

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 11 (1920)
Heft: 11

Artikel: Die Methoden zur Untersuchung der Korrosionsverhältnisse bei elektrischen Bahnen, allgemeine Ergebnisse solcher bei schweizerischen Strassenbahnen und die Mittel zur Verbesserung. Zweiter Bericht [Fortsetzung und Schluss]
Autor: Zangger, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1056305>

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: 15.01.2026

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Erscheint monatlich mit den Jahres-Beilagen „Statistik der Starkstromanlagen der Schweiz“ sowie „Jahresheft“ und wird unter Mitwirkung einer vom Vorstand des S. E. V. ernannten Redaktionskommission herausgegeben.

Alle den Inhalt des „Bulletin“ betreffenden Zuschriften sind zu richten an das

Generalsekretariat

des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins,
Neumühlequai 12, Zürich 1 - Telefon: Hottingen 37.08

Alle Zuschriften betreffend Abonnement, Expedition und Inserate sind zu richten an den Verlag:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.,
Stauffacherquai 36 Zürich 4 Telefon Selnau 7016

Publié sous la direction d'une Commission de Rédaction nommée par le Comité de l'A. S. E.

Ce bulletin paraît mensuellement et comporte comme annexes annuelles la „Statistique des installations électriques à fort courant de la Suisse“, ainsi que l'„Annuaire“.

Prière d'adresser toutes les communications concernant la matière du „Bulletin“ au

Secrétariat général

de l'Association Suisse des Electriciens
Neumühlequai 12, Zurich 1 - Telefon: Hottingen 37.08

Toutes les correspondances concernant les abonnements, l'expédition et les annonces, doivent être adressées à l'éditeur:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A.
Stauffacherquai 36 Zurich 4 Téléphone Selnau 7016

Abonnementspreis
für Nichtmitglieder inklusive Jahresheft:
Schweiz Fr. 15.—, Ausland Fr. 25.—.
Einzelne Nummern vom Verlage Fr. 1.50 plus Porto.

Prix de l'abonnement annuel (gratuit pour les membres de l'A. S. E.), y compris l'Annuaire Fr. 15.—
pour la Suisse, Fr. 25.— pour l'étranger.
L'éditeur fournit des numéros isolés à Fr. 1.50, port en plus.

XI. Jahrgang
XI^e Année

Bulletin No. 11

November 1920
Novembre 1920

Die Methoden zur Untersuchung der Korrosionsverhältnisse bei elektrischen Bahnen, allgemeine Ergebnisse solcher bei schweizerischen Strassenbahnen und die Mittel zur Verbesserung.

Zweiter Bericht

an die gemeinsame Kommission des Schweizerischen Gas- und Wasserfachmänner-Vereins, des Verbandes Schweizerischer Sekundärbahnen und des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins über die Frage der Korrosion.

Erstattet durch das Generalsekretariat des S. E. V.
bearbeitet von Ingenieur H. Zangger.

(Fortsetzung und Schluss.)

III. Die Berechnungen und der Vergleich ihrer Ergebnisse mit den Messungsergebnissen

1. Allgemeine Annahmen und Unterlagen für die Berechnungen.

Berechnungen sind bei Korrosions-Untersuchungen überall da unerlässlich, wo Messungen unmöglich oder nur unvollständig durchführbar sind, dann aber auch als Kontrolle von Messungen. Messungen und Berechnungen sollten in allen Fällen Hand in Hand gehen und sich womöglich gegenseitig ergänzen.

Bei allen hier zunächst folgenden Berechnungen von Schienenströmen und Potentialen wird der Erdstrom (also auch der Rohrstrom) gleich Null angenommen. Die auf diese Weise berechneten Schienenpotentialdifferenzen werden also eher zu hoch ausfallen. Wir machen ferner die Annahme, dass der Betriebsstrom eines Wagens auf der ganzen Teilstrecke konstant ist, dass also alle Wagen die Teilstrecke ohne Aufenthalt und mit konstanter Geschwindigkeit und Zugkraft durchfahren. Den mittleren Strom eines Wagens bestimmen wir dabei in der Weise, dass wir den gesamten Teilstreckenstrom (über dessen Bestimmung werden wir im folgenden Abschnitt einige Angaben machen) durch die Anzahl der im Normalbetriebe auf der Strecke befindlichen Wagen dividieren. Diese Annahmen entsprechen allerdings den tatsächlichen Verhältnissen nicht; es lässt sich aber mit ihrer Hilfe doch ein Einblick in die oft recht komplizierten Verhältnisse der Schienenspeiseanlage von Strassenbahnen tun, und die erhaltenen Resultate geben die Unterlagen für die Berech-

nung der vorzunehmenden Verbesserungen. In den weitaus meisten Fällen genügen die nach diesen Annahmen erhaltenen Ergebnisse vollständig. Wo notwendig, werden den tatsächlichen Verhältnissen besser Rechnung tragende Annahmen gemacht werden; immer muss man sich aber bewusst bleiben, dass eine scheinbar hohe Genauigkeit schon durch verhältnismässig kleine Fahrplanänderungen illusorisch gemacht werden kann.

Als Unterlagen für diese Berechnungen dienen Pläne des Geleisenetzes und die Angaben über die Zahl der parallelen Geleise, Art und Lage der verwendeten Schienen und Schienenverbinder und die Lage der Schienenspeisepunkte. Es ist ferner die Kenntnis des Geleisewiderstandes pro Längeneinheit und für die verschiedenen Schienenprofile notwendig, sowie des Widerstandes der einzelnen Schienenspeisekabel und allfällig eingebauten Zusatzwiderständen, endlich der Fahrplan und der Wert des mittleren Stromes der einzelnen Fahrdrachtspeisegebiete.

2. Die Berechnung der Schienenströme.

Der auf einer Teilstrecke an die Schienen abgegebene mittlere Strom ist gleich dem mittleren Strom der die Teilstrecke speisenden Fahrdrachtleitung. Der letztere wird am besten nach einer der auf Seite 272 für die Schienenspeisekabel angegebenen Methoden durch Messung bestimmt. Am einen Ende von „freitragenden“ Strecken¹⁾ ist der mittlere Schienenstrom gleich dem mittleren Strom in der Fahrdrachtspeiseleitung. Wo Speisegebiet und Teilstrecken nicht zusammenfallen, hilft man sich, indem man den aus anderen Speisegebieten für ähnliche Steigungsverhältnisse ermittelbaren spezifischen Energieverbrauch pro Wagen- oder Tonnenkilometer annimmt und den Strom an Hand des Fahrplanes berechnet. Sind dann die Widerstände des Geleises aller Teilstrecken, wie auch die auf denselben abgegebenen Stromstärken bekannt, so kann die Berechnung der Stromverteilung nach den Kirchhoff'schen Gesetzen durchgeführt werden, nimmt aber bei stark verzweigten Schienennetzen viel Zeit in Anspruch. Oft führt ein graphisches Verfahren oder ein systematisches Probieren rascher zum Ziel, als die algebraische Behandlung.

3. Die Berechnung der Potentiale im Schienennetz.

Betrachten wir den in Fig. 20 dargestellten allgemeinen Belastungsfall einer Teilstrecke, bei welchem am einen Ende der Strom J_1 in dieselbe eintritt, auf derselben der Strom J_t abgegeben wird und infolgedessen am anderen Ende der Strom $J_2 = J_1 + J_t$ die Teilstrecke verlässt. Nehmen wir noch an, dass der Strom J_t auf der ganzen Länge der Teilstrecke gleichmässig abgegeben wird, so berechnet sich der Spannungsabfall im Geleise $V - V_1$ ganz allgemein zu:

$$V - V_1 = r_g J_1 l + r_g \frac{(J_2 - J_1) l^2}{2 L} \quad (10)$$

und die Spannungsdifferenz zwischen den Endpunkten der Teilstrecke:

$$V_2 - V_1 = r_g L \frac{J_2 + J_1}{2} \quad (10a)$$

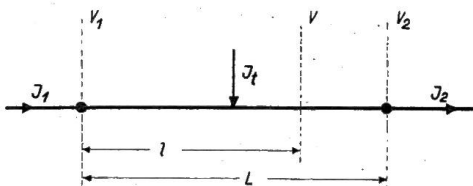


Fig. 20.

Ist also die Stromverteilung im Geleisenetz bekannt, so können die Schienenpotentiale im ganzen Netz nach den Formeln (10) und (10a) berechnet werden. Es könnte dabei ganz willkürlich irgend einem Punkte das Potential Null gegeben werden; um jedoch einen leichten und übersichtlichen Vergleich mit dem Plane der Spannungsmessungen zwischen Schiene und Rohr

¹⁾ Als „freitragende“ Strecke bezeichnen wir z. B. den im ersten Korrosionsbericht, Bulletin 1918, Seite 139, Sonderabdruck Seite 5, Fig. 3, dargestellten Fall.

zu ermöglichen, ist es zweckmässig, die durch die Messungen bestimmte neutrale Zone als Null-Potential für den aufzustellenden Plan zu wählen. Da sich selbstverständlich sowohl bei der Messung, wie bei der Berechnung dieselbe Lage der neutralen Zone ergeben soll, hat man schon beim Aufzeichnen eine Kontrolle über die Genauigkeit der Rechnung.

Die Annahme, welche der Formel 10 zu Grunde liegt, dass die Stromverteilung auf einer Strecke eine ganz gleichmässige sei, trifft in Wirklichkeit nicht zu, sondern die Stromabgabe an die Schienen ist auf einen oder mehrere, beständig wandernde Punkte beschränkt. Die Potentialverteilung ist also nicht nur eine Funktion des Ortes, sondern auch eine solche der Zeit. Um einen Einblick in die Potentialverteilung zu bekommen, die sich bei auf einzelne Punkte konzentrierter Belastung der Schienen ergeben, wollen wir den einfachen Fall, in welchem eine freitragende Strecke mit einem oder mehreren Wagen befahren wird, betrachten. Wir machen dabei die Annahme, dass der Strom eines Wagens konstant sei, und dass alle Wagen die Teilstrecke mit konstanter Geschwindigkeit und im gleichen Abstände voneinander im Pendelbetriebe durchfahren. Zur Berechnung der damit eintretenden Verhältnisse bedienen wir uns der Uebersichtlichkeit und Einfachheit halber der graphischen Methode, wie sie beispielsweise von Herzog und Feldmann¹⁾ beschrieben worden ist. Wir beziehen dabei das Potential auf den einen Endpunkt der Teilstrecke als Nullpunkt und bezeichnen die Länge der Teilstrecke mit L und die Zeit, die ein Wagen braucht, um dieselbe in einer Richtung zu befahren mit T .

Befährt nur ein Wagen die Teilstrecke, so ergeben sich die in Fig. 21 dargestellten Potentiale in Funktion des Ortes und der Zeit. Betrachten wir beispielsweise das Potential V eines beliebigen Punktes im Abstände l vom Anfangspunkte der Teilstrecke, so steigt dasselbe linear mit der Zeit vom Potentiale Null, wenn sich der Wagen im Anfangspunkte der Teilstrecke befindet, bis zum Potentiale V_l , wenn der Wagen am betrachteten Punkte vorbeifährt und bleibt, währenddem der Wagen zum anderen Endpunkte der Strecke und wieder zurück zum betrachteten Punkte fährt, auf diesem Potentiale V_l , um nachher wieder linear bis zu Null abzunehmen, letzteren Wert erreichend, wenn der Wagen wieder am Anfangspunkt ist. Der Potentialmittelwert V_{lm} wird dabei gleich:

$$V_{lm} = J r_g l \left(1 - \frac{l}{2L} \right) \quad (11)$$

und die maximale Potentialvariation mit der Zeit ΔV_{lmax} wird gleich (für l gleich L):

$$\Delta V_{lmax} = J r_g L$$

speziell für den Endpunkt der Strecke, wo l gleich L ist, haben wir:

$$V_{Lm} = \frac{J r_g L}{2}$$

Es bedeuten dabei: J den Strom eines Wagens, r_g den Geleisewiderstand pro Längeneinheit, L die Länge der Teilstrecke.

