L}{G_D} \leq \frac{G_R}{G_D} r f \text{ in mkg/t} \quad (4)$$

$$k_2 = \frac{N}{G_D} \text{ in PS/t} \quad (5)$$

Hierin sind  $M_L$  das auf den Radumfang bezogene Lokomotivdrehmoment in mkg,  $r$  Triebtrahalbmesser in m,  $G_D$ ,  $G_R$  Dienst- und Reibungsgewicht in t,  $f$  der Reibungswert in kg/t und  $N$  die Lokomotiv-Nennleistung

in PS, die mit der Stundenzugkraft  $Z$  in der bekannten Beziehung steht:

$$N = \frac{ZV}{270} \leq \frac{Z_R V}{270} \quad (6)$$

Mit  $Z_R$  aus (1), (3),  $N$  aus (6) folgt

$$k_2 = \frac{N}{G_D} \leq \frac{G_R f V}{G_D 270} \quad (5a)$$

Mit  $q = \frac{G_R}{G_D}$  (7), dem Reibungsgrad der Lokomotive,

nimmt die rechte Seite der Ungleichung (5a) mit den Koeffizienten aus Tabelle 1 für trockene Schienen die Form an: für  $V = 0$  bis 25,13 km/h

$$k_2' = 1,242 q e^{-\frac{V}{79,45}} V \text{ in PS/t} \quad (5b)$$

$$\text{bzw. } k_2'' = 0,9138 q e^{-\frac{V}{79,45}} V \text{ in kw/t}$$

für  $V = 25,13$  bis 80 km/h

$$k_2' = 1,0571 q e^{-\frac{V}{162,2}} V \text{ in PS/t} \quad (5c)$$

$$\text{bzw. } k_2'' = 0,7776 q e^{-\frac{V}{162,2}} V \text{ in kw/t}$$

<sup>5)</sup> W. Kummer: Maschinenlehre der elektrischen Zugförderung.

Es soll also  $k_2 \leq k_2'$  sein. Gilt das Gleichheitszeichen, so fällt die betreffende Geschwindigkeit mit der Reibungsgeschwindigkeit der Lokomotive zusammen. Hierunter wird bei der Dampflokomotive jene Geschwindigkeit verstanden, bei der die Maschinenleistung gleich der Leistung der Reibungszugkraft der Triebräder ist (Abb. 2).

Im Folgenden wird, in Uebereinstimmung mit Dr. Hruschka<sup>6)</sup>, unter Betriebsleistung  $B$  das Produkt aus dem Zuggewicht  $Q$  und der Geschwindigkeit  $V$  verstanden:

$$B = QV \text{ in tkm/h} \quad (8)$$

#### Leistungscharakteristik.

Die Dampflokomotiveleistung als Funktion der Geschwindigkeit steigt zunächst längs der Reibungsgrenze der Triebäder an, um von der Reibungsgeschwindigkeit an in die durch die Kesselleistung bedingte Charakteristik überzugehen, die sich als mehr oder weniger konkaver Bogen zur Geschwindigkeitsachse mit einem Scheitelwert bei einer bestimmten Geschwindigkeit ergibt. In Abb. 2 sind mit den stark gezeichneten Kurven 43 und 02 die Leistungscharakteristik der Güterzugzwillingslokomotive Reihe 43 und der Vierzylinderverbund-Schnellzuglokomotive Reihe 02 der Deutschen Reichsbahn<sup>7)</sup>, von der durch Doppelringe besonders hervorgehobenen Reibungsgeschwindigkeit an, wiedergegeben. Die schwach gezeichneten durch Ringe unterbrochenen Kurven bringen die auf Grund der Versuche sich ergebenden Reibungscharakteristiken dieser Lokomotiven von 96,6 t (Reihe 43) und 60 t (Reihe 02) Reibungsgewicht.

Bei der neuzeitlichen Wechselstromlokomotive ändert sich die Leistung des Kommutatormotors auf jeder Spannungsstufe in Funktion der Umlaufzahl nach der Seriecharakteristik, wobei für jede Spannungsstufe ein Grenzstrom für Dauer-, Stunden- und Ueberlast besteht, der aus Erwärmungs- und Kommutierungsgründen nicht überschritten werden darf. Die Verbindungslinie aller dieser Grenzpunkte liefert dann die Charakteristik der Lokomotive, die vom Koordinatenursprung zunächst linear (oder praktisch linear) ansteigt, um später konkav zur  $V$ -Achse abzubiegen. Auf der letzten Spannungsstufe erreicht die moderne Wechselstromlokomotive gleichzeitig ihre Höchstleistung, um dann längs der Reihenschlusscharakteristik rasch abzufallen. Ein derartiges Diagramm mit der nach Müller zugehörigen Reibungscharakteristik ist für die 1 C<sub>0</sub> 1 Schnellzuglokomotive Reihe E 04 der D. R. S<sup>8)</sup> mit 60 t Reibungsgewicht und 110 km/h Höchstgeschwindigkeit in Abb. 2 eingetragen. Da nun Reibungs- und Motorgrenzcharakteristik auffallend ähnlichen Verlauf aufweisen, muss ein möglichstes Zusammenfallen der beiden angestrebt werden. Es erscheint vorteilhaft, die Stundenleistung nach IEC mit der Reibungsleistung bei trockenen Schienen zu decken.

