

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band:	11 (1920)
Heft:	10
Artikel:	Die Methoden zur Untersuchung der Korrosionsverhältnisse bei elektrischen Bahnen, allgemeine Ergebnisse solcher bei schweizerischen Strassenbahnen und die Mittel zur Verbesserung
Autor:	Zangerer, H.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-1061808

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: 16.01.2026

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 - Telephon: 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 Telephon Selnau 7016

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

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 - Telephon: 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

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. 10

October
Octobre 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. Zanger.

I. Einleitung.

Nachdem schon in unserem ersten Bericht: „Die Korrosion durch Erdströme elektrischer Bahnen“, ¹⁾ die Entstehung der korrodierenden Ströme und die Art und Grösse der praktisch auftretenden Korrosionserscheinungen und ihrer Ursachen behandelt worden ist, hat der Schweizerische Elektrotechnische Verein (S. E. V.) durch sein Generalsekretariat, in Ausführung des im ersten Berichte ²⁾ mitgeteilten Arbeitsprogrammes der Korrosionskommission, Messungen in den Strassenbahnnetzen von Zürich, Lausanne, Neuenburg, Bern und Basel vorgenommen ³⁾ und für jede dieser Städte einen besonderen Bericht über die Ergebnisse der Untersuchungen mit den Messresultaten und mit Vorschlägen zur Verbesserung der Verhältnisse ausgearbeitet zu handen der Kommission und den interessierten Verwaltungen der Strassenbahnen, Gas- und Wasserwerke. Die bei Anlass dieser Untersuchungen gesammelten Erfahrungen über Mess- und Berechnungsmethoden und über mögliche verbessende Massnahmen sind, soweit sie allgemeines Interesse beanspruchen können, im folgenden Berichte wiedergegeben.

Die Messungen wurden durch das Generalsekretariat des S. E. V. mit eigenem Personal unter wesentlicher Mitarbeit der Materialprüfanstalt des S. E. V. in den Jahren 1919

¹⁾ Im Verlag von Rascher & Cie., Zürich zu beziehen.

²⁾ I. Bericht der Korrosionskommission, Bulletin 1918, Seite 136.

³⁾ Ein Teil dieser Untersuchungen steht zurzeit noch aus.

und 1920 ausgeführt. Zweck dieser Untersuchungen war neben der Ermittlung der Verhältnisse der Korrosion und der Massnahmen zu ihrer Verminderung, die Ueberprüfung bereits bekannter und in der Literatur beschriebener Mess- und Berechnungsmethoden auf ihre praktische Brauchbarkeit und Zuverlässigkeit und ihre allfällige Verbesserung, wie auch die Feststellung besonderer Schwierigkeiten und zu beobachtender Vorsichtsmassregeln bei den Messungen.

II. Die angewendeten Messmethoden.

1. Mittelwerte.

Bei den elektrischen Größen, die mit dem Strassenbahnbetrieb schwanken und für die Korrosion in Betracht kommen, spielen die *Mittelwerte* sowohl für die Messung wie für die Wirkung die ausschlaggebende Rolle. Das gilt sowohl für die Rohr- wie Schienenströme und so auch für die durch sie erzeugten Spannungsunterschiede im Rohr- und Schienennetz und zwischen beiden.

Im allgemeinen lässt sich der Mittelwert einer Messgrösse über eine bestimmte Zeit mit einem registrierenden Instrument durch planimetrieren des Registrierstreifens auf bekannte Art ermitteln. Gerade für die Messung sehr kleiner Spannungsdifferenzen gibt es aber keine käuflichen Registrierinstrumente, und Spezialinstrumente waren, abgesehen von den hohen Kosten, in letzter Zeit nicht erhältlich. Um nun für die Messungen über die Verwendbarkeit gewöhnlicher Zeigerinstrumente ein Urteil zu bekommen, wurden probeweise gleichzeitig Messungen mit einem registrierenden und einem Zeigerinstrument gemacht, indem letzteres alle 10 Sekunden abgelesen und der algebraische Mittelwert aller Ablesungen gebildet wurde. Die Messungen zeigten, dass die Differenzen zwischen dem Mittelwerte des Registrierinstrumentes und demjenigen des Zeigerinstrumentes nicht mehr als $4 \div 5\%$ betrugen. Wurden dagegen Ablesungen nur alle 20 Sekunden gemacht, so erhöhte sich der Fehler auf zirka 10 %. Wo es auf eine genaue Bestimmung der Mittelwerte ankommt, muss, wie Versuche zeigten, etwa eine Stunde lang so gemessen werden und ausserdem der Mittelwert auf einen bestimmten Normalbetrieb oder auf den täglichen Mittelwert reduziert werden.¹⁾ Nur dann können verschiedene Mittelwerte kombiniert oder genau verglichen werden. Da aber solche Messungen viel Zeit in Anspruch nehmen und es auch oft gar nicht auf so grosse Genauigkeit ankommt, besonders wenn die Messresultate mehr orientierenden Charakter haben und keine weiteren Rechnungen damit ange stellt werden, genügen in solchen Fällen auch kürzere Messzeiten. Das ist beispielsweise bei Spannungsmessungen zwischen Schienen und Rohren, aber auch oft bei Messung von Spannungsunterschieden im Geleise- und Rohrnetz und bei Schienen- und Rohrströmen der Fall. Hiezu genügt es, wenn über die Dauer einer bis zweier charakteristischer Betriebsperioden des Strassenbahnbetriebes gemessen wird. Als Dauer einer solchen können wir die Zeit bezeichnen, die zwischen zwei gleichen Wagenstellungen verstreicht; dieselbe kann aus dem Fahrplan ermittelt werden. Messungen über mehrere Betriebsperioden haben ergeben, dass die Mittelwerte einzelner Perioden stark voneinander abweichen können. Diese Abweichungen röhren von unvermeidlichen Betriebsunregelmässigkeiten her und sind natürlich besonders da gross, wo Werte um Null herum pendeln. Aber auch an Orten mit eindeutig gerichteten Größen weichen die Mittelwerte einzelner Betriebsperioden von einander ab, wenn auch bedeutend weniger. Immerhin ist auch hier noch je nach Umständen mit Abweichungen von $10 \div 40\%$ zu rechnen.

Die Bestimmung von Mittelwerten des Stroms in Oberleitungs- und Schienenspeisekabeln kann oft mittelst Zähler vorgenommen werden. Sie sind dann, weil leicht über eine längere Periode gemessen werden kann, viel zuverlässiger als die mit Zeigerinstrumenten über kürzere Dauer bestimmten.

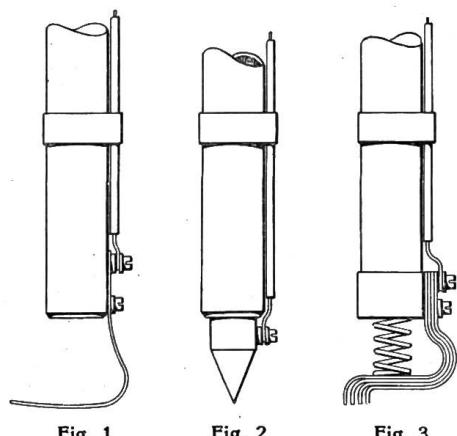
2. Uebergangswiderstände.

Bei Messung kleiner Spannungen ist sehr auf guten Kontakt beim Anschluss der Messinstrumente zu sehen. Der Anschluss eines Drahtes an ein Rohr wird am besten

¹⁾ Vergl. auch Technologic paper No. 54 of the Bureau of Standards, pag. 23 ff.

folgendermassen hergestellt: Das blanke Drahtende wird in Staniolpapier eingewickelt und fest an das vorher blankgefeilte Rohr gepresst, beispielsweise durch Drahtumwicklung des Ganzen. Auf diese Weise erhält man einen besseren Kontakt als durch blosses Anpressen des blanken Drahtes an die blanke Rohroberfläche. Ein dauernder Anschluss wird nach Larsen und Faber¹⁾ am besten mittelst eines Messingnippels hergestellt, der in der Rohrwandung eingeschraubt und in welchem die Kupferseele eines eisenbandarmierten Bleikabels eingelötet wird. Der Widerstand des Kabels ist vor der Verlegung zu messen.

Der Kontakt eines Drahtes an Wasserleitungsrohren muss auf der Strasse, wenn nicht der Boden aufgegraben werden soll, an Hydranten vorgenommen werden. Das Aufschrauben eines Standrohres mit angelötetem Spannungsdräht an dieselben gibt oft fehlerhafte Resultate, weil, wie beispielsweise aus Fig. 14 ersichtlich ist, die Stromleitung der Gummidichtung wegen durch die oft angerosteten Flanschenschrauben übernommen werden muss. Einen bedeutend besseren und sichereren Kontakt erhält man durch blankschmiegeln des messingenen Vierkantkopfes der Schraubenspindel an den der Draht mittelst Schraubzwinge aufgeklemmt wird. Messungen an 10 verschiedenen Hydranten zeigten, dass die Widerstände derselben allerdings ziemlich stark voneinander abweichen können, dass sie aber alle so klein sind, dass sie in der Regel bei Spannungsmessungen mit einem hochohmigen Voltmeter vernachlässigt werden können. So betrug der Mittelwert der 10 Hydrantenwiderstände 0,0036 Ohm, der kleinste Widerstand 0,0006, der grösste 0,028 Ohm. Die Hydranten waren dabei in allen Fällen geschlossen.



Der Kontakt eines Drahtes an die Schienen ist nur dann einwandfrei, wenn die letzteren vorher blankgemeisselt werden. Ein blankschmiegeln der Schienenoberfläche mit Schmirelpapier genügt nicht. In den Schienenkopf wird eben durch jeden Tramwagen der Strassenschmutz förmlich als eine darauf festhaftende und schlecht leitende Schicht eingewalzt, die durch schmiegeln auch bei scheinbar blanke Oberfläche nicht ganz entfernt wird. Als Kontaktstab eignet sich ein solcher nach nebenstehender Figur 3 gut. Derselbe besteht aus Kupferlamellen, wie sie auch für Schalter verwendet werden. Eine einzige glatte Messinglamelle am Kontaktstock, wie Fig. 1 zeigt, ergibt einen unsicheren Kontakt mit hohem Uebergangswiderstand. Eine viel bessere elektrische Verbindung stellt der in Fig. 2 abgebildete

Meisselkontakt her, doch ist der Widerstand desselben infolge der linienförmigen Berührung bei der kleinsten Bewegung in seiner Grösse veränderlich. Sehr deutlich zeigt dies die folgende Tabelle, welche die Mittelwerte einiger diesbezüglicher Messungen enthält:

Resultate der Messung des Uebergangswiderstandes zwischen Schienen und verschiedenen Kontaktarten bei blank geschmiegelter und bei gemeisselter Schienenoberfläche.