Befahren zwei Wagen die Teilstrecke, und nehmen wir als Ausgangsstellung für beide Wagen die beiden Endpunkte an, so ergeben sich die in Fig. 22 dargestellten Verhältnisse. In analoger Weise können wir hier folgende Beziehungen aufstellen: Es sind der Potentialmittelwert V_{lm} und die maximale Potentialvariation mit der Zeit ΔV_{lmax} , welche letztere wie aus Fig. 22 ersichtlich für $l = \frac{L}{2}$ eintritt:

$$V_{lm} = 2 J r_g l \left(1 - \frac{l}{2L} \right); \quad \Delta V_{lmax} = J r_g \frac{L}{2}$$

¹⁾ Die Berechnung elektrischer Leitungsnetze, II. Auflage, 1. Band, Seite 288 u. ff.

Schienen-Potentiale in Funktion des Ortes und der Zeit, wenn 1, 2, 3, bzw. ∞ viele Wagen eine Teilstrecke im Pendelbetrieb befahren.

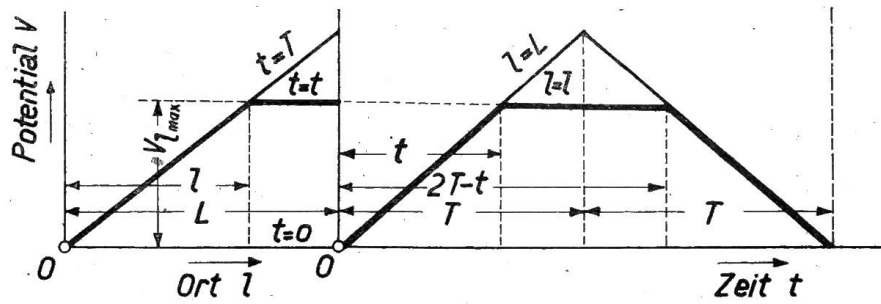


Fig. 21.

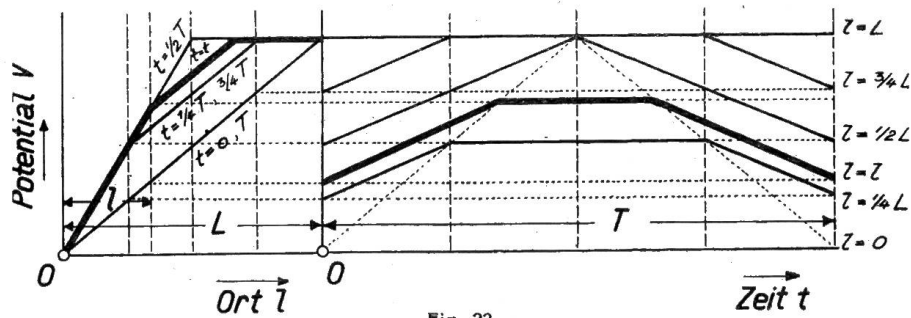


Fig. 22.

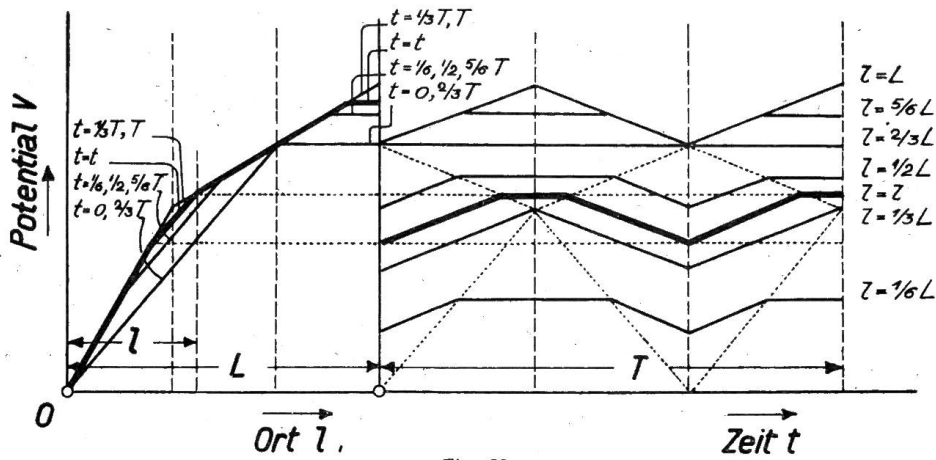


Fig. 23.

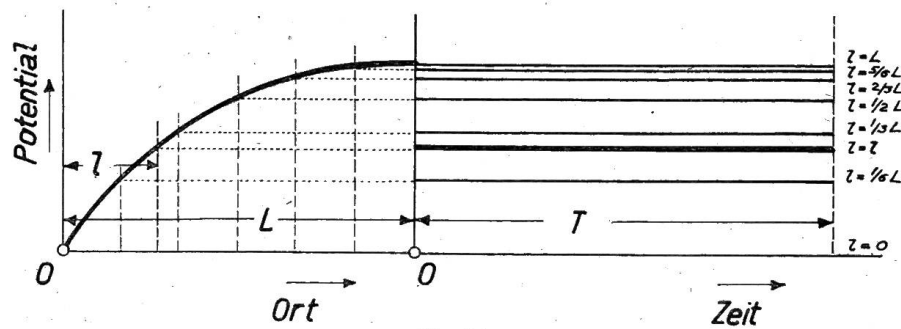


Fig. 24.

oder wenn wir den total auf der Teilstrecke abgegebenen Strom mit J_t bezeichnen:

$$V_{lm} = J_t r_g I \left(1 - \frac{I}{2L}\right); \quad \Delta V_{lmax} = J_t r_g \frac{L}{4} \quad (12)$$

Speziell für I gleich L haben wir:

$$V_{Lm} = J_t r_g \frac{L}{2} \quad \text{und} \quad \Delta V_L = 0$$

Ähnliche Ergebnisse erhalten wir, wenn drei Wagen die Teilstrecke befahren; dieselben sind der Fig. 23 und den Formeln 13 zu entnehmen wobei wir wiederum die Voraussetzung machen, dass sich ein Wagen zu Beginn der Zeitzählung im Anfangspunkte der Teilstrecke befindet. Es ist:

$$V_{lm} = 3 J r_g I \left(1 - \frac{I}{2L}\right); \quad \Delta V_{lmax} = J r_g \frac{L}{3} \quad \text{für } I = \frac{L}{3} \quad \text{und } I = L$$

oder wenn wir auch hier den totalen Strom der Teilstrecke J_t einführen:

$$V_{lm} = J_t r_g I \left(1 - \frac{I}{2L}\right); \quad \Delta V_{lmax} = J_t r_g \frac{L}{9} \quad (13)$$

Für I gleich L erhalten wir:

$$V_{Lm} = J_t r_g \frac{L}{2} \quad \text{und} \quad \Delta V_{Lmax} = J_t r_g \frac{L}{9}$$

Diese wenigen Beispiele genügen schon, um deutlich zu zeigen, dass der Potentialmittelwert, wenn wir den totalen auf der Teilstrecke abgegebenen Strom einführen, ganz unabhängig von der Wagenzahl ist. Die Schwankungen des Potentials um diesen Mittelwert sind dagegen umso kleiner, je mehr Wagen die Strecke befahren; die Maximalwerte dieser Schwankungen nehmen umgekehrt proportional mit dem Quadrate der Wagenzahl ab. Ganz allgemein können wir also, wenn n Wagen eine Teilstrecke befahren, schreiben:

$$V_{lm} = J_t r_g I \left(1 - \frac{I}{2L}\right) \quad \text{und} \quad \Delta V_{lmax} = J_t r_g \frac{L}{n^2} \quad (14)$$

dabei treten die Maximalwerte jeweilen an den Orten

$$I = \frac{L}{n}, \quad \frac{3L}{n}, \quad \frac{5L}{n}, \quad \dots$$

auf und haben sämtlich dieselben Amplituden. Speziell für $I = L$ d. h. für das Ende der Teilstrecke können wir schreiben:

$$V_{Lm} = J_t r_g \frac{L}{2} \quad \text{und} \quad \Delta V_{Lmax} = 0 \quad \text{oder} \quad J_t r_g \frac{L}{n^2}$$

je nachdem n eine gerade oder ungerade Zahl ist.

Wählen wir $n = \infty$, d. h. gehen wir zur vollständig gleichmässigen Belastung der Teilstrecke über, so erhalten wir graphisch dargestellt das in Fig. 24 abgebildete Resultat. Die Spannungen sind in diesem Falle nur noch eine Funktion des Ortes und von der Zeit unabhängig. Als mathematischer Ausdruck für die Spannung V_l (von einem zeitlichen Mittelwert brauchen wir nicht mehr zu reden) gilt Formel 14, welche die Gleichung der in Fig. 24 dargestellten Parabel ist. ΔV_l wird in diesem Falle immer Null.

Diese Ueberlegungen zeigen, dass die Annahme einer vollständig gleichmässigen Belastung einer Teilstrecke bei der Berechnung von Spannungsmittelwerten durchaus

zulässig ist. Wir können also *zeitlich mittlere* Spannungsabfälle sehr wohl nach den einfachen Formeln 10 bzw. 10a berechnen.

4. Die Grössenordnung von Erdströmen.

Betrachten wir den einfachen Fall, dass die Schienen einer unverzweigten Aussenstrecke durch den Strom von Strassenbahnwagen gleichmässig belastet werden, dass der negative Maschinenpol an die Schienen angeschlossen sei und dass der Strom J aller Wagen der betrachteten Strecke an einem Ende derselben durch ein Rückleitungskabel der negativen Sammelschiene wieder zugeführt werde. Wir machen ausserdem noch die Annahme, dass der in die Erde übergetretene Strom J_e bis zum Rückleitungskabelanschluss ganz den Schienen wieder zuflüsse, und nehmen weiter an, dass der Erdstrom im Verhältnis zum Schienenstrom vernachlässigbar klein sei.

(Diese letztere Annahme entspricht allerdings gerade bei langen Aussenlinien nicht den tatsächlichen Verhältnissen, indem bei solchen Linien der Erdstrom 20 und mehr Prozent des Schienenstroms betragen kann. Man erhält bei Berücksichtigung dieses Umstandes für das Schienenpotential anstatt einer Gleichung für eine Parabel, eine solche für die Kettenlinie; da man aber aus anderen Gründen, auf die wir noch zurückkommen werden, den Erdstrom sowieso nicht an Hand von Formeln vorausberechnen kann, und es uns in den folgenden Darlegungen nur auf die prinzipielle Beurteilung des Einflusses verschiedener Faktoren auf die Grösse des Erdstromes ankommt, die an Hand der oben gemachten Annahmen einfacher und klarer zum Ausdruck gebracht werden können, verzichten wir hier auf die Wiedergabe einer genaueren Rechnungsweise.¹⁾)

Unter den getroffenen Annahmen können wir für die Spannungsdifferenz V'_l zwischen dem Kabelanschlusspunkt und einem beliebigen in der Entfernung l von diesem befindlichen Punkte, wie schon in unserem ersten Bericht²⁾ gezeigt ist, schreiben:

$$V'_l = \frac{J}{L} r_g \left(lL - \frac{l^2}{2} \right)$$

Die Spannung V_l zwischen einem beliebigen Schienenpunkte und der neutralen Zone N lässt sich dann schreiben (Fig. 25):

$$V_l = \frac{J r_g}{2L} \left(2lL - l^2 - \frac{2}{3} L^2 \right)$$

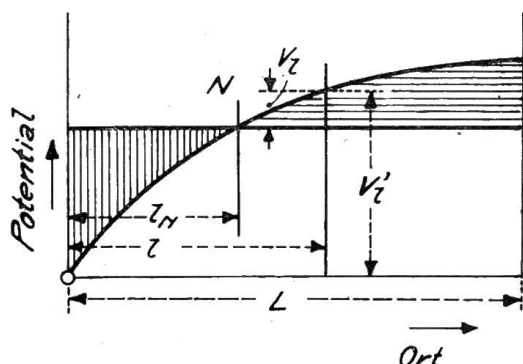


Fig. 25.

Führen wir den mittleren Strom J_n pro Wagen ein und bezeichnen wir mit n die Wagenzahl pro km, so ist nJ_n der auf einen km Teilstreckenlänge an die Schienen abgegebene mittlere Strom und wir können für J setzen $J = nJ_n L$, V_l schreibt sich dann:

$$V_l = \frac{nJ_n r_g}{2} \left(2lL - l^2 - \frac{2}{3} L^2 \right) \quad (15)$$

Bezeichnen wir den totalen Uebergangs- und Erdwiderstand pro Längeneinheit mit r_e , so können wir für den pro Längeneinheit in die Erde, bzw. aus ihr austretenden Strom i_{el} schreiben:

$$i_{el} = \frac{nJ_n}{2} \frac{r_g}{r_e} \left(2lL - l^2 - \frac{2}{3} L^2 \right)$$

¹⁾ Anhaltspunkte für eine solche finden sich in der E. T. Z. 1895, Seite 117 ff.