Aus den Gleichungen (5b, c) kann auf die Ausnützung des Reibungsgewichtes einer Lokomotive geschlossen werden, für die Verhältnisse der Praxis sei hingegen mit dem Reibungs- oder Adhäsionswirkungsgrad gerechnet, worunter das Verhältnis der am Radumfang gemessenen Motorleistung zur Reibungsleistung, oder das Verhältnis Motorzugkraft  $Z$  am Radumfang zu Reibungszugkraft verstanden sei:

$$\eta_a = \frac{N}{N_R} 100 \equiv \frac{Z}{G_R f} 100 = \frac{k_2}{k_2'} 100 \text{ in \%} \quad (9)$$

Tritt bei einer bestimmten Geschwindigkeit im Beharrungszustand (Stundenleistung)  $\eta_a = 100$  auf, so ist diese Geschwindigkeit gleich der Reibungsgeschwindigkeit. Bei Lokomotiven mit Einzelachsantrieb ergibt sich, sofern nicht Anordnungen zum Ausgleich der Achsdruckänderungen

<sup>6)</sup> Hruschka: El. Bahnen 1931, S. 97: „Kritische Vorschläge über die Benennung von Betriebsgrößen, Maschinenleistungen, Bewegungswiderständen und Zugkräften im Eisenbahnbetrieb“.

<sup>7)</sup> Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens 1930, S. 268, Bild 77.

<sup>8)</sup> El. Bahnen 1933, S. 154, Bild 10.

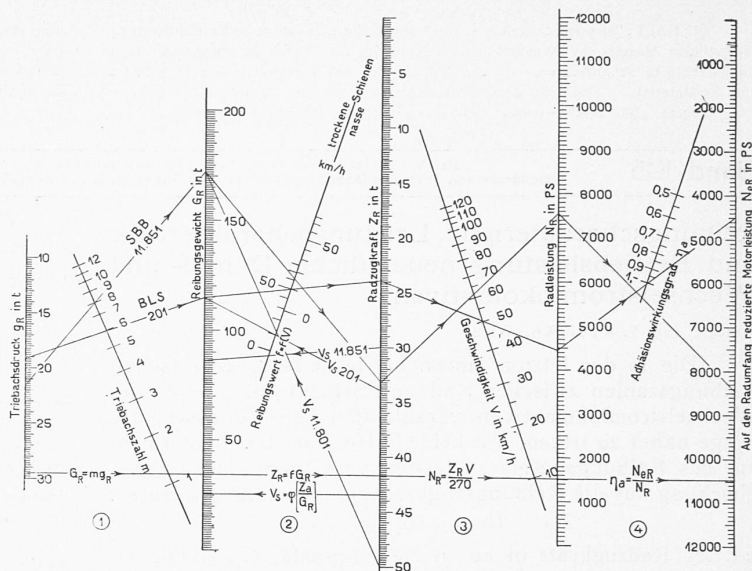


Abb. 3. Nomogramm 1.

vorgesehen sind, eine volle Reibungsausnützung nur bei den durch das Moment der Hakenzugkraft am meisten entlasteten Achsen.

#### Nomographische Behandlung der Reibungsfrage.

Äusserst übersichtlich gehen die Zusammenhänge zwischen Triebachsdruk, Triebachszahl, Reibungsgewicht, Reibungszugkraft, Reibungsleistung und Adhäsionswirkungsgrad in nomographischer Darstellung hervor. Da alle diese Grössen durch einfache Multiplikationen miteinander verbunden sind, lassen sich diese Zusammenhänge in einem System aneinandergereihter Z-Tafeln darstellen. Auf diese Weise sind im Nomogramm 1 der Abb. 3 die 1 C<sub>0</sub> 1 Löttschberglokomotive Reihe 201<sup>9)</sup> sowie die Nr. 11851 Gott-hardlokomotive<sup>10)</sup> behandelt, wobei der Getriebewirkungsgrad der zweiten mit 0,96 geschätzt wurde. Die Stundenleistung dieser Lokomotive lässt sich demnach bei 62 km/h auch mit 172 t Reibungsgewicht nicht ausfahren, es sei denn, dass die Praxis andere Reibungszahlen liefert.

Im selben Nomogramm ist in der zweiten Abteilung auch für die Löttschberglokomotive und beide A<sup>e</sup> 8/14 Gott-hardlokomotiven jene Geschwindigkeit  $V_s$  ersichtlich, bei der das durch die Anfahrzugkraft bedingte Schleudern der Triebäder beginnt. Mit 34 t Anfahrzugkraft bei 114,6 t Reibungsgewicht der Reihe 201 tritt ein Schleudern bei rund 10 km/h, bei der 11851 mit 50 t Zugkraft und 172 t Reibungsgewicht bei rund 11 km/h ein. Hingegen erscheinen die 60 t Zugkraft bei 172 t Reibungsgewicht (30 t und 86 t im Diagramm) der 11851 reibungstechnisch unmöglich.