Tabelle I

Kontaktstock nach	Fig. 1	Fig. 2	Fig. 2	Fig. 3	Fig. 3
Schienenoberfläche . . .	geschmiegelt	geschmiegelt	gemeisselt	geschmiegelt	gemeisselt
Zahl der Messungen . . .	4	2	2	4	4
Uebergangs- { Mittelwert . .	0,35	0,012	0,018	0,10	0,0035
widerstand in Ohm } Maximalwert . .	0,50	0,024	0,019	0,26	0,008

Beim „gemeisselten“ Kontakt wurde mittelst eines Meissels an der inneren schmalen Kante der Rillenschienen ein kleiner Span abgetrennt. Die Zusammenstellung zeigt deut-

¹⁾ E. T. Z. 1901, Seite 1038 ff.

lich, dass der Kontakt auf blankgemeisselter Schiene am zuverlässigsten ist. Sie zeigt aber ebenfalls, dass der Kontaktstock nach Fig. 3 eine bessere elektrische Verbindung als diejenigen nach Fig. 1 und 2 herstellt.

Bei gleichzeitigen Strom- und Spannungsmessungen muss darauf gesehen werden, dass für die Strom- und die Spannungsmessung getrennte Kontakte gewählt werden, da sonst der durch den Strom im Uebergangswiderstand erzeugte Spannungsabfall mitgemessen wird. Dieser Fehler macht sich besonders bei Messung kleiner Widerstände unangenehm bemerkbar.

3. Berücksichtigung von Messleitungswiderständen.

Bei allen Spannungsmessungen muss ferner wo notwendig, der Widerstand der Messleitungen berücksichtigt werden. Es geschieht dies zweckmässigerweise durch Benützung folgender Formel:

$$V = V' \left(1 + \frac{R_t}{R_i} \right) \quad (1)$$

wobei V die zu messende Spannung, V' die vom Voltmeter angezeigte Spannung, R_t den Widerstand der Zuleitungsdrähte zum Voltmeter und R_i den Voltmeterwiderstand bedeuten.

4. Spannungen zwischen Schienen und Rohrleitungen.

Das Mass für die Rohrgefährdung ist, wie schon in unserem ersten Bericht¹⁾ belegt wurde, die mittlere Rohrstromdichte j . Ein Rohr wird dabei dort angegriffen, wo der Strom dasselbe verlässt. Die Stromdichte j lässt sich schreiben:

$$j = \frac{V}{\Delta r_e}$$

wo V die Spannung zwischen Schienen und Rohr, Δ die Breite der Stromaustrittstelle am Rohr und r_e den Widerstand pro Längeneinheit zwischen Schiene und Rohr bedeuten. Die Gefährdung ist also der *Spannungsdifferenz* zwischen Schiene und Rohr *direkt proportional* und *umgekehrt proportional* dem *Widerstande* zwischen denselben.

Letzterer ist schwer zu bestimmen, er variiert von Ort zu Ort mit der Bodenbeschaffenheit, Feuchtigkeit und Temperatur. Eingehende Untersuchungen über denselben hat das Bureau of Standards in Washington anstellen lassen²⁾; auch wir haben versucht diesen Widerstand zu bestimmen. Von beiden soll noch später die Rede sein.³⁾

Andererseits erlaubt nach Vorstehendem die Kenntnis der Spannungen zwischen Schienen und Rohr allein noch nicht ein bestimmtes Urteil über die Gefährdung von Rohrleitungen abzugeben. So kann beispielsweise eine hohe Spannung wohl durch einen grossen Strom zwischen Schiene und Rohr verursacht sein, sie kann aber ebensowohl von einem hohen Widerstande zwischen diesen beiden herrühren. Dennoch gibt, soweit der Bodenwiderstand ähnlich angenommen werden kann, die Spannung zwischen Schienen und Rohr einen Anhaltspunkt für die Gefährdung. Der höheren Spannung wird im allgemeinen grössere Gefährdung entsprechen. Aus diesem Grunde, weil der Widerstand sehr schwer zu bestimmen ist, haben wir diese Spannungsmessungen als erste Grundlage zur Beurteilung der Verhältnisse vorgenommen.

Die Vorzeichen der Spannungen zwischen Rohr und Schiene beziehen wir, wie allgemein gebräuchlich,⁴⁾ auf die Rohrleitungen, sodass, wenn der Strom von der Rohrleitung zur Schiene fliesst, die erstere ein höheres Potential in bezug auf die letztere besitzt und wir die Spannungsdifferenz mit dem positiven Vorzeichen versehen.

¹⁾ Erster Bericht der Korrosionskommission, Bulletin 1918, Seiten 137 und 138.

²⁾ Technologic paper No. 26, of the Bureau of Standards.

³⁾ Seite 269 ff.

⁴⁾ Vergleiche z. B. Besig, Erdströme und Rohrleitungen und Technologic paper of the Bureau of Standards No. 54.

Die Grössenordnung der Spannungsmittelwerte fanden wir in unseren Städten sehr oft zwischen einigen Zehntel bis ein und zwei Volt, mit extremen Werten nach oben bis zu 10 und sogar 20 Volt. Liegt dabei der negative Maschinenpol an den Schienen, so treten die höheren Spannungen im allgemeinen im Einzugsgebiet auf, ist der positive Pol mit den Schienen verbunden, so ist eine solche Differenz nicht einwandfrei feststellbar.¹⁾ Die Schwankungen der Spannung zwischen Schiene und Rohr um den Mittelwert sind in der Nähe der Schienenspeisekabel, des dort ziemlich konstanten Schienenstromes wegen, kleiner als diejenigen an Aussenstrecken ohne Schienenspeisekabel.

Eine sehr gute Uebersicht erhält man, wenn die Spannungsmittelwerte in einem Plane des Strassenbahnnetzes senkrecht zur Richtung der einzelnen Linien masstäblich aufgetragen und die so erhaltenen Ordinaten-Endpunkte miteinander durch einen Linienzug verbunden werden. Bei Annahme eines konstanten Widerstandes zwischen Schiene und Rohrleitung, welche Annahme allerdings im besten Falle nur approximativ erfüllt sein wird, gibt die Grösse der Fläche, die durch den oben erwähnten Linienzug und den im Plane eingezeichneten Strassenbahnschienen eingegrenzt wird, ein Mass für den Rohrstrom. Eine gewisse Kontrolle, ob obige Annahme zutrifft, erhält man durch planimetrieren der Flächen der Einzugs- und Austrittsgebiete. Diese Flächen müssen gleich gross sein, wenn der Widerstand zwischen Schiene und Rohr im ganzen Netz derselbe ist, da der Strom, der in ein Rohrnetz eingetreten ist, dieses auch wieder verlassen muss.

Die Spannungsmessungen zwischen Schienen und Rohrleitungen lassen manche Schlüsse über die Gefährdung von Rohrleitungen zu, für sich allein haben sie aber mehr orientierenden Charakter, indem sie für weitere Messungen wegleitend werden, welch letztere erst die Unterlagen zu einem definitiven Urteil über die Gefährdung von Rohrleitungen und Kabeln abgeben können.

5. Messung der Spannungsunterschiede im Geleise- und Rohrleitungsnetz.

Zur Messung der Potentialdifferenzen im Schienen- und Rohrleitungsnetz, in welchem die Potentiale auf einen beliebigen Punkt des betreffenden Netzes als Nullpunkt bezogen werden, können bestehende Telephon- oder Signalleitungen der Strassenbahnen, sowie Prüfdrähte in den Schienenspeisekabeln benutzt werden, in Ermangelung solcher auch öffentliche Telephonleitungen.²⁾ Bei unseren Messungen wurden uns diese letzteren in mehreren Städten in zuvorkommender Weise von der Eidgenössischen Telephonverwaltung zur Verfügung gestellt. Wie bei den Spannungsmessungen zwischen Schiene und Rohr kommen auch hier nur Mittelwerte in Betracht und es gilt auch bezüglich der Kontakte das früher Gesagte. Von grossem Einfluss ist hier im allgemeinen der grossen Distanzen wegen der Widerstand der Messleitungen, der je nach Umständen hundert bis einige hundert Ohm betragen kann und daher unter allen Umständen berücksichtigt werden muss. Bei diesen Messungen wird zweckmässigerweise ein Endpunkt der Messleitungen festgehalten und als solcher beispielsweise die Schienen bzw. die Rohre in der Nähe der Telephonzentrale gewählt. Werden Telephonleitungen als Messleitungen benutzt, so kann oft Zeit erspart werden, wenn die Messungen im Geleise- und Rohrnetz gleichzeitig gemacht werden, indem die eine Hälfte der Telephonschläufe zur Messung von Spannungsdifferenzen im Schienennetz, die andere zur Messung derselben im Rohrleitungsnetz verwendet wird.

Die Spannungsdifferenzen im Schienennetz fanden wir je nach dem herrschenden Betriebe, dem verlegten Schienenprofile, der Güte der Schienentossverbindungen und dem Abstande der verschiedenen Punkte, zu Bruchteilen eines Volt bis zu mehreren Volt, in extremen Fällen bis zu 20 und mehr Volt.

Die Spannungsdifferenzen im Rohrleitungsnetz bewegen sich, wie auch zu erwarten ist, innerhalb bedeutend engerer Grenzen und überschreiten selten ein Zehntel der für das Schienennetz angegebenen Werte.

¹⁾ Das bestätigen auch frühere Messungen Besigs in St. Gallen und Genf.