²⁾ I. Bericht der Korrosionskommission, Bulletin 1918, Seite 144, Sonderabdruck Seite 10.

im Abstände l vom Schienenrückleitungspunkt ist dann der totale Erdstrom J_{el}

$$J_{el} = \int_0^l i_{el} dl$$

$$J_{el} = \frac{n J_n}{2} \frac{r_g}{r_e} \left(L l^2 - \frac{l^3}{3} - \frac{2}{3} L^2 l \right) \quad (16)$$

Der maximale Erdstrom $J_{e \max}$ tritt in der neutralen Zone N auf, wo $V_l = 0$ ist. Formel (15) liefert uns den Abstand l_N der neutralen Zone vom Kabelanschlusspunkt zu:

$$l_N = L \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}} \right) = 0,423 L$$

setzen wir diesen Wert in Gleichung (16) ein, so erhalten wir für J_{el} das örtliche Maximum $J_{e \max}$:

$$J_{e \max} = - \frac{1}{9\sqrt{3}} \frac{r_g}{r_e} n J_n L^3 \quad (17)$$

Wir können $J_{e \max}$ auch in Funktion von $v_{s \max}$, dem maximalen Spannungsabfall in den Schienen pro Längeneinheit, schreiben. Es ist nämlich: $v_{s \max} = n J_n r_g L$. Dieser Wert, in Formel (17) eingesetzt, ergibt:

$$J_{e \max} = - \frac{1}{9\sqrt{3}} \frac{1}{r_e} v_{s \max} L^2 \quad (18)$$

Ebenso können wir den maximalen Erdstrom $J_{e \max}$ in Funktion der maximalen Spannungsdifferenz V_{\max} zwischen den Schienen und der neutralen Zone (siehe Fig. 25) ausdrücken. Dieselbe tritt für $l = 0$ auf und berechnet sich aus Gleichung (15) zu:

$$V_{\max} = - \frac{n J_n r_g L^2}{3}. \quad \text{Dieser Wert in Formel (17) eingesetzt ergibt für } J_{e \max}:$$

$$J_{e \max} = - \frac{1}{3\sqrt{3}} \frac{1}{r_e} V_{\max} L \quad (19)$$

Um einen Begriff von der Grössenordnung des Erdstromes zu erhalten, kann man für in der Schweiz gebräuchliche Schienenverlegungsarten und Profile setzen:

$$\frac{r_g}{r_e} = 0,1 \div 0,06 \text{ bei eingleisig verlegten leichten Rillenschienen,}$$

$$= 0,05 \div 0,04 \text{ bei zweigleisig verlegten Rillenschienen,}$$

$$= 0,025 \div 0,02 \text{ bei eingleisig verlegten Vignolschienen auf eigenem Bahnkörper.}$$

Das Produkt $n J_n$ hängt von der Dichte des Verkehrs, dem Wagengewicht, den Steigungs- und Reibungsverhältnissen der Bahn ab. Diese Zahl kann bei gegebenen Verhältnissen nach bekannten Formeln berechnet, oder genauer an Hand von Messungen an den Fahrdrachtspeisekabeln bestimmt werden. Für die Verhältnisse schweizerischer Stadt-Strassenbahnen wird sie sich im allgemeinen zwischen $(5 \div) 10 \div 15$ A/km bei schwachem Betrieb, wie er im allgemeinen auf Vorortslinien herrscht und ca. $30 \div 80$ A/km für stärker befahrene städtische Netzteile mit extremen Werten bis zu ca. 120 A/km bewegen.

Die Formel (17) zeigt, dass der maximale Erdstrom mit der dritten Potenz der Streckenlänge wächst, und ausserdem der Betriebsintensität $n J_n$ und dem Verhältnis $\frac{r_g}{r_e}$ des Geleisewiderstandes zum Erd- und Erdübergangswiderstande direkt proportional ist. Die Betriebsintensität ist gewöhnlich als durch die Verhältnisse gegeben zu betrachten, dagegen kann durch Verringerung des Geleisewiderstandes und Vergrösserung des Erdübergangswiderstandes

(durch Wahl geeigneter Schienenprofile und Schienenverbindungsarten wie auch Schienenverlegungsarten und Bettungen) der Erdstrom verringert werden. Das wichtigste und wirksamste Mittel bleibt aber die Verkleinerung der Streckenlänge L durch Wahl nicht zu weit voneinander entfernten Schienenspeisepunkte. Da uns aber Vorschriften betr. den zulässigen Abstand von Schienenspeisepunkten wegen der anderen zu berücksichtigenden Faktoren unzweckmässig erscheinen, dagegen einfache Bestimmungen über maximal zulässige Spannungsdifferenzen V_{max} im Schienennetz und maximal zulässige spezifische Schienenspannungsabfälle $V_{s,max}$ leicht und weit einfacher getroffen werden können und zum Teil auch schon im Auslande getroffen wurden, zeigen wir in den Formeln (18) und (19) den Zusammenhang zwischen diesen Werten und dem maximalen Erdstrom.

Als Streckenlänge L kann in obigen Formeln nur dann die Länge der Teilstrecke eingesetzt werden, wenn die auf Seite 287 angeführten Annahmen erfüllt sind, insbesondere wenn die in den äusseren Strecken einer Linie in die Erde übergetretenen Ströme bis zum Kabelanschlusspunkt in die Schienen wieder übergetreten sind. Diese Bedingung ist wohl bei einer einzelnen Linie (ohne weiteres Netz), die an ihrem einen Ende einen Kabelanschluss aufweist, erfüllt, im allgemeinen Fall aber, wenn diese Linie an ein verzweigtes Schienennetz angeschlossen ist, nicht. Im letzteren Falle wird vielmehr die Aussenlinie, vielleicht auf ihrer ganzen Länge, das Einzugsgebiet von Erdströmen sein, die erst im verzweigten Netz zum Austritt gelangen. Betrachten wir andererseits zwei Kabelanschlusspunkte in einem verzweigten Schienennetze mit längeren Aussenlinien und nehmen wir wiederum an, dass der negative Maschinenpol an die Schienen angeschlossen sei, so wird oft der Fall eintreten, dass das gesamte Gebiet zwischen den zwei Kabelanschlusspunkten, auch wenn diese auf gleichem Potentiale gehalten werden, im Austrittsgebiet von Erdströmen liegt, deren Einzugsgebiet sich längs der langen Aussenlinien befindet. Auch in diesem Falle können die Formeln für den Erdstrom nicht ohne weiteres angewendet werden.

Diese zwei Beispiele genügen wohl schon, um zu zeigen, dass eine Vorausberechnung des Erdstromes äusserst unzuverlässig ist. Wir können denn auch die Formeln 15÷19 nur dazu verwenden, die zu erwartenden Aenderungen in der Grösse und Verteilung des Erdstromes bei Verlegung der Kabelanschlusspunkte an den Schienen und Aenderung des Fahrplanes oder der Geleiseanlage überblicken zu können.

IV. Beurteilung bestehender Verhältnisse in Bezug auf Korrosionsgefahr; zulässige Spannungen und Spannungsabfälle.

Zur Beurteilung der Korrosionsverhältnisse eines bestimmten Bahnnetzes dienen die Messungen und Berechnungen im Rückleitungsnetze. Es ist sehr schwierig, wenn überhaupt möglich, ganz *allgemein* festzulegen, welche Spannungen und Spannungsabfälle im Schienen- und Rohrnetz zulässig sind. Die Gefährdung der Rohrleitungen hängt eben nicht nur von der Grösse dieser Spannungen oder Ströme ab, sondern auch sehr von lokalen Verhältnissen, wie Lage der Rohre, Bodenbeschaffenheit und Bodenfeuchtigkeit, ebenso vom Strassenunterhalt, der Schienenbettung und anderen kaum, oder gar nicht in Zahlen auszudrückenden Faktoren ab. Im folgenden beschränken wir uns daher im Wesentlichen auf Angabe dieser verschiedenen Einflüsse, und wo wir Zahlenwerte nennen können, sind es in der Regel Grenzwerte.

1. Spannung zwischen Rohr und Schiene.

Spannungsmittelwerte von 2 und mehr Volt im Austrittsgebiet zwischen Rohr und Schiene gefährden die Rohre ¹⁾ im allgemeinen und sollten vermieden werden. Damit soll nicht etwa gesagt sein, dass darunter liegende Spannungen für die Rohre gefahrlos seien. Es können schon bedeutend geringere Spannungen bei ungünstigen Bodenverhältnissen, oder wenn die Rohre in unmittelbarer Nähe der Schienen liegen, dieselben gefährden. So hat beispielsweise Besig Rohrschäden konstatiert bei mittleren Spannungsdifferenzen von 0,9 und 1,0 Volt ²⁾; andererseits sind aber in einer ganz im Korrosionsgebiete liegenden Strasse

¹⁾ Siehe auch E. T. Z. 1902, Seite 68 u. ff.

²⁾ Siehe I. Bericht der Korrosionskommission, Bulletin 1918, Seite 162, Bulletin 1920, Seite 284.

einer grösseren Stadt, in welcher sich 4 Rohrleitungen von 100, 350, 150 und 600 mm lichte Durchmesser in Abständen von 0,8, 1,6, 2,1 und 3,9 Meter von der nächstgelegenen Schiene befinden und wo wir Spannungsmittelwerte zwischen +1,0 und +1,4 Volt zwischen den Rohren und Schienen gemessen haben, seit 15 Jahren keine Korrosionsschäden konstatiert worden. Dasselbe gilt auch für einen Platz in derselben Stadt, wo Spannungen von +1,3 Volt zwischen Rohren und Schienen die ersteren nicht gefährdet haben. Unter sonst gleichen Umständen sind, wie wir schon in unserem ersten Bericht ¹⁾ dargelegt haben, Bleirohre, also auch Bleimäntel von elektrischen Kabeln stärker als gusseiserne oder schmiedeiserne Rohre gefährdet. Das zeigen auch deutlich für einen speziellen Fall die oben zitierten Messungen Besigs in Genf.

Grössere Spannungen im Einzugsgebiet gefährden die Rohrleitungen *indirekt*, indem der totale Rohrstrom durch sie vergrössert wird. Der Erdstrom J_e lässt sich schreiben:

$$J_e = 1/r_e \int_0^l V_l dl \quad (20)$$

Er ist also bei pro Längeneinheit gleichbleibendem Widerstand zwischen Schiene und Rohr vom Produkte $V_l l$ abhängig. Bei Bahnen mit langen Aussenlinien wird dieses Produkt für diese Linien oft gross, und mit ihm auch der Erdstrom. Das gilt im Wesentlichen, unabhängig davon, ob parallel zu den Linien Rohrleitungen verlegt sind oder nicht. (Sind Rohrleitungen vorhanden, so wird durch sie allerdings das r_e etwas herabgesetzt und der Erdstrom etwas grösser; doch ist der Einfluss von Rohrleitungen auf den totalen Erdstrom im allgemeinen kein sehr bedeutender, da der Hauptteil des Widerstandes auf die Schienenbettung entfällt.) Grössere Spannungsdifferenzen im Einzugsgebiet, die nur auf verhältnismässig kurzen Strecken auftreten, vermehren also die Rohrgefährdung nur wenig, währenddem umgekehrt dieselben Spannungen im Austrittsgebiet die Rohre stark gefährden können. Der durch die im Einzugsgebiet herrschenden Verhältnisse bereits gegebene totale Erdstrom *muss* im Austrittsgebiet zum Austritt gelangen. Wesentlich ist daher für gutet Verhältnisse, dass *dieser Austritt auf ein möglichst grosses Gebiet möglichst gleichmässig verteilt werde*. Die Spannungsmessungen zwischen Rohr und Schiene orientieren sehr gut darüber, ob der Austritt des Stromes aus den Rohren gleichmässig, auf ein grösseres Gebiet verteilt, stattfindet oder nicht, und welche Gebiete eventuell besonders gefährdet sind.