Ein weiteres Nomogramm 2, Abb. 4, das für Lokomotiven, die an der Reibungsgrenze fahren, erfüllt sein muss, lässt sich aus den Beziehungen entwickeln. Für die elektrische Zugkraft  $Z$  am Radumfang der Einzelachse gilt mit  $M$  Motordrehmoment am Radumfang in mkg,  $D$  Trieb-raddurchmesser in m und  $\ddot{u}$  Zahnradübersetzung  $> 1$

$$Z = \frac{2}{D} M \ddot{u}, \text{ oder } \frac{\ddot{u}}{D} = \frac{Z}{2M} \quad (10)$$

was nomographisch auf eine Doppel-Z-Tafel führt. Liegt also für eine bestimmte Geschwindigkeit die Reibungs-achszugkraft oder Reibungsachsleistung vor — im Nomo-gramm 2 durch die Strahlen 1 und 2 gegeben — so hat es keinen Sinn, die Stundenleistung grösser als die Reibungs-leistung bei trockenen Schienen zu machen. Das Drehmoment oder die Umlaufzahl ist durch Ziehen des Strahles 3 gemäss der Beziehung

$$M = 974 \frac{P}{n} \quad (11)$$

frei wählbar; dadurch ist die Richtung des Strahles 4 und

<sup>9)</sup> Beschrieben in „SBZ“ 1927, Bd. 89, S. 221\*.

<sup>10)</sup> Beschrieben in „SBZ“ 1932, Bd. 99, S. 145\*.



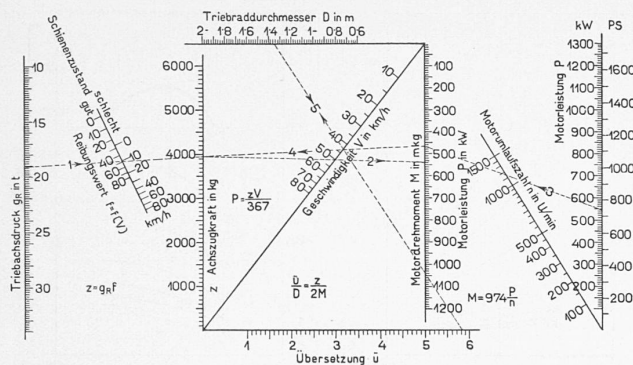


Abb. 4. Nomogramm II.

damit der Schnittpunkt 4 mit der Zapfenlinie (im Nomogramm gleichzeitig die Geschwindigkeitsskala für den Strahl 2) gegeben, durch den der Strahl 5 gehen muss. Strahl 5 bestimmt zum freigewählten Triebbraddurchmesser die zugehörige Übersetzung, oder umgekehrt.

*Grenzlasten und Betriebsgrenzleistung unter Berücksichtigung des Reibungsgesetzes.*

Mit dem Reibungsgesetz der Gleichung (3) lassen sich die zu jeder Geschwindigkeit gehörenden Grenzlasten und damit auch die Betriebsgrenzleistungen eines elektrischen Zuges berechnen. Es soll nun untersucht werden, wie hoch die Reibungsgeschwindigkeit gewählt werden muss, damit der elektrische Zug mit Rücksicht auf das Reibungsgesetz seine grösste Betriebsleistung hat. Das gesamte Zuggewicht  $Q$  ist bei voller Reibungsausnutzung im Beharrungszustand an die Bedingung geknüpft:

$$Q = \frac{Z_R}{w + s} \text{ in t} \quad (12)$$

Hierin ist  $w$  der Fahrwiderstand in der Ebene,  $s$  der Steigungswiderstand einschliesslich der Krümmungswiderstände in kg/t. Die gebräuchlichsten Fahrwiderstandsformeln lauten

$$w = a + bV^2 \text{ in kg/t} \quad (13)$$

worin  $a$  und  $b$  Konstante der Zuggattung sind. Bei Lokomotiven berücksichtigt man ausserdem noch den Einfluss des Luftwiderstandes auf die Stirnfläche des Fahrzeuges. Die verhältnismässig einfache Formel der S.B.B.<sup>11)</sup> lautet dafür

$$w_L = G_D(2,5 + 0,0003V^2) + 0,054V^2 \text{ in kg} \quad (14)$$

mit  $G_D$  Lokomotivgewicht in t. Für (13) und (14) haben die verschiedenen Bahnverwaltungen, die ihren Verhältnissen entsprechenden Konstanten. Eine Auslese der zahlreichen Widerstandsformeln nach (13), (14) bringt Abb. 5, wobei aus zeichnerischen Gründen die Abszissenaxe eine

<sup>11)</sup> Sachs: Elektrische Vollbahnlokomotiven.

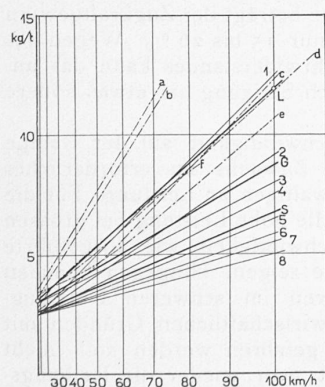


Abb. 5. Fahrwiderstände von Zügen und elektrischen Lokomotiven.