²⁾ Telephonleitungen als Messleitungen benutzte u. a. schon Ulbricht. Vergl. E. T. Z. 1902, Seite 720.

Diese Messungen lassen auch eine Kontrolle der Spannungsmessungen zwischen Rohr und Schiene zu, indem nach Fig. 4 sein muss:

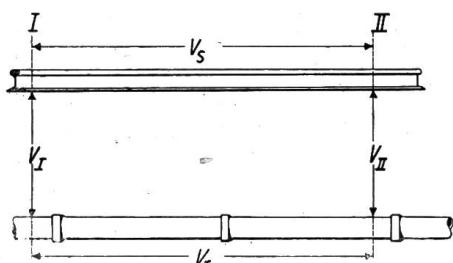


Fig. 4

$$V_s + V_{II} + V_r + V_I = 0 \quad (2)$$

selbstverständlich unter Berücksichtigung der Vorzeichen der verschiedenen Spannungen. Es ist entschieden davon abzuraten, nur drei der in Gleichung 2 angegebenen Spannungen zu messen und die vierte rechnerisch zu bestimmen, da jede einzelne Spannung auch bei sorgfältigen Messungen Fehler von $10 \div 40\%$ aufweisen kann.

Der Spannungsabfall in den Schienen kann auch unter der Annahme, dass der Erdstrom im Vergleich zum

Schienenstrom vernachlässigt werden kann, berechnet werden, wenn die Schienenströme, die Schienen- und Schienenstosswiderstände bekannt sind. Auf diesen Punkt werden wir noch in folgender Nummer zu sprechen kommen. Decken sich Rechnung und Messung schlecht, so sind entweder Schienenstosswiderstände nicht richtig berücksichtigt worden, es ist der Schienenstrom nicht genau bekannt gewesen, oder aber es ist der Erdstrom dem Schienenstrom gegenüber nicht zu vernachlässigen. Den möglichen Fehlerquellen muss nachgespürt werden; wir fanden, dass durch konsequentes Nachforschen und Vergleichen sich weitaus die meisten, wenn nicht alle, Unstimmigkeiten aufklären lassen.

In analoger Art lassen die Spannungsdifferenzen im Rohrnetz Schlüsse zu über die Grösse von Rohrströmen. Wir werden auch davon in folgender Nummer noch sprechen.

6. Schienenwiderstandsmessungen.

Schienenwiderstände werden am besten im Laboratorium an $1 \div 3$ m langen Schienenstücken nach bekannten Methoden bestimmt. Zahlreiche Messungen ergaben als mittleren spezifischen Widerstand von gewöhnlichen Strassenbahnschienen $0,195 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$ mit Abweichungen bis zu $\pm 9\%$. Ist also das Schienenprofil bekannt, so kann der mutmassliche Schienenwiderstand (ohne Berücksichtigung der Stösse) berechnet werden. In vielen Fällen wird das auch genügen, der Sicherheit halber ist aber die Bestimmung des spezifischen Widerstandes sehr zu empfehlen, hauptsächlich an Orten, wo Spezialschienenstähle verwendet werden. Im allgemeinen sinkt die Leitfähigkeit des Stahles mit zunehmender Härte desselben.

Schienenwiderstandsmessungen an verlegten Schienen sind schwierig genau durchführbar. Schickt man einen bekannten Strom nur durch eine Schiene, so wird immer ein Teil desselben durch die andere Schiene des Geleises und durch das zweite Geleise fließen und man misst tatsächlich einen kleineren als den gewünschten Schienenwiderstand. Genauer wird die Messung, wenn die zwei Schienen eines Geleises gleichzeitig belastet werden; es geht aber auch dann noch ein, im allgemeinen allerdings kleinerer Teilstrom durch das etwa vorhandene zweite Geleise. Derselbe kann aber gewöhnlich wohl vernachlässigt werden.

Wenn man den Strom des ganzen Geleises nach nebenstehendem Schaltungsschema (Fig. 5) misst, so kann man, wie leicht gezeigt werden kann, bei Annahme eines in beiden Schienen des Geleises gleichen Schienenwiderstandes pro Längeneinheit, diesen Widerstand nach folgender Formel berechnen:

$$r_s = \frac{1000 V_I}{J \cdot I_I} + \frac{1000 V'_{II}}{J' \cdot I_{II}} \quad (3)$$

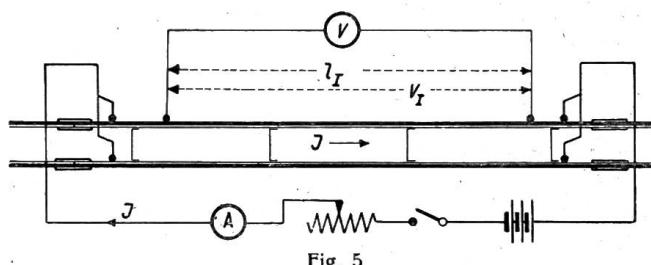


Fig. 5

wobei J bzw. J' den totalen Geleisestrom in Ampere während der Messung des Spannungsabfalles in Schiene I bzw. II ; V_I bzw. V'_{II} die bei dem Geleisestrome J bzw. J' an der Schiene I bzw. II über der Länge I_1 bzw. I_{II} vorhandene Spannungsdifferenz; I_1 bzw. I_{II} die Längen der Schienenstücke in Meter, über welchen die Spannungen V_I bzw. V'_{II} gemessen wurden und r_s den Schienenwiderstand in Ohm pro km bedeuten. Auf diese Weise haben wir die Widerstände einer ganzen Anzahl verlegter Schienen bestimmt, deren Mittelwert bis auf 4 % mit dem im Laboratorium bestimmten Schienenwiderständen übereinstimmte. Einzelwerte zeigten grössere Abweichungen bis zu 15 %, die zum Teil durch abgefahrenen Schienen, zum Teil durch in der Methode liegende Fehler bedingt waren. Jedenfalls zeigen aber diese Ergebnisse eindeutig, und das war auch nur der Zweck der Messungen, dass Schienenwiderstandsbestimmungen im Laboratorium, die weit einfacher und sicherer durchführbar sind, den tatsächlichen Verhältnissen entsprechende Resultate liefern.

7. Schienenstosswiderstandsmessungen.

Die untersuchten Schienenstossverbinder sind in den Fig. 6-9 dargestellt, ausserdem wurden auch Widerstände geschweisster Stösse bestimmt. Der in Fig. 6 dargestellte bekannte Kupferdrahtverbinder verbindet die beiden Schienenenden durch einen Kupferdraht von meistens 8 mm Durchmesser über den Laschen. Die Verbindung mit den Schienen wird hergestellt, indem ein runder, etwas konischer Stahlkeil in die konisch ausgebohrte Oeffnung einer am Ende des Kupferdrahtes befindlichen Kupferniete von zirka 12 mm Durchmesser eingetrieben wird. Auf diese Weise wird ein guter, mechanisch fester Kontakt hergestellt. Eine ebenfalls bekannte, jedoch in der Schweiz etwas seltener angewendete Verbindung zeigt Fig. 7. Sie besteht aus mehreren schmalen Kupferbändern, die in Kupfernieten, welche zugleich die Verbindung mit den Schienen herstellten, festgehalten werden. Diese Verbindung wird unter der Lasche verlegt und kann infolgedessen kürzer als die letztbeschriebene gehalten werden, auch ist ihr Querschnitt (meistens 80 mm²) in der Regel grösser. Diesem Vorteil steht der Nachteil gegenüber, dass eine Kontrolle und das Auswechseln derselben nicht so leicht durchführbar sind wie bei der erstbeschriebenen Verbindung.

Eine weitere bekannte Verbindungsart, die auf einem ganz anderen Prinzipie beruht, stellt die in Fig. 8 abgebildete, in der Schweiz vielfach verwendete Edision-Brown-Verbindung dar. Hier werden die Laschen ausschliesslich zur Stromleitung benutzt. Zur Erreichung eines guten elektrischen Kontaktes zwischen Schiene und einer der beiden Laschen werden zwischen diese beiden (an blank gereinigten Stellen) zwei gut dichtende, mit grossem Loch versehene Korkplatten eingepresst, welche mit einer Amalgampaste ausgefüllt sind. Durch diese Paste, die vermittelst eines eingeklemmten Federringes fest an Schiene und Lasche gepresst wird, wird eine gutleitende, dauerhafte Verbindung hergestellt. Die in Fig. 9 dargestellte Schienenschuhverbindung verbindet den Vorteil elektrischer Stromleitung mit demjenigen grösserer mechanischen Festigkeit. Die elektrische Verbindung wird erreicht, indem der Schienenschuh im rotwarmen Zustande unter Zwischenlegen einer Zinkblecheinlage, die dabei zum Teil schmilzt, an den blank gereinigten Schienenfuss gelegt und mittelst eines Stahlkeiles festgeklemmt wird. Oft werden die beiden letzterwähnten Stossverbindungsarten zusammen angewendet und ergeben dann eine vorzügliche und mechanisch feste, aber teure Schienenverbindung.

Der wirkliche Schienenstosswiderstand R'_{st} ist nur sehr schwer, wenn überhaupt sicher messbar. Betrachten wir z. B. die Kupferdrahtverbindung der Fig. 6, die schematisch in Fig. 10 wiedergegeben ist und bezeichnen wir mit: R'_{st} den wirklichen Schienenstosswiderstand, R_{cu} den Widerstand des Kupferdrahtes, R'_{cu} den Uebergangswiderstand zwischen Kupferdraht und Schiene, R_{la} den Widerstand einer Lasche, R'_{la} den Uebergangswiderstand zwischen Schiene und Lasche, r_s den Schienenwiderstand pro Längeneinheit, I_1 bzw. I_2 die Schienenlänge zwischen den Berührungs punkten von Kupferdraht bzw. Lasche mit den Schienen so ist:

$$\frac{1}{R'_{st}} = \frac{1}{R_{cu} + R'_{cu}} + \frac{1}{2 r_s (I_1 + I_2) + R_{la} + R'_{la}}$$

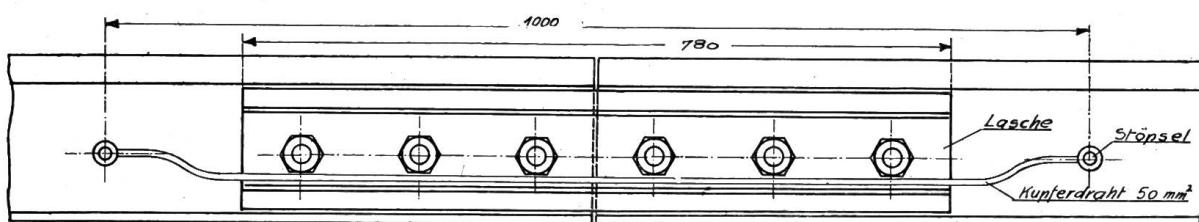


Fig. 6
Kupferdrahtverbinder.