Es ist zu empfehlen, die *örtlich maximale, zeitlich mittlere* Spannungsdifferenz V'_{max} zwischen Schiene und Rohr im Austrittsgebiet bezogen auf das Ganz-Tagesmittel auf 0,8 Volt zu beschränken. Die Gefährdung von unterirdisch verlegten Rohren und Kabeln ist aber nicht nur der Spannungsdifferenz zwischen Schiene und Rohr direkt proportional, sondern auch umgekehrt proportional der Zeit während welcher dieselbe wirkt. Beziehen wir nun die Spannungsdifferenz zwischen Schiene und Rohr auf den Normalbetrieb, als welchen wir den die längste Zeit des Tages herrschenden Betrieb bezeichnen, so können wir die mittlere örtlich maximale Spannung V_{max} zwischen Schiene und Rohr während dieses Betriebes wie folgt schreiben:

$$V_{max} = V'_{max} \frac{24}{T} \quad (T = \text{mittlere Betriebszeit in Stunden}) \quad (21)$$

wobei wir die mittlere Betriebszeit T als die Zeit definieren können, während welcher der Normalbetrieb in unveränderter Intensität aufrecht erhalten werden müsste, damit die im Fahrplan festgelegten täglichen Wagenstunden gefahren werden. Sie lässt sich also folgendermassen schreiben:

$$T = \frac{\text{täglich gefahrene Wagenstunden}}{\text{Anzahl der im Normalbetriebe in Dienst befindlichen Wagen}}$$

Als örtlich maximale Spannungsdifferenz V im Normalbetriebe im Austrittsgebiet der Erdströme empfehlen wir 1,6 V, entsprechend einer mittleren Betriebszeit T von 12 Stunden. Es ist also für die mittlere Betriebszeit T in Formel (21) im Minimum 12 Stunden ein-

¹⁾ I. Bericht der Korrosions-Kommission, Bulletin 1918, Seite 146, Bulletin 1920, Seite 12.

zusetzen, auch dann, wenn diese Zeit tatsächlich kleiner sein sollte. Für das *Einzugsgebiet der Erdströme* bringen wir keine Begrenzung der Spannung zwischen Schiene und Rohr in Vorschlag weil dort das Produkt aus Spannung und Linienlänge durch die Begrenzungen im Austrittsgebiet, wie weiter oben bereits ausgeführt, schon gegeben (und damit begrenzt) ist.

2. Die Spannungsabfälle im Schienennetz.

Die Spannungsabfälle im Schienennetz, die durch Messung¹⁾ oder Berechnung²⁾ ermittelt werden können, hängen vom verlegten Schienenprofile, vom Widerstand der Stossverbindungen und vom Schienenstrom ab. Da die Grösse des Erdstromes, wie aus Formel 18 hervorgeht, proportional mit dem Schienenspannungsabfall wächst, so muss dieser letztere allgemein begrenzt werden und sollte keinesfalls auch im inneren, verzweigten Schienennetz 2 Volt/km im Normalbetriebe überschreiten.³⁾ Für Aussenstrecken lassen die deutschen Vorschriften nur 1 Volt/km zu. Wir schlagen vor, den *örtlich maximalen, zeitlich mittleren Schienenspannungsabfall* v'_s , bezogen auf das Ganz-Tagesmittel, auf 1 Volt/km im ganzen Schienennetz zu beschränken.

Die Gefährdung von unterirdisch verlegten Rohren und Kabeln ist aber nicht nur dem Spannungsabfall in den Schienen direkt proportional, sondern auch noch umgekehrt proportional der Zeit, während welcher derselbe wirkt. Beziehen wir dabei den spez. Spannungsabfall auf den Normalbetrieb, als welchen wir den, die längste Zeit des Tages herrschenden Betrieb bezeichnen, so können wir den mittleren spezifischen Spannungsabfall während dieses Betriebes wie folgt schreiben:

$$v_s = v'_s \frac{24}{T} \quad (22)$$

Als maximalen spez. Spannungsabfall im Normalbetriebe schlagen wir 2 V/km vor, entsprechend einer mittleren Betriebszeit T von 12 Stunden. Es ist also für die mittlere Betriebszeit T in Formel (22) im Minimum 12 Stunden einzusetzen, auch dann, wenn diese Zeit tatsächlich kleiner ist. Es wäre also beispielsweise bei 16-stündiger mittlerer Betriebszeit nach Formel (22) der im Normalbetriebe zulässige maximale Spannungsabfall gleich 1,5 V/km.

Die deutschen Vorschriften lassen als maximale Widerstandserhöhung von Geleisestrecken durch die Schienenstösse maximal 20 ‰, und als maximalen Widerstand für einzelne Stösse einen solchen gleich dem Widerstande von 10 Meter Schiene zu. Denselben maximalen Stosswiderstand lassen auch die französischen Vorschriften⁴⁾ zu. Wie Messungen in verschiedenen Städten mit gutunterhaltenem Geleisenetz, bei welchem aber Stosswiderstände nicht nachgemessen werden, zeigen, ist diese Grenze zu hoch gewählt (siehe als Beispiel die Zusammenstellung von Stosswiderständen in Tabelle II dieses Berichtes.⁵⁾ Das bestätigen auch eingehende diesbezügliche Untersuchungen des Bureau of Standards in Washington.⁶⁾ Aus einer Umfrage des erwähnten Bureau auf welche im ganzen 41 Strassenbahnunternehmungen antworteten geht hervor, dass von diesen 9 Unternehmungen auf diese Frage nicht antworteten und 6 nur ganz rohe Untersuchungen vornahmen. Die übrigen 26 haben sämtlich den maximal zulässigen Stosswiderstand; wie aus der folgenden Tabelle, die wir der erwähnten Publikation⁷⁾ entnehmen, begrenzt. Wir setzen dabei den Stosswiderstand gemäss unserer auf Seite 10 des II. Korrosionsberichtes gegebenen Definition und im metrischen Masssystem ein und ziehen die Tabelle etwas zusammen.

¹⁾ Seite 255, Bulletin 1920.

²⁾ Seite 284, Bulletin 1920.

³⁾ Siehe auch Technologic paper No. 54, Seite 35, des Bureau of Standards.

⁴⁾ Arrêté du 21 mars 1911 relatif à la traction électrique Art. 28 § 1.

⁵⁾ Seite 261, Bulletin 1920.

⁶⁾ Technologic paper No. 62.

⁷⁾ Technologic paper of the Bureau of Standards No. 62, Seite 32.

Maximal zulässige Schienenstoss widerstände amerikanischer Strassenbahn-Unternehmungen.

Tabelle IX

Anzahl Strassenbahn-Unternehmungen	Maximal zulässiger Stoss widerstand für Stadtgebiet	Anzahl Strassenbahn-Unternehmungen	Maximal zulässiger Stoss widerstand für Stadtgebiete
1	0,15 m	4	1,52 m
2	0,23 „	2	1,83 „
1	0,31 „	4	2,13 „
1	0,61 „	1	3,66 „
6	0,92 „	2	5,18 „
2	1,22 „		

Der mittlere, maximal zulässige Stoss widerstand für Stadtgebiet berechnet sich aus dieser Tabelle zu 1,6 m. Für Vorortslinien lassen 2 Unternehmungen Stoss widerstände bis zu 2,74 m zu, eine Unternehmung solche bis zu 7,32 m, im Mittel also 4,3 m. An Hand dieser Umfrage und eigener Erfahrungen empfiehlt das Bureau of Standards ¹⁾ Stoss widerstände von 0,92 ÷ 2,13 m zuzulassen. Wir sind uns nun wohl bewusst, dass diese für amerikanischen Verhältnisse gültigen Zahlen nicht ohne weiteres auf schweizerische Verhältnisse übertragen werden können, da wir in der Schweiz im allgemeinen bedeutend weniger intensiven Betrieb und auch viel leichtere Wagen führen. Aus Stoss widerstandsmessungen in einer Stadt, in welcher sich das Geleise in gutem Zustande befindet, wo aber keine speziellen Massnahmen zur Begrenzung der Schienenstoss widerstände getroffen werden, ergibt sich, dass von 102 beliebig herausgegriffenen Stössen ausser 2 Stössen, die einen sehr grossen Widerstand aufweisen, und die nach allen Vorschriften instand zu stellen wären, nur 2 weitere Stösse grössere Widerstände als 3 m Schiene aufweisen. Aehnliche Resultate haben wir auch in anderen Städten mit gut unterhaltenem Geleisenetz gefunden. Wir glauben infolgedessen nicht zuviel zu verlangen, wenn wir den *maximal zulässigen Stoss widerstand auf 3 m Schiene begrenzen*. Für *Kreuzungs- und Weichenstösse* wären allerdings grössere Widerstände zuzulassen. Von 31 in derselben Stadt gemessenen Stössen dieser Art hatte einer einen sehr grossen Widerstand, derselbe wäre auch nirgends wo Vorschriften bestehen, zugelassen. Lassen wir diesen ausser Acht, so sehen wir, dass nur 3 Stösse, also 10 % einen grösseren Widerstand als 6 m Schiene aufweisen. Wir schlagen diesen Widerstand als maximal zulässigen für Weichen und Kreuzungsstösse vor.

Die mittlere Widerstandserhöhung der Geleise durch die 100 Schienenstösse in der betrachteten Stadt (unter welchen sich keine Weichen- und Kreuzungsstösse befinden und bei welchen die beiden erwähnten 2 sehr schlechten Stösse ausgeschieden sind) beträgt 4,6 % bezogen auf lauter 15 m lange Schienen. Unter Berücksichtigung des Umstandes, dass Schienen- und Kreuzungsstösse diesen Wert noch erhöhen, wie auch die manchmal notwendige Verwendung kürzerer Schienen schlagen wir als maximale zulässige Widerstandserhöhung der Geleise durch Schienenstösse 10 % vor.

Wichtig für die Erhaltung dauernd guter Zustände ist eine periodische Kontrolle der Schienenstösse, die natürlich von einer Reparatur der defekten Stösse gefolgt sein muss. Die deutschen Vorschriften schreiben eine einmal jährliche Kontrolle des Widerstandes aller Schienenstösse vor. Das bedingt aber eine starke Belastung der Strassenbahn. Bei den schweizerischen Verhältnissen müssten bei jeder grösseren Strassenbahn, lediglich zum Messen der Stoss widerstände 2 bis 3 Mann und ein Messwagen während 2 ÷ 4 Monaten im Jahr ausschliesslich mit dieser Nacharbeit beschäftigt werden. Andererseits gefährden hauptsächlich diejenigen Stösse mit zu grossem Widerstande die Rohrleitungen, die einen grossen mittleren Strom führen währenddem auch schlechte Stösse mit nur kleinem mittlerem Strom die Erdströme nicht wesentlich vergrössern. Wir schlagen deshalb vor, nur Stösse die einen verhältnismässig grossen mittleren Strom führen, jährlich einmal nachzumessen und wo nötig

¹⁾ Techn. paper of the Bur. of St. No. 62, Seite 106.

instand zu stellen. Alle Stösse sollten dann nur alle 3 ÷ 5 Jahre gemessen und solche mit zu grossem Widerstande repariert werden. Bei der Festlegung des Grenzstromes sollte der Grösse des Schienenprofils (bei grösserem Schienenprofil müssen ja auch die Stosswiderstände kleiner sein) und der mittleren täglichen Betriebszeit wie wir sie weiter oben definiert haben Rechnung getragen werden. Das ist von selbst der Fall, wenn wir für den Grenzstrom J_g eine der Formel (22) ähnliche Formel wählen. Wir schlagen vor als solchen Grenzstrom denjenigen mittleren Strom zu wählen, der die Hälfte des nach Formel (22) zulässigen Spannungsabfalles in den den Stoss bildenden Schienen erzeugt, d. h. also mit anderen Worten: Es werden jährlich einmal nur diejenigen Schienenstösse untersucht, die einen Strom zu führen haben, der zwischen dem maximal zulässigen Schienenstrom (durch den maximal zulässigen spezifischen Spannungsabfall gegeben) und der Hälfte desselben liegt; alle Schienenstösse würden nur alle 3 ÷ 5 Jahre untersucht. Geschweisste Schienenstösse brauchen dabei nicht gemessen zu werden, es genügt eine einmalige jährliche Inspektion am Tage, da gerissene Stösse schon äusserlich erkennbar sind.