- 1 Leerwagengüterzüge  $w = 2,5 + 0,001V^2$
  - 2 Güterzüge  $w = 2,5 + 0,00066V^2$
  - 3 Güterzüge  $w = 3 + 0,0005V^2$   
(Formel der S.B.B.)
  - 4 Güterzüge gemischter Zusammensetzung  $w = 2,5 + 0,0005V^2$
  - 5 Eilgüterzüge  $w = 2,5 + 0,0004V^2$
  - 6 Personenzüge  $w = 2,5 + 0,00033V^2$
  - 7 Schnell- und Personenzüge  $w = 2,5 + 0,0003V^2$   
(Formel der S.B.B.)
  - 8 Schnellzüge  $w = 2,5 + 0,00025V^2$
- a C + C Lötschberglokomotive R 121  
b E 1 Lötschberglokomotive R 153  
(aus Seefehlner Elektr. Zugförderung I. Aufl., S. 146, Abb. 140).

- c B<sub>0</sub>-B<sub>0</sub> Paris-Orléans-Lokomotive E 101 u. 180 } aus Revue générale  
d 2 D<sub>0</sub> 2 Paris-Orléans-Lokomotive E 501 } de chemin de fer  
e B<sub>0</sub>-B<sub>0</sub> Paris-Orléans-Lokomotive E 1 u. 80 } 1927, S. 210.  
f 1 C 1 Lok. Reihe 1029.500 der Oester. Bundesbahnen (aus E. u. M. 1924, S. 549).  
L Elektrische Lokomotive  $w = 3,1 + 0,00088V^2$ .  
G Elektrische Güterzüge mit 20% Lokomotivgewichtanteil  $w = 3,02 + 0,000576V^2$ .  
S Elektrische Schnellzüge mit 20% Lokomotivgewichtanteil  $w = 2,62 + 0,000416V^2$ .

$V^2$ -Teilung erhielt. In diesem Bild stellen die dünnen mit Ziffern versehenen Linien Widerstandswerte der Wagenzüge, die strichpunktierten mit Kleinbuchstaben versehenen Linien Widerstandswerte von elektrischen Lokomotiven dar.

Für die Betriebsleistung folgt mit (3), (8), (12) und (13)

$$B = QV = \frac{Z_R V}{w + s} = \frac{f_0 e^{-\frac{c}{V}} V}{s + a + bV^2} \quad (15)$$

in km/h je t Reibungsgewicht.

Die gesuchte Reibungsgeschwindigkeit höchster Betriebsleistung ist gegeben durch

$$\frac{dB}{dV} = 0 = V \frac{dQ}{dV} + Q \quad (16)$$

Mit

$$s + a = A \quad (17)$$

folgt aus (16):

$$V^3 + V^2 c + V \frac{A}{b} - \frac{A c}{b} = 0, \quad (18)$$

und hieraus, mit

$$3p = \frac{A}{b} - \frac{c^2}{3}, \quad 2q = \frac{2c^3}{27} - \frac{4Ac}{3b} \quad (19)$$

$$u = \sqrt[3]{-q + \sqrt{q^2 + p^3}}, \quad v = \sqrt[3]{-q - \sqrt{q^2 + p^3}} \quad (20)$$

die gesuchte Reibungsgeschwindigkeit höchster Betriebsleistung

$$V_B = u + v - \frac{c}{3} \text{ in km/h} \quad (21)$$

In die Gleichung (12) muss für  $w$  der Wert für die Lokomotive und den Wagenzug gesondert eingesetzt werden. Da aber im Voraus über die Lokomotivbauart, sowie über den Anteil des Lokomotivgewichtes am Zuggewicht nichts bekannt ist, wird im folgenden für den ganzen Zug eine Einheitsformel abgeleitet.

Für den Fahrwiderstand des ganzen Zuges einschliesslich Lokomotive lässt sich bei  $x\%$  Anteil des Lokomotivgewichtes am Gesamtzuggewicht schreiben

$$w_{zg} = xw_L + (1 - x)w \quad (22)$$

mit  $w_L$  Lokomotivwiderstand,  $w$  Wagenzugwiderstand.

Für den Wagenzug seien die Formeln der S.B.B. nach Abb. 5, Linie 7 für Schnell- und Personenzüge, Linie 3 für Güterzüge gewählt gemäss der Gleichungen

$$w_{S,P} = 2,5 + 0,0003V^2 \quad (23)$$

$$w_a = 3 + 0,0005V^2 \quad (24)$$

Der Anteil des Lokomotivgewichtes am Gesamtzuggewicht sei einheitlich für alle Steigungen mit 20% gewählt, nachdem bei den Probefahrten die Lötschbergreihe 201 600 t Anhängelast mit bis zu 65 km/h auf 27‰ beförderte, womit nahezu die oberste Steigungsgrenze auf Vollbahnen erreicht ist. Bei dieser Reihe beträgt somit das Lokomotivgewicht am Gesamtzuggewicht  $x = 19,12\%$ .