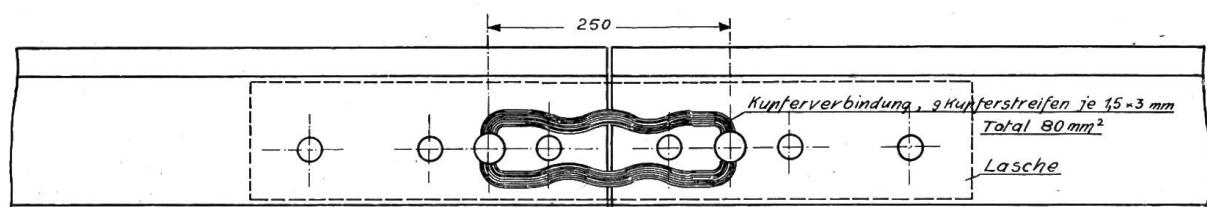


Fig. 7a
Kupferbandverbinder.

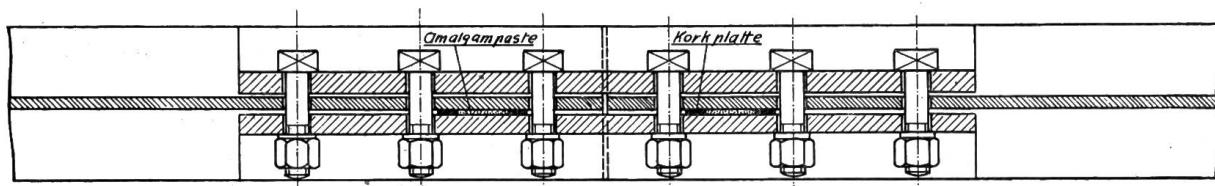


Fig. 8a.
Edison-Brown Schienenverbindung.

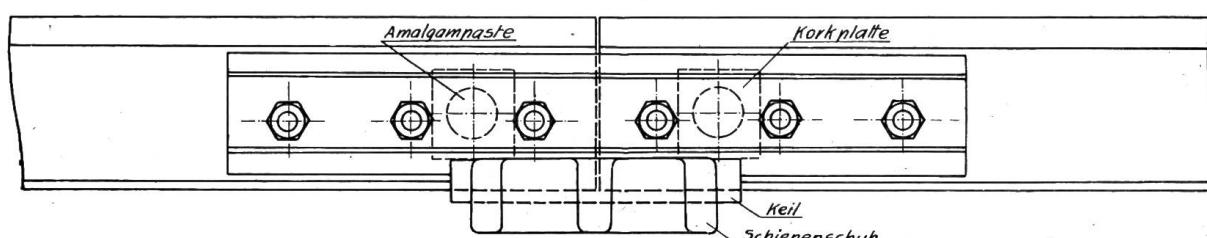


Fig. 8a und 9a.
Schienenschuh- und Edison-Brown Verbindung.

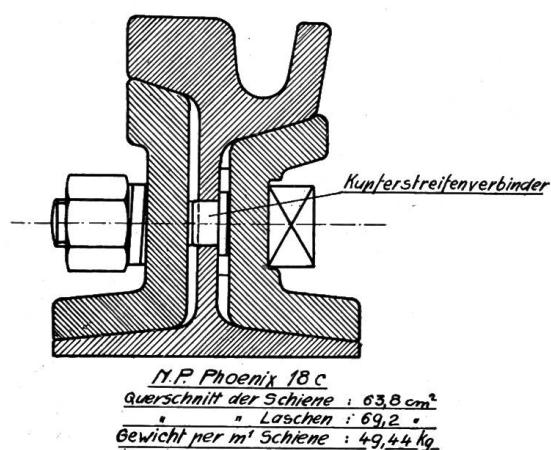


Fig. 7b
Kupferbandverbinder.

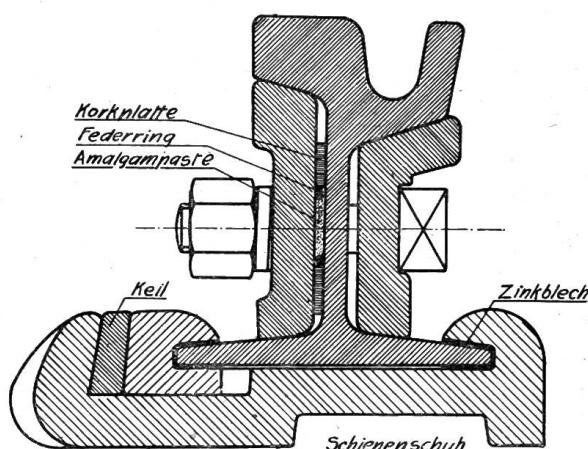


Fig. 8b und 9b
Schienenschuh- und Edison Brown Verbindung.

Für die anderen Verbindungsarten lassen sich analoge Formeln ableiten. Diese zeigen alle, daß von einer Berechnung des Stosswiderstandes R'_{st} , schon der gar nicht zu vernachlässigenden Uebergangswiderstände wegen, nicht die Rede sein kann. Auch bei der direkten Messung von R'_{st} stösst man auf Schwierigkeiten, indem man nicht von vornherein weiß, über welche Länge der Stosswiderstand zu messen ist. Man könnte daran denken, als solche Länge den Abstand der Anschlusspunkte des Kupferverbinder zu wählen. Abgesehen davon, dass dann der Stosswiderstand bei verschiedenen Verbindungsarten über verschiedene Längen gemessen werden müsste, was sicher unerwünscht sein würde, zeigen auch unsere Messungen und Berechnungen, wie wir noch belegen werden, dass in fast allen Fällen der grösste Teil des Schienenstromes seinen Weg durch die Laschen und nur mit einem kleinen Teil durch die Kupferverbinder nimmt. Messen wir den Stosswiderstand über der ganzen Laschenlänge, so machen wir wieder einen Fehler, indem die Lasche im allgemeinen den ganzen Schienenstrom nicht auf ihrer ganzen Länge führt, auch bleibt dann der im allgemeinen allerdings kleinere Teilstrom im Kupferverbinder unberücksichtigt. Der wirkliche Stosswiderstand von geschweissten Stössen ist auch nur soweit bestimmbar, als wir den Widerstand eines Stosses mit demjenigen von zwei anschliessenden Schienenstücken messen können. Bringen wir dann den Widerstand dieser zwei anschliessenden Schienenstücke, den wir nach den im vorhergehenden Abschnitt gemachten Angaben leicht berechnen können, vom gemessenen Widerstand in Abzug, so ist diese Differenz gleich dem wirklichen Widerstande des geschweissten Stosses. Es liegt nahe, diese Messungsart auch auf alle anderen Stossverbindungsarten anzuwenden, wobei die Länge der beiden an den Stoss anschliessenden Schienenstücke, entsprechend der grössten halben Länge einer Stossverbindung, zu etwa je 50 cm gewählt werden sollte. Diesen Widerstand, den wir im Gegensatz zum *wirklichen Stosswiderstand* R'_{st} etwa als *ideellen Stosswiderstand* R_{st} bezeichnen können, wollen wir im folgenden kurz mit Stosswiderstand bezeichnen. Wir können den Widerstand einer Geleisestrecke R_g aus dem Schienenwiderstande $R_s = r_s \cdot l$ und der Summe der Stosswiderstände R_{st} wie folgt berechnen:

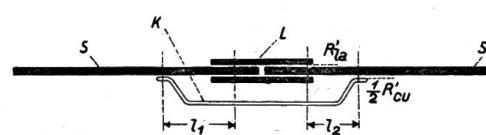


Fig. 10

K = Kupferverbinder
L = Lasche
S = Schiene

solche Länge den Abstand der Anschlusspunkte des Kupferverbinder zu wählen. Abgesehen davon, dass dann der Stosswiderstand bei verschiedenen Verbindungsarten über verschiedene Längen gemessen werden müsste, was sicher unerwünscht sein würde, zeigen auch unsere Messungen und Berechnungen, wie wir noch belegen werden, dass in fast allen Fällen der grösste Teil des Schienenstromes seinen Weg durch die Laschen und nur mit einem kleinen Teil durch die Kupferverbinder nimmt. Messen wir

den Stosswiderstand über der ganzen Laschenlänge, so machen wir wieder einen Fehler, indem die Lasche im allgemeinen den ganzen Schienenstrom nicht auf ihrer ganzen Länge führt, auch bleibt dann der im allgemeinen allerdings kleinere Teilstrom im Kupferverbinder unberücksichtigt. Der wirkliche Stosswiderstand von geschweissten Stössen ist auch nur soweit bestimmbar, als wir den Widerstand eines Stosses mit demjenigen von zwei anschliessenden Schienenstücken messen können. Bringen wir dann den Widerstand dieser zwei anschliessenden Schienenstücke, den wir nach den im vorhergehenden Abschnitt gemachten Angaben leicht berechnen können, vom gemessenen Widerstand in Abzug, so ist diese Differenz gleich dem wirklichen Widerstande des geschweissten Stosses. Es liegt nahe, diese Messungsart auch auf alle anderen Stossverbindungsarten anzuwenden, wobei die Länge der beiden an den Stoss anschliessenden Schienenstücke, entsprechend der grössten halben Länge einer Stossverbindung, zu etwa je 50 cm gewählt werden sollte. Diesen Widerstand, den wir im Gegensatz zum *wirklichen Stosswiderstand* R'_{st} etwa als *ideellen Stosswiderstand* R_{st} bezeichnen können, wollen wir im folgenden kurz mit Stosswiderstand bezeichnen. Wir können den Widerstand einer Geleisestrecke R_g aus dem Schienenwiderstande $R_s = r_s \cdot l$ und der Summe der Stosswiderstände R_{st} wie folgt berechnen:

$$\left. \begin{aligned} R_{gI} &= \frac{r_s l}{2} + \frac{1}{\frac{1}{\sum R_{stI}} + \frac{1}{\sum R_{stII}}} && \text{für eingleisige Strecken und} \\ R_{gII} &= \frac{r_s l}{4} + \frac{1}{\frac{1}{\sum R_{stI}} + \frac{1}{\sum R_{stII}} + \frac{1}{\sum R_{stIII}} + \frac{1}{\sum R_{stIV}}} && \text{für zweigleisige} \\ &&& \text{Strecken} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Ist: $\sum R_{stI} = \sum R_{stII} = \sum R_{stIII} = \sum R_{stIV} = \sum R_{st}$

was bei Projektierung immer angenommen werden muss, im Betrieb meistens angenommen werden kann, so vereinfachen sich obige Formeln zu:

$$\left. \begin{aligned} R_{gI} &= \frac{1}{2} (r_s l + \sum R_{st}) && \text{für eingleisige Strecken und} \\ R_{gII} &= \frac{1}{4} (r_s l + \sum R_{st}) && \text{für zweigleisige Strecken} \end{aligned} \right\} \quad (4a)$$

Es ist allgemein gebräuchlich den Stosswiderstand nicht in Ohm, sondern durch die Länge eines Schienenstückes l_s (vom Profil der den Stoss bildenden Schienen) von gleichem Widerstande auszudrücken. Tun wir das, so können wir den Geleisewiderstand auch folgendermassen schreiben:

$$\left. \begin{aligned} R_{gI} &= \frac{r_s}{2} (I + \sum I_s) \text{ für eingeleisige Strecken und} \\ R_{gII} &= \frac{r_s}{4} (I + \sum I_s) \text{ für zweigeleisige Strecken.} \end{aligned} \right\} \quad (4b)$$

Den Stosswiderstand R_{st} können wir folgendermassen definieren: *Wir bezeichnen als (ideellen Schienen-)Stosswiderstand den Widerstand von zwei Schienenstücken, zwischen denen ein Stoss liegt, abzüglich des Widerstandes der beiden Schienenstücke.*

Die Messung von Stosswiderständen erfolgt nun am einfachsten durch Vergleich derselben mit dem Widerstande eines fortlaufenden Schienenstückes nach der in Fig. 11 abgebildeten Schaltung.

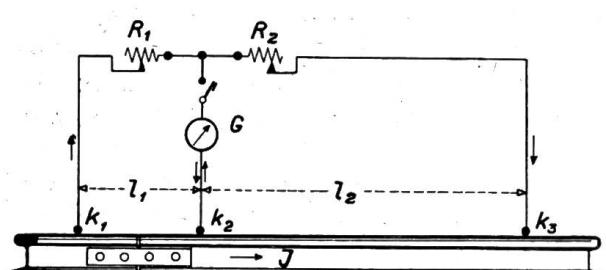


Fig. 11

Es ist dann, wenn die Widerstände R_1 und R_2 so abgepasst werden, dass der Galvanometerstrom Null wird, die Länge I_s einer Schiene, deren Widerstand demjenigen eines Stosses entspricht, nach obiger Definition des Stosswiderstandes gleich:

$$I_s = I_1 \left(\frac{R_2}{R_1} - 1 \right) \quad (5)$$

Die Länge I_1 wird dabei zweckmässigerweise zu 1 m gewählt. Es ist besser, die drei

Kontakte k_1 , k_2 und k_3 mittelst eines Meissels wie auf Seite 253 angegeben, herzustellen und nur die Widerstände R_1 und R_2 zu verändern, anstatt diese beiden letzteren konstant und einander gleichzuhalten und den Kontakt k_3 zu verschieben, bis das Galvanometer keinen Ausschlag mehr zeigt, wie das in der Literatur vielfach angegeben wird.¹⁾ Immerhin soll keiner dieser Widerstände soweit verkleinert werden, dass Uebergangswiderstände ihnen gegenüber in Betracht fallen. Abgesehen davon, dass die Einstellung der Widerstände mindestens ebenso rasch vorgenommen werden kann, wie die Herstellung von mehreren guten Kontaktstellen für den Punkt k_3 auf dem Geleise, hat man im ersten Falle sicher kleine und in der Grössenordnung gleich grosse Uebergangswiderstände an den drei Kontaktstellen. Die Messung kann entweder mit dem Betriebsstrom oder bei künstlicher Strombelastung der Schienen vorgenommen werden, wobei die letztere Art der Stosswiderstands-messung jedenfalls dann vorteilhafter ist, wenn die Widerstände von ganzen Geleisestrecken zu messen sind, und auch wenn der Betriebstrom einer Schiene kleiner als $10 \div 20$ Ampere ist.

Der Widerstand der Kupferdrahtverbindung nach Fig. 6 berechnet sich, ohne Berücksichtigung der Uebergangswiderstände, zu 0,00037 Ohm. Das allein entspricht schon dem Widerstande einer 12 m langen Schiene vom Normalprofil Phoenix 18 c. Dazu kommt noch der Uebergangswiderstand, der sich nicht vorausberechnen lässt. Er wird aber, wie wir an Hand eines Artikels von F. Kraus²⁾ schätzen, etwa von derselben Grössenordnung sein. Diese Zahlen allein zeigen uns, dass ein Stoss, der den Schienenstrom mit dieser Verbindung allein übernehmen soll, einen unzulässig grossen Widerstand aufweisen wird. Die Resultate von 32 Schienenstossmessungen ergeben, dass die mit diesem Kupferdrahtverbinder hergestellten Stösse im Mittel einen Widerstand gleich 1,34 m Schiene aufweisen, mit extremen Werten bis zu 5 Meter, also durchwegs viel kleinere Widerstandswerte als die Kupferdrahtverbindung allein ergeben kann. Es muss daher der grösste Teil des Stromes seinen Weg durch die Laschen und nicht durch den Kupferdrahtverbinder nehmen³⁾. Dieser letztere dient also im besten Falle dazu, den Stosswiderstand nach oben zu begrenzen.

¹⁾ Besig, Erdströme und Rohrleitungen, Seite 30, Fig. 4, und Milchalke, Die vagabundierenden Ströme elektrischer Bahnen, Seite 58.

²⁾ Der Kontaktwiderstand, Elektrotechnik und Maschinenbau, 1920, Heft 1.

³⁾ Zum selben Resultat kommt auch das Bureau of Standards; siehe Technologic paper No. 62, pag. 65 und 119.

Der Widerstand der Kupferbandverbindung nach Fig. 7 berechnet sich ebenfalls ohne Berücksichtigung der Uebergangswiderstände, zu 0,000066 Ohm, was dem Widerstande von 2,2 m Schiene vom Profil Phoenix 18 c gleichkommt. Auch hier kommt dazu der Uebergangswiderstand, der schätzungsweise etwa von derselben Grössenordnung wie im vorhergehenden Falle sein dürfte; sodass dieser Verbinder voraussichtlich auch nicht viel besser als der Kupferdrahtverbinder sein wird. Das bestätigen auch Messungen, die für den Kupferbandverbinder einen mittleren Widerstand gleich 6,53 m Schiene ergeben. Darin sind allerdings zwei sehr schlechte Stösse inbegriffen. Rechnen wir diese im Mittelwert nicht mit, so ergibt sich das bedeutend niedrigere Mittel von 0,56 m. Der maximale Widerstand der normalen gemessenen Stösse dieser Art beträgt 2,14 m. Wir konstatieren auch hier, dass die Laschen an der Stromleitung wesentlich mitbeteiligt sind.

Der Konstrukteur der Edison-Brown-Verbindung geht von dem richtigen Gedanken aus, die Laschen, die ja sowieso an der Stromleitung im Stosse wesentlich teilnehmen, ausschliesslich zu derselben heranzuziehen. Der gute Kontakt der Amalgampaste mit der Lasche und den Schienen lässt einen niederen Widerstand dieser Verbindung voraussehen. In der Tat zeigen auch unsere Messungen als Mittel von 34 Werten einen mittleren Stoss-widerstand gleich 0,37 m Schiene mit einem Maximum von 2,30 m. Die betreffenden Verbindungen liegen dabei schon ca. 10 Jahre im Boden. Die Edison-Brown-Verbindung soll sich auch an anderen Orten sehr gut gehalten haben, wie u. a. auch die Cie. des chemins de fer du Midi berichtet.¹⁾ Mit älteren Ausführungsformen dieser Verbindung, bei welchen z. B. die Korkplatte fehlte, welche das Amalgam in ihrer Durchlochung hält und vor dem Zerfliessen schützt, sind dagegen früher in der Schweiz nicht durchwegs gute Erfahrungen gemacht worden.

Die beste Art, zwei Schienen miteinander zu verbinden, ist unzweifelhaft die Schweiß-verbindung. Der Stosswiderstand wird dann so klein, dass die Messresultate nicht mehr sehr genau sind. Immerhin zeigen unsere Messungen, die für geschweisste Stösse einen mittleren Widerstand gleich demjenigen von 0,09 m Schiene ergeben, deutlich, dass diese Verbindungsart bei weitem die beste ist. Als Nachteil wäre hier die Möglichkeit von Rissbildungen im Stoss zu nennen, wobei der Stosswiderstand natürlich beträchtlich steigt. Gerissene Stösse können aber schon äusserlich leicht erkannt werden und machen sich beim Befahren durch starkes Schlagen bemerkbar.

In einer Schweizer Stadt, in welcher sich der Unterbau im allgemeinen in gutem Zustande befand, wurden 102 Stosswiderstände gemessen. Das Ergebnis ist aus der folgenden Tabelle ersichtlich.

Gemessene Widerstände von i. allg. guten Schienenstösse.