Bezeichnen wir mit:

J_g den oben definierten Grenzstrom in A; q den Schienenquerschnitt in cm^2 ; ϱ den spezifischen Widerstand des Schienenstahles + 10% Zuschlag für die Stösse in $\Omega/\text{m}/\text{mm}^2$;

$j_g = \frac{J_g}{q}$ die Grenzstromdichte in den Schienen in A/cm^2 und haben v_s , v_s' und T dieselbe

Bedeutung wie in Formel (22) so ist:

$$v_s = 10 \varrho j_{\max} = v_s' \frac{24}{T} \text{ da nun } j_g = \frac{1}{2} j_{\max} \text{ sein soll, haben wir:}$$

$$j_g = 1,2 \frac{v_s'}{\varrho T} \quad \text{oder} \quad J_g = 1,2 \frac{q v_s'}{\varrho T}$$

setzen wir wie oben $v_s' = 1 \text{ V/km}$ und für ϱ als Mittelwert $0,216 \Omega/\text{m}/\text{mm}^2$, so erhalten wir für J_g :

$$J_g = 5,5 \frac{q}{T} \quad J_g \text{ in A, } q \text{ in } \text{cm}^2, T \text{ in h}$$

oder wenn wir mit G_1 das Schienengewicht pro laufenden m einführen, erhalten wir:

$$J_g = 7,1 \frac{G_1}{T} \quad J_g \text{ in A, } G_1 = \text{kg/m, } T \text{ in h}$$

Das ist eine sehr einfache Gleichung zur Bestimmung des Grenzstromes, durch welche die jährlich zu wiederholenden Messungen je nach den Verhältnissen auf $\frac{1}{5}$ bis $\frac{1}{15}$ des Netzes reduziert werden können. Das sind gegenüber den deutschen Vorschriften beträchtliche Erleichterungen für die Strassenbahnen, wobei die Rohre ganz unwesentlich mehr gefährdet werden.

Zusammenfassend schlagen wir also vor, bezüglich der zulässigen Stosswiderstände strengere Vorschriften als bisher in Europa gebräuchlich zu erlassen, wobei wir aber denselben keine so engen Grenzen geben, wie sie amerikanische Strassenbahnen vielfach von sich aus eingeführt haben und wie sie dort von massgebenden Stellen als notwendig erachtet werden. Dagegen schlagen wir vor, bezüglich der Kontrolle gegenüber bestehenden Vorschriften in Deutschland den Strassenbahnen Erleichterungen zu gewähren, die für sie beträchtlich sind bei nur unwesentlicher Beeinflussung der Erdströme.

3. Spannungsabfälle im Rohrleitungsnetz.

Der Spannungsabfall im Rohrleitungsnetz kann in einer parallel zu den Schienen verlegten Rohrleitung höchstens gleich dem Schienenspannungsabfall sein. Wird also der letztere begrenzt, so kann auch der erstere keine höheren Werte annehmen. Mit dem Rohrspannungsabfall wächst bei gegebenem Rohr- und Rohrmuffenwiderstand der Rohrstrom und damit also auch die Rohrgefährdung. Da aber nur die Stromdichte des die

Rohre verlassenden Stromes dieselben gefährdet, kann die zulässige Grenze des Rohrstromes und damit auch der zulässige Rohrspannungsabfall nicht allgemein angegeben werden. Messungen haben gezeigt, dass bei, auf $1 \div 2$ V/km begrenzten Schienenspannungsabfällen, der Rohrspannungsabfall an gusseisernen Muffenrohren für Wasserleitungen, an deren Muffen keine besonderen Massnahmen zur Erhöhung ihres Widerstandes getroffen werden, etwa $\frac{1}{3}$ des in den Schienen auftretenden Spannungsabfalls nicht übersteigt, in vielen Fällen aber unter $\frac{1}{10}$ dieses Wertes liegt. Nehmen wir etwa 0,5 V/km als obere Grenze für den Rohrspannungsabfall bei korrigierten Verhältnissen an und rechnen wir mit den auf Seite 15 für Wasserleitungsrohre angegebenen Widerständen, so erhalten wir einen maximalen Rohrstrom von etwa 0,025 A pro cm² Rohrquerschnitt. Eine Rohrleitung von 150 mm lichtigem Durchmesser würde demnach einen mittleren Rohrstrom von etwa 1 A, eine solche mit 250 mm lichter Weite einen Strom von etwa 2 A und eine 350er Rohrleitung etwa 3 A führen. Treten diese Stromstärken in einem kleinen Gebiete aus, so können durch sie die Rohrleitungen allerdings in kurzer Zeit zerstört werden, bei genügend grossen Austrittsgebieten aber sind auch noch grössere Stromstärken im Rohr ungefährlich.¹⁾ Bei Gasleitungsrohren, die infolge höheren Muffenwiderstandes im allgemeinen weniger gefährdet sind²⁾, könnte unter Umständen ein etwas höherer spezifischer Spannungsabfall in den Rohren und dementsprechend auch in den Schienen zugelassen werden. Dasselbe gilt natürlich auch für Leitungen, bei denen isolierende Rohrverbindungen angewendet werden. Eingehende Versuche über die Wirksamkeit und Zweckmässigkeit solcher Rohrverbindungen, die in Amerika eine grosse Verbreitung gefunden haben, hat das Bureau of Standards gemacht.³⁾ Diese Verbindungen haben sich an Orten, wo sie in genügender Anzahl verlegt wurden, im praktischen Betriebe bewährt, indem durch sie Rohrströme bedeutend vermindert wurden. Das Bureau of Standards empfiehlt auf Grund dieser Erfahrungen die Anwendung isolierender Rohrverbindungen, von denen in der erwähnten Schrift einige Ausführungsformen beschrieben und besprochen sind, bei Verlegung von neuen Rohrleitungen in speziell gefährdeten Gebieten und bei Gelegenheit von Aufgrabungen an bereits bestehenden Rohrleitungen, die in solchen Gebieten liegen. Aus der Schweiz liegen unseres Wissens noch keine Erfahrungen über isolierende Rohrverbindungen vor. Ihre Anwendung bildet bei bestehenden Rohrleitungen eine derartige Verteuerung der Rohrleitungen, dass man bei diesen Leitungen darauf verzichten muss. Dagegen ist die Anwendung bei neuen Rohrleitungen ohne allzugrosse Kosten wohl möglich und sollte unter gebührender Berücksichtigung der in der Folge genannten Vorsichtsmassnahmen in speziellen Fällen zur Anwendung kommen.

V. Vorschläge zur Verbesserung bestehender Verhältnisse und Berechnung der neuen Zustände.

1. Die Massnahmen an den Schienen.

Eine der wichtigsten Massnahmen zur Verminderung der Erdströme besteht in der Instandstellung von Schienenstössen mit unzulässig grossem Widerstande. Wird dabei die bestehende elektrische Schienenverbindung nicht mehr benutzt und sind die Schienen noch nicht abgefahren oder einer starken Abnutzung unterworfen, wie beispielsweise in scharfen Kurven oder in starkem Gefälle, wo die elektromagnetische Schienenbremse betriebsmässig benutzt wird, so empfiehlt sich als bestes Mittel, die Schienenstösse zu schweissen. Ist das aber aus irgendeinem der angeführten Gründe nicht zulässig, so können auch Drahtverbinder zur Anwendung kommen. Die Edison-Brown-Verbindung, die wie wir sahen⁴⁾ eine sehr gute elektrische Verbindung herstellt, wird wohl nur selten bei solchen Erneuerungen technisch anwendbar sein. Bei Verwendung von Drahtverbindern werden wohl die an die Schienen angeschweissten Verbinder die kleinsten Uebergangswiderstände aufweisen. Wesentlich ist es, wenn an Kupfer gespart werden soll, dass die Verbinder möglichst *kurz* gehalten werden. Wird der Widerstand des Kupferverbinders allein, (also

¹⁾ Siehe beispielsweise Technologic paper No. 54, Seite 42.

²⁾ Siehe auch: Earth Resistance of Electrolysis, Technologic paper No. 26, Seite 41.

³⁾ Siehe Technologic paper No. 52, Seite 42 ff.

⁴⁾ Seite 261, Bulletin 1920.

ohne Berücksichtigung von Uebergangswiderständen) gleich dem Widerstande von einem Meter Schiene gehalten, so dürfte er bei Verwendung von mittelschweren Rillenschienen (Profil Phoenix 18 c) nur etwa 0,000030 Ohm, bei Verwendung von leichten Rillenschienen (Profil Phoenix 5 E) etwa 0,000042 Ohm und bei den, für Strassenbahnen auf Aussenstrecken oft verwendeten leichten Vignol-Schienen (Cockerill V) etwa 0,000065 Ohm betragen. Bei Annahme dieser Widerstände ergeben sich die zu verwendenden Kupferquerschnitte- und Gewichte bei verschiedenen Längen der Verbinder, wie aus der folgenden Tabelle IX ersichtlich. Wie wir schon auf den Seiten 260 und 261 gezeigt haben, weisen

Kupferquerschnitte und -Gewichte von Schienenverbindern verschiedener Länge und verschiedener Schienenprofile.

Tabelle X.

Länge der Kupfer- verbindung	Widerstand der Verbind- ung 0,03 m Ω (Schienen- profil Phönix 18 c)		Widerstand 0,042 m Ω (Profil Phoenix 5 E)		Widerstand 0,065 m Ω (Vignolschienen Cockerill V)	
	Querschnitt	Gewicht	Querschnitt	Gewicht	Querschnitt	Gewicht
cm	mm ²	gr.	mm ²	gr.	mm ²	gr.
10	58,5	52	42	37	27	24
15	88	117	63	84	41	54
20	117	208	84	149	54	96
30	176	468	126	334	81	216
50	298	1300	213	930	138	600
100	585	5200	418	3720	270	2400

viele der meistgebräuchlichen Schienenverbinder einen viel zu grossen Widerstand auf. Der in Fig. 6 dargestellte Kupferdrahtverbinder hat ein Gewicht von etwa 470 Gramm, der Bandverbinder (Fig. 7) ein solches von etwa 220 Gramm. Diese Gewichte sind daher keineswegs zu klein, um nicht mit der Verwendung derselben Kupfermenge bessere, aber kürzere Verbinder zu erhalten. Der Drahtverbinder könnte dann allerdings nicht mehr wie in Fig. 6 über der Lasche verlegt werden. Er könnte aber wie in Fig. 7 unter der Lasche oder am Schienenfusse, bei Vignol-Schienen auch am Schienenkopfe angebracht werden. Allzukurze Schienenverbinder sind allerdings auch nicht zu empfehlen, weil sie infolge der betriebsmässigen Erschütterungen nur eine kurze Lebensdauer aufweisen. Hier sind jedenfalls noch Betriebserfahrungen zu berücksichtigen und eventuell Versuche anzustellen.

Ist die Leitfähigkeit der Schienen auch bei guten Stossverbindungen noch zu klein, so sind entweder die Schienen von einem Teil des Stromes zu entlasten oder es ist ein stärkeres Schienenprofil zu verlegen. Welche von beiden Massnahmen in einem bestimmten Falle anzuwenden ist, kann allgemein nicht angegeben werden. Gewöhnlich werden die jährlich dafür zur Verzinsung, Amortisation und Unterhalt aufzuwendenden Ausgaben eine ausschlaggebende Rolle spielen, daneben können aber auch andere Faktoren, wie beispielsweise der allgemeine Zustand der Schienenanlagen und ihr Einfluss, nicht nur auf die Gefährdung von unterirdisch verlegten Rohren und Kabeln, sondern auch auf das Rollmaterial, den Strassenunterhalt u. s. w. mitsprechen. Auf die Mittel zur Verminderung des Stromes in den Schienen werden wir noch ausführlich zu sprechen kommen.

2. Die Massnahmen an den Rohrleitungen.

Die wichtigste und fast einzige Massnahme an den Rohrleitungen zur Verminderung der Rohrströme, die sich in der Praxis auch noch nach Jahren bewährt hat, ist der Einbau isolierender Rohrverbindungen in die Rohrstränge. Wie wir schon erwähnt haben, hat das Bureau of Standards über deren Einfluss eingehende Untersuchungen angestellt und berichtet darüber in ihrer Schrift *Electrolysis and its mitigation*.¹⁾ Bei Anwendung dieser Verbindung sind aber gewisse Vorsichtsmassregeln zu beachten, sollen damit befriedigende

¹⁾ Technologic paper No. 52, Seite 42 und ff.