In Abb. 5 sind ferner die Messergebnisse über den Fahrwiderstand einiger elektrischer Lokomotiven eingetragen. Sieht man von den beiden Geraden  $a$  und  $b$  ab, die die Lötschbergreihen R 121 und R 153 mit Stangenantrieb bringen, so dürfte mit genügender Genauigkeit gerechnet werden, wenn man bei neuzeitlichen Einzelachslokomotiven — die heute fast überall als ausschliessliche Streckenlokomotiven in Frage kommen — mit der stark eingezeichneten Linie L rechnet, die durch die Koordinatenpunkte  $V = 0$  mit  $w_L = 3,1$  und  $V = 100$  mit  $w_L = 11,9$  geht und demnach die Gleichung

$$w_L = 3,1 + 0,00088V^2 \quad (25)$$

erfüllt.

Als Fahrwiderstand für den ganzen Schnellzug erhält man dann mit (23) bei 20%igem Lokomotivgewichtanteil einheitlich für alle Steigungen die Gleichung

$$w_{S,zg} = 0,62 + 2 + (0,000176 + 0,00024)V^2 = 2,62 + 0,000416V^2 \quad (26)$$

ebenso mit (24) für den ganzen Güterzug die Gleichung

$$w_{G,zg} = 0,62 + 2,4 + (0,000176 + 0,0004)V^2 = 3,02 + 0,000576V^2 \quad (27)$$

Den Verlauf der Gleichung (26) stellt in Abb. 5 die stark gezeichnete Linie S, jene der Gleichung (27) die Linie G dar.

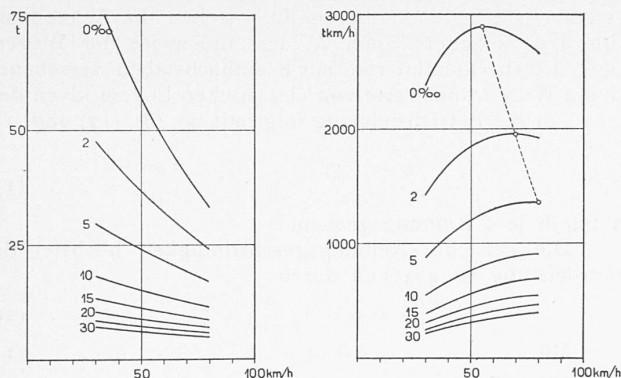


Abb. 6. Für Schnellzüge.

Links: Grenzgewicht pro t Reibungsgewicht im Beharrungszustand bei trockenen Schienen gemäss der Gleichung

$$Q = \frac{285,4 e^{-V/162,2}}{5 + 2,62 + 0,000416 V^2}$$

Abb. 6a. Betriebs-Grenzleistung pro t Reibungsgewicht bei trockenen Schienen gemäss der Gleichung  $B = QV$ .

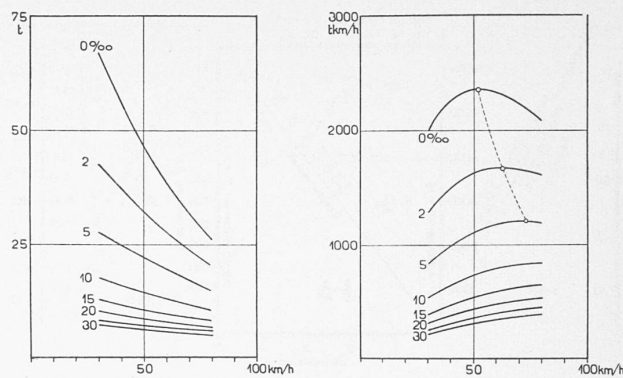


Abb. 7. Für Güterzüge.

Links: Grenzgewicht pro t Reibungsgewicht im Beharrungszustand bei trockenen Schienen gemäss der Gleichung

$$Q = \frac{285,4 e^{-V/162,2}}{5 + 3,02 + 0,000576 V^2}$$

Abb. 7a. Betriebs-Grenzleistung pro t Reibungsgewicht bei trockenen Schienen gemäss der Gleichung  $B = QV$ .

Mit den Gleichungen (3), (12), (15), (26) und (27) sind in den Abb. 6 bis 7a die äussersten Grenzzuggewichte je t Reibungsgewicht und der Verlauf der Betriebsleistung als Funktion der Geschwindigkeit für die einzelnen Zugarten bei trockenen Schienen wiedergegeben. Für nasse Schienen ergibt sich ein ähnlicher Kurvenverlauf mit entsprechend geringeren Ordinaten. Bei den Grenzzuggewichten darf allerdings nicht übersehen werden, dass sie sich auf den Beharrungszustand beziehen, weshalb die namentlich in der Ebene und bei geringer Steigung reichlich hoch erscheinenden Gewichte, wegen der von der Lokomotive bei der Anfahrt zu leistenden Beschleunigungsarbeit, praktisch nicht in Frage kommen. Aus den Abb. 6a und 7a folgt, dass die Reibungsgeschwindigkeit höchster Betriebsleistung mit der Steigung wächst, wobei die sich rechnerisch ergebenden besonders hohen Geschwindigkeiten in den grössten Steigungen, wegen des zweifelhaften Verlaufes der Funktion  $\mu = f(V)$  oberhalb 80 km/h, nicht mehr eingezeichnet sind. Wie die Rechnung ergibt, ist der Schienenzustand lediglich auf die Höhe der Betriebsleistung von Einfluss, hingegen nicht auf die Reibungsgeschwindigkeit höchster Betriebsleistung. Aus dem Verlauf der Kurven ist ferner ein ausgesprochenes Maximum für geringe Steigungen ersichtlich. Erst für Steigungen von über etwa 10‰ beginnen die Kurven flacher zu verlaufen. Für geringe Steigungen und andere Fahrwiderstandsformeln als die hier verwendeten ist es demnach nicht erforderlich,  $V_B$  nach der immerhin umständlichen Gleichung (21) zu berechnen. Durch Zeichnen des Verlaufs der Betriebsleistung im Geschwindigkeitsgebiet 30 bis 80 km/h bei  $s = 0‰$  wird sich  $V_B$  deutlich ablesen lassen. Soll nun die Betriebsleistung mit Rücksicht auf das Reibungsgesetz den Höchstwert erreichen, so muss die elektrische Lokomotive eine hohe Reibungsgeschwindigkeit besitzen, was in allen Zügen und gerade in der Steigung rasches Fahren bedingt.