Tabelle II

Stossverbindungsart	Gemessene Anzahl Stösse	Die nachstehende Zahl Prozente der Stösse haben einen Widerstand von		
		weniger als 1 m Schiene	1-3 m Schiene	mehr als 3 m Schiene
Kupferdrahtverbinder (Fig. 6)	32	40,7	53,1	6,2
Kupferbandverbinder (Fig. 7)	24	79,2	12,5	8,3
Edison-Brown Verbindung (Fig. 8)	34	91,2	8,8	0,0
Geschweisste Stösse	12	100,0	0,0	0,0
Total bezw. Mittel	102	73,5	22,6	3,9

In derselben Stadt wurden ferner die Widerstände von 20 Weichen- und 11 Kreuzungsstösse gemessen. Dieselben sind alle nach der in nachstehender Fig. 12 abgebildeten Weise hergestellt; die beiden normalen Kupferdrahtverbinder (Fig. 6) eines Geleises sind durch einen 8 mm Kupferdraht miteinander verbunden, und der letztere durch mehrere parallel zu den Schienen geführte Kupferdrähte mit der analogen Querverbindung des nächsten Stosses verbunden (Fig. 12). Das Messergebnis zeigt folgende Tabelle:

¹⁾ Le Conducteur de retour du courant de traction par L'hériaud, Paris 1917, pages 18 et 19.

Gemessene Widerstände von Weichen- und Kreuzungsstössen.

Tabelle III

Anzahl Stösse	Die nachstehende Zahl Prozente der Stösse haben einen Widerstand gleich:			
	weniger als 1 m Schiene	1-3 m Schiene	3-6 m Schiene	mehr als 6 m Schiene
31	12,8	38,8	35,6	12,8

Wie zu erwarten ist, sind die Widerstände dieser Spezialverbindungen grösser als diejenigen normaler Stösse. Die Messungen ergaben einen mittleren Stosswiderstand gleich 8,0 m Schiene; dabei ist allerdings ein sehr schlechter Stoss mitberücksichtigt. Lassen wir diesen weg, so ist der mittlere Stosswiderstand von 30 in normalem Zustande befindlichen Stösse gleich demjenigen von 3,3 m Schiene, also im Mittel etwa 2,5 mal grösser als bei normalen Stösse mit dem Kupferdrahtverbinder. Der maximale Widerstand dieser 30 normalen Stösse ist gleich demjenigen von 9 m Schiene.

In anderen Schweizer Städten, in welchen ausser geschweissten Stösse nur Kupferdrahtverbinder wie in Fig. 6 dargestellt verlegt sind, und in welchen der Unterbau sich teilweise in einem mangelhaften Zustande befand, ergaben die Messungen folgendes Resultat:

Gemessene Widerstände von Schienenstössen geringerer Güte. Tabelle IV

Stossverbindungsart	Gemessene Anzahl Stösse	Die nachstehende Zahl Prozente der Stösse haben einen Widerstand gleich:		
		weniger als 1 m Schiene	1-3 m Schiene	mehr als 3 m Schiene
Kupferdrahtverbinder (Fig. 6)	104	33,6	31,8	34,6
Kupferdrahtverbinder (Fig. 6)	110	13,6	49,1	37,3

Die deutschen Vorschriften¹⁾ lassen für eine 15 m lange Schiene einen mittleren Stosswiderstand gleich demjenigen von 3 m Schienen zu. Von den 102 willkürlich herausgegriffenen Stösse einer gut gebauten und unterhaltenen Strassenbahn weisen in Tabelle II 98 gleich 96,1 % einen Widerstand auf, der weniger als 3 m Schiene entspricht, während

nur 4 gleich 3,9 % einen grösseren Widerstand aufweisen. Zwei von diesen letzteren haben dabei Widerstände, die kleiner sind als der von den deutschen Vorschriften für einzelne Stösse noch zugelassene Widerstand gleich 10 m Schiene; die beiden anderen weisen dagegen bedeutend grössere Widerstände auf. Von den 31 in Tabelle III erwähnten Weichen- und Kreuzungsstösse weisen 48,4 % einen grösseren Widerstand als 3 m Schiene auf, dagegen nur einer (gleich 3,2 %) einen Widerstand von mehr als 10 m Schiene. Die Tabelle IV, welche

Fig. 12.

L = Lasche.
S = Schienenvorbinde.
V = Verbindungsdräht zur Überbrückung der Weiche.

die Messergebnisse von 104 willkürlich herausgegriffenen Kupferdrahtstösse zweier Anlagen geringerer Güte enthält, zeigt deutlich den Einfluss von schlecht unterhaltenen Stossverbindungen. Vergleichen wir die Messresultate der Kupferdrahtverbindungen der Tabelle IV mit denjenigen der Tabelle II, so fallen sehr deutlich die grossen Prozentsätze von 34,6 % bzw. 37,3 % der Stosswiderstände auf, welche einen Stosswiderstand von mehr als 3 m Schiene aufweisen, gegenüber den nur 6,2 % bei derselben aber gut unterhaltenen Stossverbindungsart in Tabelle II. Dabei weisen im zweiten Falle noch 7,6 % bzw. 20,9 % dieser Stösse Widerstände gleich mehr als 10 m Schiene auf, währenddem von den 32 untersuchten Stösse im ersten Falle kein einziger einen Widerstand von mehr als 5 m Schiene besitzt. Diese Ergebnisse zeigen deutlich, dass bei gutem Unterhalt die deutschen Vorschriften mit Bezug auf Stosswiderstände mit Leichtigkeit eingehalten werden können.

¹⁾ E. T. Z. 1919, Heft 21; auch als Sonderabdruck bei Springer, Berlin, erhältlich.

8. Schienenstrommessungen.

Es ist nun, da der Schienenwiderstand genau gemessen oder berechnet werden kann, ein leichtes, den Schienenstrom durch Spannungsmessungen an einer Schiene ohne Stoss zu bestimmen. Spezielle Aufmerksamkeit ist, der kleinen zu messenden Spannungen wegen (diese werden sich je nach dem Schienenprofil zwischen 0,025 bis 0,065 Millivolt pro Meter Abstand der beiden Spannungskontakte und Ampere Schienenstrom bewegen), auf besten Kontakt mit den Schienen zu richten.¹⁾ Diese Messungen müssen natürlich in allen Schienen eines Strassenzuges gemacht werden und beanspruchen daher im allgemeinen ziemlich viel Zeit. Der Strom verteilt sich in den Schienen gewöhnlich gar nicht sehr gleichmässig, auch wenn Querverbindungen zwischen den verschiedenen Schienensträngen und Geleisen angebracht werden. Fehlen diese letzteren, so werden die Differenzen noch grösser. Natürlich gleichen sie sich auf längeren Strecken durch die Erde aus, es wird aber dadurch der totale Erdstrom vergrössert und die Leitfähigkeit der Schienen nicht voll ausgenützt; deshalb *sollten immer genügend Querverbindungen zwischen den zwei Schienensträngen eines Geleises und den verschiedenen Geleisen angebracht werden.*

Bestehen Querverbindungen zwischen den verschiedenen Schienensträngen und ist der Strommittelwert in demselben trotzdem stark verschieden, so sind in dem Schienenstrang, in welchem der kleinere oder gar kein Strom fliesst, in der Nähe der Messtelle entweder schlechte Stösse vorhanden, oder es ist, wenn in der Nähe eines Schienenspeisekabels gemessen wird, der Anschluss desselben an diesen Schienenstrang bedeutend schlechter als derjenige an den andern. In Steigungen treten kleinere Differenzen immer auf, da die Wagen auf dem einen Geleise mehr Strom brauchen als auf dem andern.

9. Rohr- und Rohrstosswiderstände.

Der Widerstand eines Rohrstückes ohne Muffen kann, ähnlich wie wir das auch für die Schienenwiderstände gemacht haben, aus Länge und Querschnitt berechnet werden, wenn der spezifische Widerstand des Materials bekannt ist. Dieser bewegt sich für Guss-eisen, wie verschiedene Autoren²⁾ berichten und auch wir an Hand von Messungen bestätigt gefunden haben, zwischen

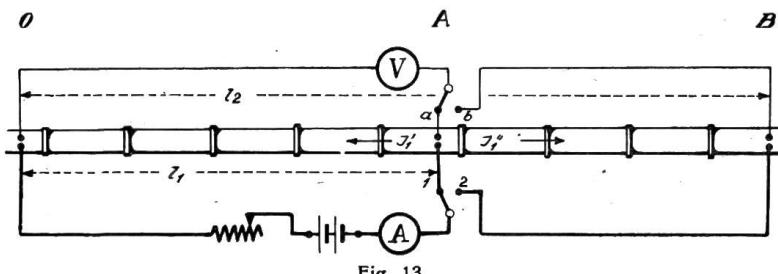


Fig. 13.

Boden liegenden Rohrstranges incl. Muffenwiderstand kann nicht etwa dadurch genau bestimmt werden, dass man beispielsweise eine Batterie zwischen den Punkten O und A (Fig. 13) anschliesst und den Widerstand aus Strom- und Spannungsmessung ermittelt, weil der im Amperemeter gemessene Strom sich zum Teil auch ausserhalb der Strecke O A schliesst. Bei Anwendung der in Fig. 13 angegebenen Schaltung³⁾ die beispielsweise Besig bei seinen Untersuchungen in St. Gallen benutzt hat, wird dagegen dieser Streustrom, der je nach Umständen 0÷30 % des Gesamtstromes betragen kann, auch berücksichtigt. Bezeichnen wir mit: R_1 bzw. R_2 den Widerstand der Rohrleitung zwischen den Punkten O und A bzw. O und B; J_1 bzw. J_2 den Strom im Amperemeter bei der Schalterstellung 1 bzw. 2; J'_1 bzw. J'_2 den Strom in der Rohrleitung zwischen den Anschlusspunkten OA bzw. OB; J''_1 bzw. J''_2 den Strom in der Rohrleitung, der sich ausserhalb der Anschlusspunkte OA bzw. OB schliesst, so ist: $J_1 = J'_1 + J''_1$ und $J_2 = J'_2 + J''_2$. Bezeichnen wir ferner

¹⁾ Vergleiche die auf Seite 253 gemachten Angaben.