Resultate erzielt werden. Vor allem müssen dieselben in genügender Anzahl verlegt werden, sodass der Spannungsabfall über einem Stoss im Normalbetriebe bei gusseisernen Rohren nicht grösser als $0,1 \div 0,4$ Volt wird. Dabei ist die untere Grenze für Rohrleitungsstrecken einzuhalten, die in feuchtem Boden liegen oder bei Verwendung von isolierenden Verbindungen, bei denen die beiden Rohrenden nur durch eine ganz kurze Isolierschicht voneinander getrennt sind; die obere Grenze dagegen bei Rohrleitungen in trockenem Boden oder bei Verwendung von isolierenden Verbindungen, durch welche ein grösserer Abstand der beiden Rohrenden gewährleistet wird.

Durch den Einbau solcher Verbindungen wird der spezifische Spannungsabfall pro Längeneinheit in der Erde erhöht, daher werden natürlich Rohrleitungen, die nicht durch solche Stösse geschützt sind, grössere Ströme führen und somit stärker gefährdet werden. Ausserdem sollten natürlich isolierende Rohrverbindungen nicht nur auf gewisse Rohrteilstrecken im Korrosionsgebiete beschränkt bleiben, sondern hauptsächlich auch im Einzugsgebiete angewendet werden. Wird allen diesen Gesichtspunkten bei der Verlegung isolierender Rohrverbindungen gebührend Rechnung getragen, so kann die Gefährdung von Rohrleitungen auch dann auf ein ganz ungefährliches Mass herabgesetzt werden, wenn grössere als im vorhergehenden Kapitel angegebene Schienenspannungsabfälle auftreten. Diese Massnahmen sind jedoch, wenn sie an bestehenden Rohrleitungen angewendet werden sollen, sehr kostspielig und umständlich, so dass sie im allgemeinen nur bei Verlegung von neuen Rohrleitungen in speziell gefährdeten Gebieten und eventuell bei grösseren Reparaturen an bestehenden Rohrleitungen in Frage kommen werden. Sie sind im allgemeinen auch nur bei speziell ungünstigen Verhältnissen notwendig, oder wenn aus irgend einem Grunde eine Einhaltung der im letzten Kapitel dieses Aufsatzes angegebenen Grenzen für Spannungen und spezifische Spannungsabfälle nicht möglich ist.

3. Die Massnahmen zur Erhöhung des Widerstandes zwischen Schiene und Rohr.

Der Widerstand zwischen Schiene und Rohr setzt sich aus dem Uebergangswiderstande zwischen Schiene und Erde, dem Erdwiderstande und dem Uebergangswiderstande zwischen Erde und Rohr zusammen.

Der Erdwiderstand hängt, wie schon ausführlich auf den Seiten 269 und 270 dieses Berichtes dargestellt worden ist, ausser von der Erdbeschaffenheit hauptsächlich vom Feuchtigkeitsgehalt und der Temperatur der Erde ab, also von Faktoren, die man mit Ausnahme des Feuchtigkeitsgehaltes nicht wohl beeinflussen kann. Mit diesem letzteren variieren aber auch die beiden Uebergangswiderstände in ähnlicher Weise, welche auch den grösseren Anteil am Gesamtwiderstande zwischen Schiene und Rohr ausmachen, so dass sich in der Praxis alle Versuche auf die Erhöhung dieser beiden Widerstände richten.

Der Uebergangswiderstand zwischen Schiene und Erde wird im allgemeinen durch den Einbau der Schienen in eine Betonunterlage erniedrigt. Diese Verlegungsart wäre also von diesem Gesichtspunkte aus nicht zu empfehlen. Bedeutend höhere Widerstände ergeben Schotter- oder Kiesunterlagen, die durch eine möglichst dichte und wasserundurchlässige Strassendecke von Feuchtigkeit und Strassenschmutz freigehalten werden. Salz, das im Winter zum Verhindern des Einfrierens von Weichen verwendet wird, setzt den Widerstand bedeutend herab und sollte wo immer möglich vermieden werden (eventuell durch Einbau von elektrischen Weichenheizkörpern)¹⁾. Eine Isolierung der Schienen mit Teerpapier und Pech oder Asphalt erhöht den Uebergangswiderstand beträchtlich und scheint sich auch, wie dreijährige Versuche des Bureau of Standards zeigen, gut zu halten. Bei offener Verlegung sollten die Schienen so wenig als möglich mit der Erde in Berührung kommen und es sollte die Schienenbettung gut drainiert werden. Auf die Verwendung von Zinkchlorid zum Imprägnieren von Holzschwellen sollte zugunsten von Kreosot oder anderen Teerprodukten verzichtet werden. Bei Berücksichtigung aller dieser Angaben, die aus dem auf Seite 271 Gesagten folgen, werden möglichst hohe Uebergangswiderstände zwischen Schiene und Erde erreicht.

¹⁾ Siehe E. T. Z. 1920, Seite 133.

Es ist auch versucht worden, den *Uebergangswiderstand zwischen Erde und Rohrleitung* künstlich durch Anwendung von Isolierschichten und Anstrichen zu erhöhen, doch haben alle diese Versuche u. a. auch solche des Bureau of Standards¹⁾ wie wir schon in unserem I. Berichte²⁾ erwähnt haben, zu keinem positiven Ergebnis geführt, indem keines der untersuchten Isoliermittel auf die Dauer Stand gehalten hat.

Einen ganz wesentlichen Einfluss auf den Widerstand zwischen Schiene und Rohr hat neben der Konstruktion der Strassenoberfläche und der Schienenbettung der *Unterhalt* derselben. So selbstverständlich dieser scheint, so wenig wird an manchen Orten für denselben getan. Es sollte insbesondere die Strassenoberfläche möglichst dicht und wasserundurchlässig *erhalten* und auch möglichst rein gehalten werden. Schon beginnende Schäden sollten ausgebessert werden. Gut unterhaltene, trockene Strassen erleichtern nicht nur den Verkehr, sondern setzen auch die Gefährdung für unterirdisch verlegte Leitungen und Kabel herab. Ebenfalls sollten Wasserverluste aus Rohrleitungen möglichst rasch ermittelt und behoben werden.

4. Gesichtspunkte für die Wahl der Anschlusspunkte von Schienenspeisekabeln und Massnahmen an bestehenden Kabeln.

Damit die Erdströme möglichst klein werden, muss der Schienenstrom und der von diesem durchflossene Weg nach Möglichkeit reduziert werden. Es sollten also möglichst viele Kabel an die Schienen angeschlossen werden und der mittlere Spannungsabfall zwischen dem Anschlusspunkt des Kabels an die Schienen und der Sammelschiene im stromliefernden Werk sollte für alle Kabel gleich gross sein. Diese Zuteilung kann aber, da die Schienen mit den Kabeln und der Sammelschiene geschlossene Stromkreise bilden, nur durch entsprechende Dimensionierung der Kabel oder durch Zwischenschaltung von Widerständen oder Zusatzmaschinen erfüllt werden. Das alles setzt aber die Verlegung *isolierter* Schienenspeisekabel voraus. Da bei Verlegung nackter Kabel der Erdstrom ausserdem noch vergrössert wird, befassen wir uns im folgenden nur noch mit isolierten Schienenspeisekabeln. Bei gegebenen Betriebsverhältnissen lässt sich die Anzahl und die günstigste Lage der Anschlusspunkte der Schienenspeisekabel anhand der auf den Seiten 291 und 292 empfohlenen maximalen Spannungen und Spannungsabfälle ermitteln. Bei Neuanlagen empfiehlt es sich, die Strombelastung der Schienen nicht über $0,5 \div 0,6 \text{ A/cm}^2$ Schienenquerschnitt anzunehmen.

Sind die Lage (und damit die Länge) und die jedem Kabel zugeteilten Ströme bekannt, so müssen die Kabelquerschnitte ermittelt werden. Diese sollten wenn möglich so bestimmt werden, dass die jährlichen Ausgaben für Verzinsung und Amortisation der Kabelanlage und die Kosten für Energieverluste in derselben und eventuell notwendigen Zusatzwiderständen oder -Maschinen ein Minimum werden. Diese Rechnung kann natürlich nur bei gegebenen Unterlagen genau durchgeführt werden, auch müssen dann noch andere Faktoren, wie Erwärmung der Kabel bei Höchstbelastung, die oft während einer Stunde und länger ein mehrfaches der mittleren Belastung betragen kann, eventuelle spätere Erweiterungen der Anlage und Verstärkung des Verkehrs berücksichtigt werden. Dadurch werden oft beträchtliche Abweichungen von den wirtschaftlichsten Kabelquerschnitten notwendig; trotzdem sollte die Wirtschaftlichkeitsrechnung durchgeführt werden, um sich Rechenschaft von den durch die Abweichungen hervorgerufenen Aenderungen geben zu können.

Um sich ein Bild der Grössenordnung der wirtschaftlichen Stromdichte machen zu können, und um den bei solchen Berechnungen einzuschlagenden Rechnungsvorgang zu erläutern, sei hier ein einfaches Beispiel behandelt.³⁾ Betrachten wir ein Einleiter-Bleikabel mit verseiltem Kupferleiter von der Länge l und dem Querschnitte q , welches in einem Kabelgraben von 60 cm Breite und ebensolcher Tiefe verlegt wird. Der Preis K eines solchen Kabels lässt sich nach folgender Formel schreiben: $K_1' = (a' + bq) l$, worin a' und b Konstanten sind. Die Kosten K_1'' für die Verlegung des Kabels sind im wesentlichen

¹⁾ Technologic paper No. 15.

²⁾ I. Bericht der Korrosions-Kommission, Bulletin 1918, Seite 164, Sonderabdruck Seite 25.

³⁾ Eine ähnliche Rechnungsmethode geben Herzog und Feldmann in ihrem Werke die Berechnung elektrischer Leitungsanlagen Bd. 2 an.

vom Kabelquerschnitt unabhängig und nur eine Funktion der Kabellänge. Es ist also: $K_1'' = a'' l$. Setzen wir $a = a' + a''$ und bezeichnen wir mit c die jährliche Verzinsungs- und Amortisationsquote und mit k_1 die jährlichen Auslagen für ein Kabel von 1 m Länge für Verzinsung und Amortisation, so ist:

$$k_1 = c(a + bq) \quad (23)$$

Die jährlichen Energieverluste W in kWh im Kabel sind, wenn wir mit J den mittleren Kabelstrom im Normalbetriebe und mit T die mittlere tägliche Betriebsdauer bezeichnen:

$$W = J^2 \sigma^2 \frac{l}{57 q} \frac{365 T}{1000}$$

Die jährlichen Kosten für Energieverluste k_2 für ein Kabel von 1 Meter Länge werden, wenn wir mit κ den Preis der kWh in fr./ kWh bezeichnen:

$$k_2 = 0,0064 \kappa \sigma^2 \frac{1}{q} T J^2 \quad (24)$$

wobei σ das Verhältnis des Effektivwertes des Stromes zu seinem Mittelwert darstellt. Die jährlichen Gesamtkosten k für 1 m Kabel sind gleich $k = k_1 + k_2$. Setzen wir für den Strom J : $J = j q$ wobei j die mittlere Stromdichte bedeutet, so haben wir:

$$k = ca + cbq + 0,0064 \sigma^2 \kappa q T j^2 \quad (25)$$

oder wenn wir den Strom J an Stelle von q in die Gleichung einführen:

$$k = ca + cb \frac{J}{j} + 0,0064 \sigma^2 \kappa T j J \quad (26)$$

Diese jährlichen Kosten k werden dann ein Minimum, wenn $\frac{\partial k}{\partial j} = 0$ ist. Nennen wir diese Stromdichte die wirtschaftliche Stromdichte j_w , so ist, wie leicht gezeigt werden kann:

$$j_w = \frac{12,5}{\sigma} \sqrt{\frac{cb}{\kappa T}} \quad (27)$$

Die wirtschaftliche Stromdichte ist also ganz unabhängig von der Stromstärke J und ebenfalls von den Kabelverlegungskosten, welche in der Konstanten a enthalten sind.