Die hohe Reibungsgeschwindigkeit wiederum erfordert mit Rücksicht auf den Fahrmotor eine höhere Höchstgeschwindigkeit vor allem der Güterzuglokomotive. Weiter folgt, dass gerade im Gebirgsdienst die Einheitslokomotive für alle Zugarten am Platz ist, da hier der Einfluss des reinen Fahrwiderstandes gegen den Steigungswiderstand stark zurücktritt und das zulässige Wagengewicht durch die Belastungsgrenze des Zughakens in fast allen Zügen gleich hoch ist. Mit der Gepflogenheit des von der Dampflokomotive her gewohnten langsamen Fahrens in der Rampe muss gründlich gebrochen werden; denn hier zeigt sich ein gewaltiger bis heute viel zu wenig beachteter Vorteil vor allem der elektrischen Güterzuglokomotive.

Der Bau der Universallokomotiven  $A^e \frac{8}{14}$  der S.B.B. mit 100 km/h Höchstgeschwindigkeit, die sowohl Güterzüge von 700 bis 750 t mit 50 km/h, als auch Schnellzüge von 600 bis 630 t mit 62 km/h über die Gotthardrampen

befördern, ist in jeder Hinsicht richtig. Da der Eisenbahnbetrieb die aus den Abb. 6a, 7a ersichtlichen hohen Rampengeschwindigkeiten in den grössten Steigungen nicht verwerten kann, weil ausser Sicherheitsgründen auch wirtschaftliche Rücksichten eine oberste Geschwindigkeitsgrenze festsetzen, könnte man im Rampendienst solche Geschwindigkeiten bergwärts wählen, die auch in der Talfahrt nach den technischen Vereinbarungen noch zulässig sind, wodurch auf eingeleisigen Strecken eine gute Fahrplanbildung ermöglicht wird. Gemäss dem Verlauf der Betriebsleistungen in den Abb. 6a und 7a kann der Wert der Reibungsgeschwindigkeit höchster Betriebsleistung in der Ebene als Mindestgeschwindigkeit für die Rampe angesehen werden, d. h. der elektrische Güterzug soll mindestens rund 50 km/h, der elektrische Schnellzug mindestens rund 60 km/h fahren. Güterzüge wird man, um bei grösseren Zuggewichten nicht übermässig hohe Lokomotivleistungen zu erhalten, einheitlich in allen Steigungen mit 50 km/h führen. Schnellzüge können in geringeren Steigungen 80 bis 90 km/h fahren.

Wie unrichtig das langsame Fahren des elektrischen Güterzuges ist, zeigt auch folgende Betrachtung. Den Kurven 1 und 43 der Abb. 1 ist zu entnehmen: Bei  $V = 50, 30, 20$  km/h ist für die Güterzugzwillingslokomotive  $\mu_{50} = 0,132, \mu_{30} = 0,187, \mu_{20} = 0,226$ ; für die elektrische Lokomotive  $\mu_{50} = 0,208, \mu_{30} = 0,240, \mu_{20} = 0,262$ .

Sinkt die Geschwindigkeit der Dampflokomotive von 50 auf 30 oder 20 km/h, so ergibt das Reibungsgesetz einen Gewinn an Zugkraft von 42 bis 71% bei einem Geschwindigkeitsverlust von 40 bis 60%. Zugkraftgewinn und Geschwindigkeitsverlust gleichen sich annähernd aus. Bei der elektrischen Lokomotive beträgt der Zugkraftgewinn unter den selben Umständen nur 15 bis 26%. Wegen des gleichzeitigen Sinkens des Fahrwiderstandes kann das angehängte Wagengewicht je nach Steigung um etwas höhere Beträge vermehrt werden.