²⁾ Bersig, Erdströme und Rohrleitungen, Seite 38; Larsen und Faber, E. T. Z. 1901, Seite 1038.

³⁾ Im Prinzip ist diese Schaltung schon von Lubberger im Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung 1901, Seiten 508 und 723, angegeben worden.

$0,8$ und $1,0 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$. Der

Querschnitt kann dabei mit genügender Genauigkeit durch Wegen eines glatten Rohrstückes ohne Muffe, unter Annahme eines spezifischen Gewichtes von $7,2 \text{ kg/dm}^3$ berechnet werden.

Der Widerstand eines im

mit: V_{1a} bzw. V_{1b} die Spannungsdifferenz zwischen den Punkten O und A bzw. O und B beim Totalstrom J_1 ; V_{2a} bzw. V_{2b} die Spannungsdifferenz zwischen den Punkten O und A bzw. O und B beim Totalstrom J_2 , so können wir, wie eine einfache Rechnung zeigt, für die beiden Widerstände R_{r1} und R_{r2} schreiben:

$$R_{r1} = \frac{V_{1a} V_{2b} - V_{1b} V_{2a}}{J_1 (V_{2b} - V_{2a})} \quad \text{und} \quad R_{r2} = R_{r1} \frac{V_{2b}}{V_{2a}} \quad (6)$$

Für die Ströme gelten die folgenden Beziehungen:

$$\left. \begin{aligned} J'_1 &= \frac{V_{1a}}{R_{r1}} ; \quad J''_1 = J_1 - J'_1 \quad \text{und} \\ J'_2 &= \frac{V_{2a}}{R_{r1}} ; \quad J''_2 = J_2 - J'_2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Die Messlängen OA bzw. OB sollten wenn immer möglich zu ca. $20 \div 50$ Meter angenommen werden. Es ist auch darauf zu achten, dass innerhalb OB keine oder höchstens Hausleitungen abzweigen. Der Widerstand einer Rohrleitung kann also einigermassen genau und einwandfrei nur bestimmt werden, wenn man zum Rohr selbst gelangen kann. Ist das nicht möglich, so kann man sich über die Größenordnung des Rohrstroms auch orientieren, indem man die in Fig. 13 dargestellte Messschaltung benutzt und als Anschlusspunkte O , A und B drei Hydranten wählt, zwischen denen keine Leitungen (ausser höchstens Hausabzweigleitungen) vom Hauptrohr abzweigen. Es ist darauf zu achten, dass am Hydranten je ein besonderer Strom- und Spannungskontakt verwendet wird. Wir geben zur Orientierung in Fig. 14 einen schematischen Querschnitt durch einen gebräuchlichen Hydranten. Die Formeln 6 und 7 verändern sich dann folgendermassen:

$$\left. \begin{aligned} R_{r1} &= \frac{V_{1a} - 2 J_1 R_h}{J_1} + \frac{(V_{2a} - J_2 R_h)(V_{1a} - V_{1b} - J_1 R_h)}{J_1 (V_{2b} - V_{2a} - J_2 R_h)} \\ R_{r2} &= R_{r1} \frac{V_{2b} - 2 J_2 R_h}{V_{2a} - J_2 R_h} \quad \text{und} \end{aligned} \right\} \quad (6a)$$

$$\left. \begin{aligned} J' &= \frac{V_{1a} - 2 J_1 R_h}{R_{r1}} ; \quad J''_1 = J_1 - J'_1 \\ J'_2 &= \frac{V_{2a} - J_2 R_h}{R_{r1}} ; \quad J''_2 = J_2 - J'_2 \end{aligned} \right\} \quad (7a)$$

wobei R_h den Hydrantenwiderstand bedeutet, welcher für alle drei Hydranten als derselbe angenommen wurde. Die Größenordnung des Hydrantenwiderstandes ist an Hand von Messungen an nicht verlegten Hydranten zu schätzen, wobei aber noch berücksichtigt werden muss, dass der Widerstand eines Seitenabzweigrohres mit mindestens zwei Muffen im allgemeinen nicht mitgemessen wird. Die Größenordnung dieser Widerstände wird sich, wie wir gefunden haben, zwischen einigen zehntausendstel Ohm bis zu mehreren hundertstel Ohm und mehr bewegen. Die Unsicherheit über diesen Widerstand beeinflusst natürlich auch das Endresultat, daher ist diese Messungsart nur für orientierende Messungen zu empfehlen, die wo nötig durch genauere Messungen zu bestätigen sind. Ist der totale Rohrwiderstand R_1 bzw. R_2 bekannt, so kann auch der mittlere Rohrstosswiderstand berechnet werden, indem man vom gemessenen totalen Rohrwiderstand R_{r1} bzw. R_{r2} den aus Länge, Querschnitt und spezifischem Widerstand berechenbaren Rohrwiderstand (ohne Muffenwiderstand) in Abzug bringt und diesen Widerstand durch die Anzahl Stösse dividiert. Der auf diese Weise ermittelte Rohrstosswiderstand ist allerdings, da er als Differenz zweier Größen, wovon eine gemessen, die andere berechnet ist, nicht sehr genau; er orientiert aber doch über die Größenordnung der Rohrstosswiderstände. Viel genauer lässt sich der Stosswider-

stand bestimmen, wenn der Spannungsabfall über den einzelnen Muffen bei der Schaltung nach Fig. 13 direkt gemessen wird. Da der Rohrstrom J'_1 bzw. J'_2 nach den angegebenen Formeln bestimmt werden kann, so lässt sich auf diese Weise jeder einzelne Muffenwiderstand ermitteln. Wir haben auf diese letztere Art an drei gusseisernen Wasserleitungen mit verschiedenen Durchmessern (150, 250 und 350 mm lichten Durchmessers) und einer gusseisernen Gasrohrleitung (mit 450 mm lichtem Durchmesser) je 11 Stosswiderstände bestimmt. Das Messergebnis ist in der folgenden Tabelle enthalten:

Rohrstosswiderstände.

Tabelle V.

Leitung	licher Durchmesser in mm	Länge der Rohrleitung, deren Widerstand gleich demjenigen eines Stosses ist		
		Minimum m Rohr	Maximum m Rohr	Mittel m Rohr
Wasserleitung	150	0,70	27,3	4,00
Wasserleitung	250	0,48	14,8	3,25
Wasserleitung	350	1,02	21,2	3,44
Gasleitung	450	1,5	177	23,0
alle Leitungen	150 ÷ 450	0,48	177	8,42

Diese Rohre waren dabei sämtlich mit den gewöhnlichen Bleidichtungen nach Fig. 15 abgedichtet und waren alle vor mehr als 10 Jahren verlegt worden. Die Tabelle V lässt deutlich erkennen, dass die Rohrstosswiderstände von Stoss zu Stoss sehr stark variieren (für alle gemessenen Stösse vom einfachen bis zum 370fachen, in einer Leitung vom einfachen bis zum 20 ÷ 40fachen). Trotzdem variieren die Mittelwerte für die verschiedenen Wasserleitungen nicht sehr stark voneinander. Ungefähr die Hälfte des Widerstandes von gusseisernen Wasserrohrleitungen fällt also nach unseren Messungen auf Muffenwiderstände. Die Stosswiderstände an Gasleitungsrohren dagegen scheinen, obgleich die Muffen in genau derselben Art, wie diejenigen der Wasserrohre hergestellt wurden, im Mittel bedeutend grösser zu sein, als die Widerstände von Wasserrohrstössen. Das bestätigen auch Messungen von Meng¹⁾. Der Grund liegt nicht etwa in einer erhöhten Leitfähigkeit der Wasserrohre durch die Wasserfüllung, welcher Einfluss vollständig vernachlässigbar ist (die Änderung der Leitfähigkeit durch die Wasserfüllung macht höchstens Bruchteile eines $\%$ aus). Wir vermuten, dass diese bei Gasleitungen grösseren Muffenwiderstände durch eine chemische Einwirkung des Gases auf die Bleidichtung zu Stande kommt, doch ist diese Frage noch keineswegs abgeklärt.

Unter der Annahme eines mittleren Muffenwiderstandes für Wasserrohre gleich dem Widerstande von 3,5 m Rohr und bei Annahme von 340 Muffen pro km Rohrlänge ergibt sich ein Rohrwiderstand für Wasserrohre verschiedener Durchmesser, wie er aus der folgenden Tabelle VI ersichtlich ist.

Ungefährer Rohrwiderstand (incl. Muffenwiderstand) für von Roll'sche gusseiserne Wasserleitungsrohre verschiedener Durchmesser.

Tabelle VI.

licher Rohrdurchmesser in . . mm	100	150	200	250	300	350
spez. Rohrwiderstand in . . Ohm/km	0,9	0,5	0,35	0,25	0,2	0,16

Da der mittlere Rohrstosswiderstand einen grossen Anteil vom spezifischen totalen Rohrwiderstand der Tabelle VI bildet und dieser mittlere Rohrstosswiderstand für ver-

¹⁾ E. T. Z. 1901, Seite 354.

schiedene Rohrleitungen gleichen Durchmessers auch bei gleicher Herstellung der Muffen ziemlich stark variiert, so sind die in der Tabelle angeführten Werte nur sehr angenäherte. Immerhin kann bei Kenntnis der Spannungsdifferenzen im Rohrnetz an Hand solcher Zahlen auf die Grösse des Rohrstromes geschlossen werden.