Setzen wir j_w in Gleichung 25 oder 26 ein, so erhalten wir die minimalen jährlichen Kosten für 1 m Kabellänge für Verzinsung, Amortisation und Energieverluste. Dieselben werden:

$$k_{min} = c(a + 2 bq) \quad (28)$$

Bei den im Frühjahr 1920 geltenden Kabelpreisen und Arbeitslöhnen beträgt die Konstante a je nach der Art der Strassendecke ca. 16 ÷ 30 fr./m (für Makadamstrasse ca. 16 fr./m, Steinpflaster ca. 20 fr./m, Asphalt ca. 30 fr./m) und die Konstante b , wie wir anhand von Offerten auf Mitte Februar 1920 ermittelt haben 0,07 fr./m · mm². Das Verhältnis σ (Formfaktor) des Effektivwertes des Stromes zu seinem Mittelwert, das bei konstantem Strome gleich 1 ist, wird durch regelmässige Stromschwankungen wie sie in Kabeln, die den Strom vieler Strassenbahnwagen führen, die Regel bilden, nur ganz unwesentlich über 1 liegen. Führt aber ein Kabel beispielsweise nur den Strom eines Wagens in einer Steigung und ist es dementsprechend nur die Hälfte der Zeit belastet, so wird $\sigma = \sqrt{2}$. Dieser extreme Belastungsfall tritt jedoch bei einem Schienenspeisekabel kaum auf.

Nehmen wir beispielsweise eine mittlere Betriebszeit T von 16 Stunden, einen Strompreis κ von 0,10 fr./kWh, einen Verzinsungs- und Amortisationsfaktor c von 0,12 und ein σ gleich 1 an, so wird die wirtschaftliche Stromdichte $j_w = 0,91 \text{ A/mm}^2$. Berücksichtigen wir, dass zu Zeiten gesteigerten Verkehrs die mittlere Stromstärke ganz wohl das Doppelte derjenigen bei Normalbetrieb betragen kann, so sehen wir, dass das Kabel auch inbezug auf Erwärmung gut ausgenutzt wird. Es ist aber durchaus nicht notwendig, dass man sich peinlich genau an die durch die Rechnung ermittelte günstigste Stromdichte hält, da die Erhöhung der jährlichen Betriebskosten bei kleineren Abweichungen in der Regel nicht gross ist. Es ist im Gegenteil eher zu empfehlen, eine etwas kleinere als die wirtschaftliche Stromdichte zu wählen, um bei einer nicht vorausgesehenen Verstärkung des Verkehrs oder Vergrösserung des Netzes unter Umständen mit der bestehenden Kabelanlage auskommen zu können.

Die im letzten Abschnitt abgeleiteten Formeln gelten selbstverständlich nur bei den am Anfange gemachten Annahmen, sie sind insbesondere nicht ohne weiteres auf verzweigte Kabelnetze anwendbar, da wir sie nur für *ein* Kabel in *einem* Graben abgeleitet haben. Bei vollständigen Kabelnetzen werden bei der wirtschaftlichsten Stromverteilung im allgemeinen die kürzeren Kabel stärker, die längeren schwächer belastet werden.

Sind Kabelquerschnitt und -Länge und der jedem Kabel zugeteilte Strom bestimmt, so kann der Spannungsabfall in den einzelnen Schienenspeisekabeln berechnet werden. Im allgemeinen werden nicht alle zu einem Stromwerk führenden Kabel denselben Spannungsabfall aufweisen. Sollen die Anschlusspunkte aller Schienenspeisekabel gleiches Potential aufweisen, so müssen zwischen diesen Punkten und der Sammelschiene entweder noch zusätzliche Widerstände eingebaut werden, deren Widerstände sich aus den gemachten Angaben leicht berechnen lassen, oder es werden Zusatzmaschinen, die als Hauptstrommaschinen, meistens durch den Strom des entsprechenden Fahrdrachtspeisekabels erregt werden, zwischen Kabel und Sammelschiene geschaltet. Der Einbau von Widerständen hat gegenüber der Verwendung von Zusatzmaschinen den grossen Vorzug, dass dieselben keiner Wartung und fast keines Unterhalts bedürfen und dass die Anschaffungskosten kleinere sind, dagegen den Nachteil, dass die Energieverluste grösser sind. Eine Wirtschaftlichkeitsrechnung wird auch hier zeigen, welche der beiden Massnahmen am Platze ist. Im allgemeinen kommen Zusatzmaschinen nur dann in Frage, wenn neben einzelnen kurzen Schienenspeisekabeln ein oder einige sehr lange Kabel notwendig sind. In einem solchen Falle sollte aber immer noch untersucht werden, ob nicht eine Umformerstation, etwa mit Quecksilberdampfgleichrichtern, die Frage billiger und besser lösen würde.

Bei bestehenden Anlagen, in welchen isolierte Schienenspeisekabel vorhanden sind, sollten bei Verbesserungen, soweit möglich, ebenfalls die für Neuanlagen aufgestellten Grundsätze befolgt werden. Selbstverständlich wird aber hierbei von den bestehenden Schienenspeisekabeln Gebrauch gemacht werden und nur wo unvermeidlich oder vorteilhafter, sollten weitere Kabel in Vorschlag gebracht werden. Unter Umständen kann hierbei dadurch beträchtlich an Kupfer gespart werden, dass die Bedingung der absoluten Potentialgleichheit für alle Kabelanschlusspunkte an die Schienen fallen gelassen wird und kleinere Differenzen zugelassen werden, soweit nicht die Strombelastung der Schienen oder die Potentiale gegen Erde die auf den Seiten 291 und 292 dieses Berichtes angegebenen Werte überschreitet. Doch sollte diese Massnahme nur bei Verbesserung von bestehenden Verhältnissen, nicht bei Neuprojektierung in Frage kommen.

Wenn ein Strassenbahnnetz von mehreren Stromwerken aus gespeisen wird, so kann allerdings die Bedingung der Potentialgleichheit für die Anschlusspunkte aller Schienenspeisekabel *eines* Stromwerkes durch entsprechende Dimensionierung der Kabel bzw. Einbau von Widerständen usw. ohne weiteres erfüllt werden. Sollen aber auch die Anschlusspunkte der Schienenspeisekabel verschiedener Stromwerke dasselbe Potential aufweisen, so ist mit dieser Bedingung, wie man sich durch Ueberlegung leicht überzeugen kann, die Abgrenzung der Fahrdrachtspeisegebiete für die einzelnen Stromwerke gegeben. Da diese Abgrenzung aber oftmals aus betriebstechnischen Gründen nicht beliebig festgelegt werden kann, so ist eine strikte Durchführung der Potentialgleichheit aller Schienenspeisekabel bei mehreren, ein Strassenbahnnetz speisenden Stromwerken praktisch nicht immer genau durchführbar.

5. Berechnung der Schienenpotentiale nach den an den Schienenspeisekabeln getroffenen Massnahmen.

Durch den Einbau von Widerständen oder Zusatzmaschinen zwischen Schienenspeisekabel und Sammelschienen werden die Ströme in den Schienen und Kabeln gegenüber den vorher herrschenden Verhältnissen verändert und damit auch die Schienenpotentiale. Die neuen Potentialdifferenzen im *Schienennetz* können wir anhand der auf Seite 284 ff. gemachten Angaben berechnen, die Potentialdifferenzen *gegen Erde* dagegen nicht ohne weiteres, da sich die neutrale Zone, auf die wir alle diese Potentiale beziehen, auch verschiebt. Ungefähr kann die Lage dieser letzteren aber bestimmt werden, indem wir wissen, dass der Strom, der im Einzugsgebiet bis zur neutralen Zone in die Erde übertritt, im Korrosionsgebiet wieder vollständig zu den Schienen zurückkehren muss. Bestehen mehrere Umformerstationen so gilt diese Bedingung für das gesamte von allen Umformerstationen gespeiste Gebiet, nicht aber notwendigerweise für jede Umformerstation für sich. Dieser totale Erdstrom einer Strecke ist, wie wir schon in Formel (20) gezeigt haben, direkt proportional dem Produkt $V_l I$ wobei V_l die Spannungsdifferenz zwischen der Schiene am betrachteten Orte und der neutralen Zone und I die Länge der Strecke von dem der neutralen Zone entgegengesetzten Ende des Einzugsgebietes bis zum betrachteten Punkte bedeutet, und umgekehrt proportional dem Widerstande r_e zwischen Schiene und Erde. Da es bei der Bestimmung der neutralen Zone nicht auf die absolute Grösse des Erdstromes ankommt, so kann auch anstatt dieses letzteren Wertes eine Verhältniszahl für die verschiedenen Geleisebettungen und Anzahl Geleise eingesetzt werden. Solche Zahlen sind durch Messungen zu bestimmen, oder wenn solche nicht durchgeführt wurden, anhand der auf den Seiten 271 ff. gemachten Angaben zu schätzen. Durch einiges Probieren lässt sich so die Lage der neutralen Zone approximativ bestimmen.

6. Erhöhung der Betriebsspannung.

Eine Erhöhung der Betriebsspannung hat eine Verminderung der Schienenströme zur Folge und damit auch der Spannungsabfälle in den Schienen und der Erdströme. Wir haben diesen Einfluss schon in unserem ersten Bericht¹⁾ zahlenmässig angegeben. Da aus betriebstechnischen Gründen im allgemeinen eine Erhöhung der Betriebsspannung um höchstens $10 \div 20\%$ möglich sein wird, wenn nicht sowohl die Maschinen im Stromwerk als auch alle Wagenmotoren neu gewickelt werden sollen, so hat eine solche Erhöhung im allgemeinen nur lindernde Wirkung und wird gewöhnlich nur neben anderen Massnahmen in Frage kommen.

7. Anwendung des Dreileitersystems.

Das Dreileitersystem kann für Strassenbahnen auf zwei Arten angewendet werden. Es kann 1. der positive bzw. der negative Pol je über einem der beiden Geleise verlegt werden und der Nulleiter an die Schienen angeschlossen werden, oder es können 2. einzelne Strecken (über beiden Geleisen bei Doppelspur) am Fahrdrat mit dem positiven, andere Strecken mit dem negativen Maschinenpol verbunden werden, währenddem der Nulleiter auch hier an die Schienen angeschlossen wird.

In beiden Fällen haben die Schienen nur auf kürzeren Strecken Ströme zu führen, welche ausserdem oft ihre Richtung wechseln. Dieser häufige Stromrichtungswechsel, der, wie Messungen am gut ausbalancierten System in Nürnberg gezeigt haben,²⁾ ein bis mehrere Male pro Minute erfolgt, setzt die Korrosionsgefahr auf ein ganz unbedeutendes, praktisch zu vernachlässigendes Mass herunter.³⁾ Beide Systeme haben aber auch den gemeinsamen Nachteil, dass immer eine gerade Zahl Maschinen in Gang gehalten werden müssen, wodurch natürlich die einzelnen Maschinen schlechter ausgenützt werden und

¹⁾ I. Bericht der Korrosionskommission, Bulletin 1918, Seite 148, Sonderabdruck Seite 14.

²⁾ Bericht des Dir. Sieber am internat. Strassenbahn- und Kleinbahn-Kongress in Budapest 1914 über die Anwendung des Dreileitersystems bei Strassenbahnen, Seite 8.

³⁾ Siehe beispielsweise Proceedings of the A. I. E. E. 1916, Seite 371.

damit auch der jährliche Wirkungsgrad sinkt. Bei Anwendung von Gleichrichtern, welche auch bei kleinen Belastungen einen hohen Wirkungsgrad aufweisen und bei Strassenbahnen mit grossem Verkehr, ist dieser Nachteil von nebensächlicher Bedeutung. Er tritt dagegen bei kleineren Strassenbahnen erschwerend ins Gewicht, so dass dort das Dreileitersystem unwirtschaftlich wird.

Die erstere Anordnung hat bei zweigeleisigen Strecken, bei denen sie nur in Frage kommt, der zweiten gegenüber im allgemeinen den Vorteil des besseren Ausgleichs der beiden Netzhälften, dagegen den grossen Nachteil der komplizierteren Isolation der Oberleitung, die sich hauptsächlich in Kreuzungen und Weichen, wie sie gerade in Städten viel vorkommen, unangenehm bemerkbar macht. Dies ist wohl auch der Grund dafür, dass Dreileiteranlagen, die zuerst in Amerika nach diesem System zur Anwendung kamen, sich nicht bewährt haben und mit der Zeit verschwunden sind. Diese Nachteile überwiegen gegenüber den erwähnten kleinen Vorteilen so sehr, dass die Verwendung von Fahrleitungen verschiedenen Potentials über denselben Teilstrecken einer Strasse heute wohl nicht mehr in Frage kommt.