Eine Erhöhung der Geschwindigkeit auf der Rampe bedingt nur einen geringen Zuwachs an erforderlicher Zugkraft, allerdings einen gewaltigen an Leistung. Für die elektrische Lokomotive bildet die hohe Leistung bei grossen Geschwindigkeiten keine Bauschwierigkeit, wie ausgeführte Lokomotiven der letzten Jahre zeigen. Hingegen kommen die neuesten Dampflokomotiven im schweren Güterzugrampendienst, wo also aus wirtschaftlichen Gründen mit der Reibungsgeschwindigkeit gefahren werden soll, nicht über 30 km/h hinaus. Nimmt man wieder die Reibungsgeschwindigkeit höchster Betriebsleistung in der Ebene auch bei der Dampflokomotive als Grundlage für die Mindestgeschwindigkeit auf der Rampe an, so müsste mit den Koeffizienten aus Tabelle 1 und Gleichung (24) der schwerste Güterzug in der Steigung 36 bis 38 km/h fahren, ein Wert, der bis heute nicht erreicht wurde. Die 1E



Einheitsgüterzuglokomotiven der Deutschen Reichsbahn bewältigen mit entsprechender Reibungsgeschwindigkeit 600 t auf 25 ‰ mit 20 km/h und 1545 t auf 10 ‰ mit 20 km/h.<sup>12)</sup>

An einem Beispiel seien die einzelnen Komponenten einer Erhöhung der Güterzuggeschwindigkeit auseinander-gesetzt. Die E-Gattung Reihe 1280 der Oe. B. B.<sup>13)</sup> mit 1810 PS Stundenleistung bei 33,6 km/h hat ein Förderprogramm von 900 t auf 10 ‰ mit 36 km/h. Für dieses Programm sind nach den Gleichungen (14) und (24) 13400 kg Radzugkraft und 1788 PS erforderlich. Erhöht man die Geschwindigkeit auf 50 km/h, so benötigt man bei 81,6 t Lokomotivgewicht 14025 kg Zugkraft und 2600 PS am Radumfang der Lokomotive. Einer Zugkraft-erhöhung von nur 4,8 ‰ — im selben Mass steigt auch der Wattstundenverbrauch je tkm — steht eine Leistungs-erhöhung von 45,5 ‰ gegenüber. Die Reibungszahl sinkt dabei gemäss Kurve 1 Abb. 1 von 0,229 auf 0,208 oder um 9,1 ‰. Das neue Programm lässt sich von der B<sub>0</sub>-B<sub>0</sub>-Lokomotive Reihe E 44 der D. R. B. (Bergmantyp von 3000 PS bei 50 km/h), wie Probefahrten<sup>14)</sup> bereits bewiesen haben, spielend erfüllen. Dabei ist diese Lokomotive um 1,6 t leichter, in ihrem Aufbau einfacher und fährt oben-drein an der Reibungsgrenze.

#### Belastungsgrenze des Zughakens.

Die letzte und nicht minder wichtige Grenze des Zugbetriebes bildet der Zughaken, dessen Dauergrenz-belastung in Europa zur Zeit mit 21 t festliegt. Für den Güterzugverkehr sind die Grenzen für einige gebräuchliche Steigungen für die Widerstandsformel (24) in Tabelle 2 wiedergegeben.

Tabelle 2.

Zulässige Güterzugwagengewichte in t bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Steigungen.

| V km/h: | 30   | 50   | 70   | 90   |
|---------|------|------|------|------|
| 5 ‰     | 2490 | 2270 | 2010 | 1741 |
| 10 "    | 1561 | 1472 | 1360 | 1231 |
| 15 "    | 1138 | 1091 | 1028 | 953  |
| 20 "    | 896  | 867  | 826  | 777  |
| 25 "    | 739  | 719  | 691  | 656  |
| 30 "    | 628  | 613  | 593  | 567  |

Der 21 t-Haken beschränkt das Güterzugwagengewicht bei 10 ‰ Steigung auf 1500 t, bei 20 bis 30 ‰ auf 900 bis 600 t. Legt man im Güterzugdienst eine einheitliche Rampengeschwindigkeit von 50 km/h fest, so können mit geringen Ueberlastungen des Zughakens, die bei 67 t Bruchlast der Zugvorrichtung noch immer eine rund dreifache Sicherheit gewähren, die selben Wagengewichte wie im Dampfbetrieb, jedoch bei wesentlich höhern Geschwin-digkeiten gefahren werden. Die Ueberlastungen betragen z. B. nach Tabelle 2 auf den hauptsächlich in Frage kom-menden Steigungen von 10 bis 30 ‰, falls die Geschwin-digkeit von 30 auf 50 km/h erhöht wird, nur 6,1 bis 2,4 ‰. Der früher erwähnte Zugkraftgewinn von 15 ‰ auf Grund des Reibungsgesetzes, wenn statt mit 50 mit 30 km/h gefahren wird, kann durch den Zughaken bei voll ausgelasteten Zügen gar nicht ausgenützt werden, so-dass es daher auch von diesem Standpunkt aus falsch ist, Güterzüge beim elektrischen Betrieb langsam zu führen.

#### Ausblick.

Die Grenzwerte der Zugförderung sind gegeben einer-seits durch besonders raschfahrende Schnellzüge, anderseits durch besonders (drei- bis viermal so) schwere Güterzüge über ein gegebenes Streckenprofil. Diese Verkehrsaufgaben werden bei Dampflokomotiven bis heute, und bis vor kurzem auch bei Elektrolokomotive in der Art gelöst, dass die die Lokomotivleistung bestimmenden Faktoren Zugkraft und Geschwindigkeit stets so zerlegt wurden, dass hohe Zugkräfte eine geringe Geschwindigkeit (Güter- bzw. Gebirgszuglokomotive mit 50 bis 70 km/h Höchstgeschwin-

digkeit), hohe Geschwindigkeiten eine geringe Zugkraft (Schnellzuglokomotive mit 100 bis 120 km/h Höchstgeschwin-digkeit) bedingten. In der letzten Zeit herrscht nun allseits das Streben nach elektrischen Universallokomotiven vor, die sowohl im Güter- wie auch im Personen- und Schnell-zugdienst Verwendung finden können. Diese Forderung ist umso leichter zu erfüllen, je weniger die Höchst- bzw. Nenngeschwindigkeit (Rampendienst) in den einzelnen Zug-gattungen voneinander abweichen. Die vorliegenden Aus-führungen haben gezeigt, dass eine niedrige Rampen-geschwindigkeit insbesondere im Güterzugdienst mit Rück-sicht auf das Reibungsgesetz zwischen Rad und Schiene beim elektrischen Betrieb sogar ungünstig ist, zumal man bei den heutigen durchschnittlichen Achsdrücken von 20 t in der Lage ist, verhältnismässig einfache und dabei doch äusserst leistungsfähige elektrische Lokomotiven zu bauen. Berücksichtigt man ferner noch, dass der heutige rasch-laufende kleine Elektromotor einen guten Wirkungsgrad über einen grossen Last- und Geschwindigkeitsbereich, beim Einphasenmotor auch einen guten Leistungsfaktor besitzt, so arbeitet die Lokomotive auch dann noch wirt-schaftlich, wenn sie nicht ganz voll ausgelastet ist. In Zukunft ist daher die Höchstgeschwindigkeit der elektrischen Güterzuglokomotive nicht wie bisher mit 50 bis 65 km/h, sondern mit 80 bis 100 km/h festzusetzen bei ungefähr 50 km/h Nenngeschwindigkeit, wobei diese auch die Rei-bungsgeschwindigkeit sein muss. Die Höchstgeschwindigkeit der Schnellzuglokomotive ist heute durch die Signalanlagen beschränkt, sie liegt gegenwärtig nur in günstigen Einzel-fällen über 120 km/h.

Künftighin wird man bei elektrischen Lokomotiven drei Klassen zu unterscheiden haben: 1. Lokomotiven mit völliger Ausnützung ihres Reibungsgewichtes und des Zug-hakens (eine, bei Wechselstrom mehrere Reibungsgeschwin-digkeiten). 2. Lokomotiven mit völliger Ausnützung ihres Reibungsgewichtes. 3. Lokomotiven, deren Leistungen unter den Reibungsleistungen liegen und zufolge der Eigenheit der Leistungscharakteristik im ganzen Geschwin-digkeitsbereich im Beharrungszustand keine Reibungs-geschwindigkeit besitzen.

### Turnhallenanlage auf dem Emmersberg in Schaffhausen.

Von SCHERRER & MEYER, Architekten, Schaffhausen.

Das ursprüngliche Bauvorhaben der Stadtgemeinde unter der Bezeichnung „Doppeltturnhallen“ (vgl. den Wett-bewerbsbericht in Bd. 95, S. 216\*) hat sich im Laufe der Planbearbeitung und während der Vorbereitung der Bau-ausführung erweitert zu einer Gesamtanlage von drei Turn-hallen und einer geräumigen vierten Halle für Nationalturnen. Die dritte Halle trat an Stelle der im Wettbewerbprogramm vorgesehenen drei Handfertigkeitswerkstätten, eine Mass-nahme, die sich zum Vorteil einer reinen Turnhallenanlage ergeben hat, deren Räume den weitgehenden Forderungen der Benützung durch Schulen und Vereine gerade noch genügen können.

Der schlichte, elegante Flachdachbau in Eisenkon-struktion, dessen innere Zweckmässigkeit schon durch die äussere Gliederung schön zum Ausdruck kommt, schliesst die grüne Rasenfläche des Spiel- und Turnplatzes gegen die bestehenden, im Westen liegenden Schulhäuser ab. Der Hallenbau nimmt dabei den grossen Höhenunterschied zwischen Schulplatz und Turnplatz in natürlicher Weise auf.

Ueber die breite Vortreppe (Abb. 2) gelangt man durch den Windfang in die innere Verbindungshalle im Erd-geschoss; von hier aus gehen die Zugänge zum Spielplatz, zu den beiden Hauptturnhallen 1 und 2, zu Unter- und Obergeschoss (Abb. 6 bis 8). Im südlichen Flügel liegt die dritte Turnhalle,  $\frac{3}{4}$  ihrer Bodenfläche mit Klötzli belegt,  $\frac{1}{4}$  als Weichboden abgetrennt. Sie dient in der Haupt-sache einerseits für die untern Schulklassen zum Turnen in normalen Schuhen und anderseits für die Ausübung ver-schiedener Sportarten. Ueber dem Weichboden ist ein

<sup>12)</sup> Glasers Annalen 1927, Bd. 101, S. 170.

<sup>13)</sup> El. Bahnen 1933, S. 136. — <sup>14)</sup> E. T. Z. 1932, S. 281.