Diese Nachteile weist dagegen das Dreileitersystem nicht auf, wenn einzelne Teilstrecken des Fahrdrahtes mit dem einen, andere mit dem anderen Maschinenpol verbunden werden. Neben dem Vorteil der Verminderung der Korrosionsgefahr verbindet es noch den weiteren Vorteil, dass die Rückleitungskabelanlage im allgemeinen bis auf ein oder einige kurze Kabel entbehrt werden kann, und dass damit auch die in den Schienenspeisekabeln auftretenden Verluste und eventuell auch solche in Zusatzwiderständen vermieden werden, so dass bei Neuanlagen die Mehraufwendungen für das Stromwerk in vielen Fällen durch Ersparnisse an der Schienenspeisekabelanlage aufgewogen werden und die totalen Verluste zur Energieübertragung herabgesetzt werden. Als Nachteile sind hauptsächlich das kompliziertere Stromwerk (alle Speisekabel müssen, um einen guten Ausgleich der beiden Netzhälften zu ermöglichen, dort auf beide Pole umschaltbar eingerichtet werden; ausserdem werden im allgemeinen mehr Maschinen gebraucht) und die etwas kompliziertere Oberleitung (es ist hauptsächlich den Streckentrennern grössere Aufmerksamkeit zu schenken) zu nennen. Auch werden gewöhnlich trotz möglichst gleichmässiger Lastverteilung auf die beiden Netzhälften, in jeder Hälfte grössere Spannungsschwankungen als beim gewöhnlichen Zweileiterbetrieb entstehen.

Im allgemeinen kann gesagt werden, dass durch den Strassenbahnbetrieb nach dem Dreileitersystem die Korrosionsgefährdung von Rohren und Kabeln in den weitaus meisten Fällen auf ein ungefährliches Mass herabgesetzt werden kann. Er ist auch bei Strassenbahnen mit dichtem Verkehr und grosser Wagenzahl technisch durchführbar ¹⁾ und oft auch wirtschaftlich. Bei Strassenbahnen mit nur schwachem Verkehr oder kleiner Wagenzahl kann seine Einführung im allgemeinen nicht empfohlen werden, weil dann sowohl die technisch einwandfreie Durchführung des Betriebes erschwert, als auch die Wirtschaftlichkeit in Frage gestellt wird.

8. Gesichtspunkte betr. die Wahl des mit den Schienen zu verbindenden Maschinenpols.

Die Frage der Wahl der Polarität der Schienen ist eine sehr heikle, die, soweit uns bekannt ist, in keinen behördlichen Vorschriften allgemein gültig geregelt worden ist. Auch wir sind der Meinung, dass eine allgemein gültige Vorschrift nach welcher der Anschluss des positiven oder negativen Maschinenpols an die Schienen *vorgeschrieben* würde nicht zu empfehlen ist, da in jedem Falle die örtlichen Verhältnisse berücksichtigt werden sollten. Nach welchen Gesichtspunkten dies geschehen kann möchten wir nachfolgend auseinandersetzen.

Betrachten wir den schon auf Seite 288 ff. untersuchten einfachen Belastungsfall einer unverzweigten Bahnlinie die durch den Strom vieler Strassenbahnwagen gleichmässig belastet sei und nehmen wir an, dass ein Maschinenpol am einen Ende der Linie angeschlossen

¹⁾ Bericht des Herrn Sieber über die Anwendung des Dreileitersystems bei Strassenbahnen.

sei. Es wird sich dann eine Potentialverteilung nach Fig. 25 einstellen. Die höchste Potentialdifferenz zwischen den Schienen und der neutralen Zone tritt dann am Anschlusspunkt des Schienenspeisekabels auf. Diese Potentialdifferenz ist, wie aus Gleichung (15) hervorgeht doppelt so gross als diejenige am andern Endpunkt der Teilstrecke, wir haben also in diesem speziellen Belastungsfall ein Interesse daran, dass die grössere Spannungsdifferenz im Einzugsgebiet der Erdströme auftritt, was der Fall sein wird wenn der positive Maschinenpol an die Schienen angeschlossen wird.

In grossen komplizierten Netzen ändern sich allerdings die Verhältnisse gegenüber diesem einfachen Belastungsfall, so dass der von uns für diesen Fall empfohlene Anschluss des positiven Maschinenpols mit den Schienen nicht ohne weiteres verallgemeinert werden darf. Oft wird der Fall eintreten bei welchem an ein stark verzweigtes inneres Stadtnetz mehrere Aussenlinien anschliessen und bei welchem ein oder mehrere energieliefernde Werke sich im Stadtgebiet befinden. In diesem Falle werden oft die Spannungen im Stadtgebiet, wo sich auch die Anschlusspunkte der meisten Schienenspeisekabel befinden werden, wegen der dort stärkeren Verzweigung der Linien und der damit verbundenen Reduktion der Spannungen zwischen Schiene und neutraler Zone nicht grösser, oft sogar kleiner als in den Aussenlinien sein, so dass unter Umständen die Wahl des negativen Maschinenpols zum Anschluss an die Schienen angezeigt sein könnte.

Bekanntlich wird bei einem Gleichstromlichtbogen der den positiven Pol bildende Leiter durch den Lichtbogen stärker angegriffen als der den negativen Pol bildende Leiter. Um nun die Abnutzung des Fahrdrachts durch den, durch Schlagen des Stromabnehmers verursachten Lichtbogen auf ein Minimum zu reduzieren und auf die leicht auswechselbaren Schleifkontakte oder Rollen abzuwälzen, ist der Anschluss des positiven Pols an die Schienen zu empfehlen. Von ausschlaggebender Bedeutung wird aber dieser Grund wohl kaum sein.

Neben diesen und ähnlichen allgemeinen und prinzipiellen Ueberlegungen werden aber oft, wir können sogar sagen meistens, praktische Gesichtspunkte stärker in die Wagschale fallen. Als solche nennen wir beispielsweise folgende Fälle:

Bei Anschluss des negativen Maschinenpols an die Schienen wird hauptsächlich die Umgebung der Stromwerke gefährdet sein. Befinden sich diese, wie das oft der Fall sein wird, im Stadtgebiete, so sind Rohrleitungen und Kabel dort am meisten gefährdet. Nun bringen aber Fehler an Leitungen in diesem Gebiete im allgemeinen grössere Störungen mit sich als in den äusseren Gebieten, auch sind die Kosten für Reparaturen allgemein im verkehrsreichen Stadtgebiet grösser und bringen auch grössere Verkehrsstörungen mit sich als ausserhalb desselben. Von diesem Gesichtspunkte aus, und derselbe wird oft ausschlaggebend sein, ist der Anschluss des positiven Maschinenpols an die Schienen zu empfehlen.

Anders verhält es sich aber bei Bahnnetzen bei welchen an ein verzweigtes Stadtnetz mit im allgemeinen nur kurzen Aussenlinien eine lange Aussenlinie anschliesst. Würde hier der positive Maschinenpol mit den Schienen verbunden um die Gefahrzone in die lange Aussenlinie zu verlegen wo vielleicht in den von der Stadt weiter abliegenden Teilen keine Rohrleitungen oder Kabel vorhanden sind, so müsste der gesamte Erd- und Rohrstrom des Stadtgebietes sich in dieser Linie sammeln und der letztere müsste die Rohre da verlassen wo dieselben aufhören, so dass dieselben in kürzester Frist zerstört werden müssten, auch dann wenn sie noch im Einzugsgebiet liegen sollten. Hier wird also der Anschluss des negativen Pols an die Schienen zu empfehlen sein.

Bei der Wahl der Polarität der Schienen ist auch auf die Lage der Rohrleitungen und Kabel zu achten. So sollte vermieden werden, dass sich in der Nähe eines Sammelpunktes der Schienenströme auch ein solcher von Rohrleitungen (wichtige Reservoirs, Pumpstationen, Gaswerke usw.) oder Kabel (grössere Energieverteilpunkte usw.) befinden. Liegt also beispielsweise ein Stromwerk für die Strassenbahn in der Nähe solcher Punkte, so ist für dieses der Anschluss des positiven Pols an die Schienen zu empfehlen.

Die hier zitierten Beispiele sind keineswegs erschöpfend, das ist auch bei der grossen Mannigfaltigkeit der Anordnungen gar nicht möglich, sie zeigen aber welche Gesichtspunkte bei der Wahl der Polarität der Schienen massgebend und zu berücksichtigen sind.

9. Periodischer Polwechsel.

Wie wir bereits gesehen haben, setzt ein häufiger Polwechsel, von etwa 5 pro Minute, die Elektrolyse von Metallen auf ein unmessbar kleines Mass herunter. Versuche des Bureau of Standards ¹⁾ haben nun gezeigt, dass auch bei einem viel langsameren Wechsel die Menge des elektrolytisch aufgelösten Eisens viel kleiner ist als bei dauernd gleichgerichtetem Strom. So hat beispielsweise eine täglich einmalige Stromumkehr eine *4 mal* kleinere Gefährdung der eisernen Rohrleitungen zur Folge. Durch einen einmaligen täglichen Polwechsel, der bei Strassenbahnen, die nur von einem Stromwerk gespiesen werden, wohl leicht durchführbar wäre, könnte also die Korrosionsgefahr für Rohrleitungen herabgesetzt werden. Wir möchten aber diese Massnahme nicht für sich allein angewendet wissen, etwa um damit einer Verbesserung der Schienen- und Schienenspeisekabelanlage auszuweichen; sie sollte vielmehr nur neben einer solchen Verbesserung zur Anwendung kommen und wird dann gute Dienste leisten.

10. Bau neuer Stromwerke.

Der Bau neuer Stromwerke wird zur Verbesserung der Korrosionsverhältnisse dann immer in Frage kommen, wenn die Speisedistanzen gross werden. Oft wird die Frage nur vom Standpunkte der Fahrdrachtspeiseleitungen verfolgt, indem die Stromleitung in den Schienen und Schienenspeisekabeln nicht näher untersucht wird. Es haben dann die ersteren unter Umständen viel zu grosse Ströme zu führen, und es ergeben sich damit für die Rohrleitungen gefährliche Verhältnisse.

Durch den Bau neuer Stromwerke wird oft die Verlegung längerer Kabel vermieden, ebenso werden die Verluste für die Energieübertragung herabgesetzt und es ergeben sich bessere Spannungsverhältnisse. Demgegenüber stehen die Kosten für den Bau des Stromwerkes und die Kosten für die Bedienung desselben. Eine Wirtschaftlichkeitsrechnung wird in jedem einzelnen Falle zeigen, welche der beiden Lösungen, Bau des Werkes oder Verlegung neuer Kabel, in Frage kommt, wobei selbstverständlich auch eventuellen späteren Erweiterungen oder Vermehrung des Verkehrs Rücksicht getragen werden sollte.

Die Zusammensetzung der Einzelfehler der Messwandler zum resultierenden Fehler des Messaggregates in Drehstromnetzen und die daraus resultierende zweckmässige Anordnung der Wandler.

Von Dr. J. Goldstein, Dipl.-Ing., Zürich.

1. Zweck der Arbeit.

Bekanntlich wird von „Messwandlern“ eine grosse Genauigkeit in Bezug auf Uebersetzungsverhältnis und Phasenverschiebung verlangt. Werden Messwandler mit einem gut einregulierten Zähler verwendet, dessen Fehler ganz unbedeutend sind, so treten infolge der „Fehlwinkel“ der Wandler und der Abweichungen vom idealen Uebersetzungsverhältnis noch zusätzliche Fehler auf. Es soll nun im Folgenden auf Grund der gegebenen Fehlwinkel und Fehler im Uebersetzungsverhältnis der resultierende Fehler einer Messeinrichtung im Drehstromnetz nach der Aron'schen Schaltung ausgerechnet werden. Sind die Fehler, die amtlich geprüfte Wandler verursachen können wegen der engen Toleranzgrenzen an und für sich klein, so kann der resultierende Fehler einer Messgruppe in ungünstigen Fällen, wo sich die Einzelfehler addieren, dennoch einen merklichen Betrag erreichen. Unter Umständen lässt sich der Fehler durch eine zweckmässige Verteilung der Wandler vermindern. Jedenfalls sollte die Kenntnis des resultierenden Fehlers für jeden Betrieb von Interesse sein, besonders in den Fällen, wo noch alte Wandler verwendet werden. In solchen Fällen wird

¹⁾ Technologic paper No. 52, Seite 89 ff.