10. Rohrstrommessungen.

An Rohren, die im Betriebe sind, können Rohrstrommessungen nur indirekt, durch Messung von Spannungsabfällen gemacht werden. Es muss dabei der Widerstand des Rohrstückes oder Rohrstranges bekannt sein, über dessen Bestimmung der vorhergehende Abschnitt Auskunft gibt. Ist dieser Widerstand R_r bekannt, so bestimmt sich der Rohrstrom J_r nach folgender Gleichung:

$$J_r = \frac{V_r}{R_r} \quad (8)$$

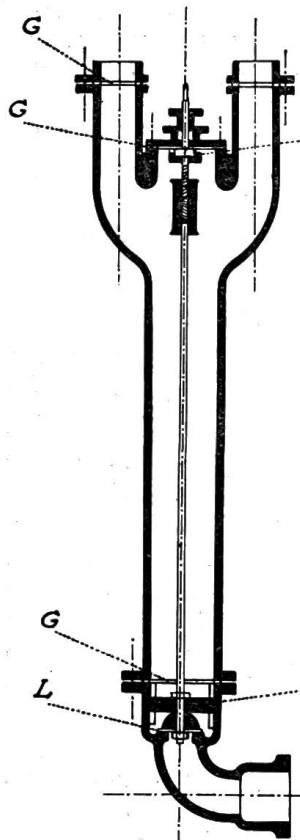


Fig. 14.

- G = Gummidichtung.
- L = Lederdichtung.
- K₁ = Kontaktfläche zwischen Spindelstange und Steigrohr.
- K₂ = Kontaktfläche zwischen Führungssteg der Spindelstange und Rohr.

Wobei V_r die an den Enden des Rohrstückes gemessene Spannung bedeutet. Von speziellem Interesse sind auch hier die Mittelwerte.

Benützen wir die in Fig. 13 angegebene Schaltung, so können wir die Spannungen sehr wohl mit einem guten Millivoltmeter ablesen und unter Berücksichtigung des Messleitungs-widerstandes den Rohrstrom bestimmen. Diese Methode ergibt bei sorgfältiger Anwendung genaue und zuverlässige Resultate, ausserdem orientiert sie über den Widerstand von Rohrleitungs-abschnitten und den mittleren Rohrstosswiderstand. Ein Nachteil der Methode ist, dass das Rohr an drei Stellen zugänglich sein muss, was in der Regel nur durch Aufgraben erreicht werden kann und grosse Kosten verursacht. Die Anwendung dieser Methode ist aber überall dort am Platz, wo Rohre, wie beispielsweise in begehbarer Gängen oder unter Brücken, leicht zugänglich sind, da sie die genauesten Resultate ergibt.

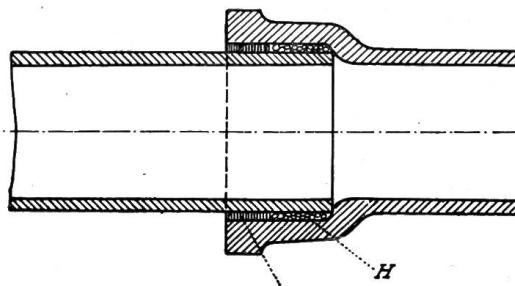


Fig. 15.

- P = Bleidichtung; H = Hanfseil, geteert.

Muss, um eine Rohrstrommessung durchzuführen, aufgegraben werden, oder steht (wie beispielsweise in Wasserkammern) nur ein kurzes Rohrstück zur Verfügung, so kann auch der Spannungsabfall an einem Rohrstück ohne dazwischenliegendem Stoss gemessen werden und der Rohrwiderstand rechnerisch aus Länge, Querschnitt und Leitfähigkeit ermittelt werden.¹⁾

Diese Methode liefert auch im allgemeinen genügend genaue Resultate, die Haupt-schwierigkeit liegt aber darin, die naturgemäss sehr kleinen Spannungsdifferenzen zu messen. Soll beispielsweise ein Zehntel Ampere noch an einem Rohr von 350 mm lichtem Durch-messer gemessen werden können, so müssen Spannungen von 1÷2 Hunderttausendstel

¹⁾ Vergleiche die auf Seite 263 gemachten Angaben.

Volt abgelesen werden können. Dabei sind Kompensationsmethoden nicht anwendbar, da der Bahnstrom im Rohr rasch variiert, oft auch die Richtung wechselt und diese Variationen sowohl nach Grösse wie nach Richtung nicht vorauszusehen sind. Ein auch nur einigermassen zuverlässiger Mittelwert kann nur durch direkte Ablesungen gewonnen werden. Die kleinen zu messenden Spannungen werden oft dazu zwingen, Instrumente mit Fadenaufhängung zu verwenden.

Eine Orientierung über die Grössenordnung der zu erwartenden Rohrströme kann auch anhand von Potentialmessungen im Rohrleitungsnets erhalten werden, unter Berücksichtigung des auf letzter Seite über den Rohrwiderstand Gesagten, doch sollen solche Bestimmungen nur als orientierende, die nachher eventuell durch genauere Messungen zu ersetzen sind, benutzt werden.

Aus den bisher über die Messung von Rohrströmen gemachten Angaben geht ohne weiteres hervor, dass z. B. die von Herrick¹⁾ angegebene Methode, die von ihm selbst, Kohn²⁾ u. a. angewendet wurde, nur äusserst ungenaue Resultate ergeben kann. Wir haben auch versucht, Rohrströme nach der von Hering³⁾ bekanntgegebenen Methode zu messen, welche darin besteht, aus einer Batterie einen Strom in der dem Rohrstrom entgegengesetzten Richtung in das Rohr zu schicken und denselben so zu regulieren, dass ein am selben Rohre angeschlossenes Galvanometer keinen Ausschlag mehr zeigt, in welchem Falle der an einem Amperemeter abzulesende Batteriestrom gleich dem Rohrstrom ist. Da aber diese Methode eine Kompensationsmethode ist, können der weiter oben über solche Methoden angegebenen Gründe halber brauchbare *Mittelwerte* nicht erhalten werden.

11. Die Messung der Erdstromdichte.

Wie wir schon in unserem I. Bericht⁴⁾ ausführlich dargelegt haben, ist die Gefährdung eines im Erdboden als Anode wirkenden Metallteils nicht durch die gesamte Stromstärke im Rohr bedingt, sondern durch den Betrag der spezifischen, d. h. pro Flächeneinheit aus der Anode austretenden Stromstärke i_r . Es liegt nun nahe, dieses einzig einwandfreie Mass für die Gefährdung unterirdisch verlegter Rohrleitungen oder Kabel durch direkte Messung zu bestimmen. Haber und Liese⁵⁾ haben eine Methode angegeben und einen Apparat entwickelt, mittels welchem solche Erdstromdichten direkt gemessen werden können. Der selbe besteht im Prinzip aus zwei voneinander isolierten, parallelen Metallplatten⁶⁾, die in der Nähe des gefährdeten Metallteils in die Erde versenkt und senkrecht zur vermutlichen Richtung der Erdströme gestellt werden. Die beiden Metallplatten werden über ein Milliamperemeter leitend miteinander verbunden, das den auf eine Metallplatte auftretenden Strom direkt anzeigt. Zur Vermeidung von Polarisationserscheinungen, welche das Resultat stark stören können, werden die gereinigten Kupferplatten mit einer breiartigen Masse, bestehend aus Kupfersulfat und 50 %iger Schwefelsäure, bedeckt. Auf diese Schicht wird ein in 10 %iger Glaubersalzlösung getränktes Pergamentpapier gelegt, welches das Eindringen der Säure in das Erdreich verhindern soll. Der weitere Raum des Rahmens wird mit Erde gefüllt (siehe Fig. 16). Betreffend die Vorbereitungen und die zu beobachtenden Vorsichtsmassregeln folgen wir den Ausführungen Besigs im Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung 1913 über Erdströme und Rohrleitungen⁷⁾.

Bei der Herstellung der Messgrube ist zu berücksichtigen, dass die Stromdichte an der zu messenden Stelle durch das Aufgraben möglichst wenig verändert wird. Die Messgrube soll unmittelbar neben dem Geleise hergestellt werden; die Erdschicht senkrecht unter der Schiene, wo die grösste Erdstromdichte zu erwarten ist, soll aber unberührt

¹⁾ Street Railway Journal, 1898, pag. 775.

²⁾ E. T. Z. 1901, Seite 269.

³⁾ Elektrotechnik und Maschinenbau 1913, Seite 678.

⁴⁾ I. Korrosionsbericht, Bulletin 1918; Seiten 137 und 138.

⁵⁾ F. Haber und K. Liese. Ueber die Messung der Dichtigkeit vagabundierender Ströme im Erdreich; Zeitschrift für Elektrochemie 1906, Seite 829 ff., auch Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung 1906, Seite 637 ff.

⁶⁾ Siehe auch Elektrotechnik und Maschinenbau 1913, Seite 677 ff., der wir die folgenden Angaben entnehmen.

⁷⁾ Auch als Sonderabdruck zu beziehen.

bleiben. Es genügt für die Messung, die Grube nur so tief zu machen, dass man den Messrahmen an die Meßstelle bringen kann, das Rohr selbst wird besser zunächst nicht vollständig freigelegt. Durch einen Korrekturfaktor, der von dem Rohrdurchmesser und dem Abstande des Rahmens von der Rohroberfläche abhängt, wird der im Rahmen gemessene Erdstrom auf eine der Rahmenfläche gleiche Rohroberfläche reduziert.

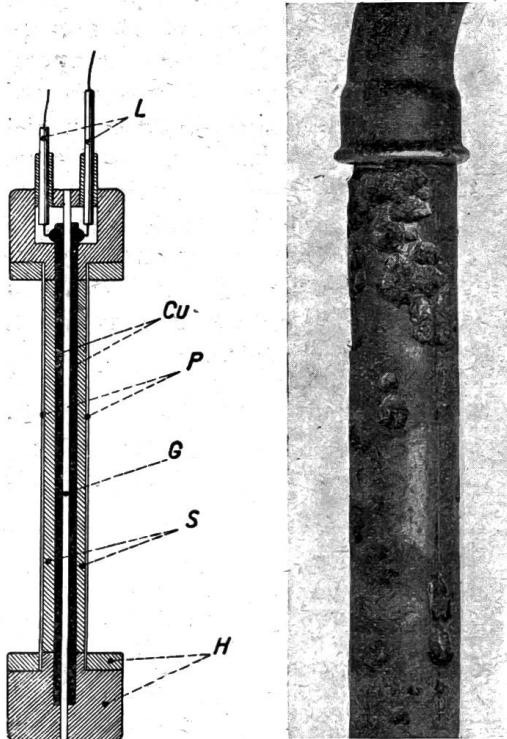


Fig. 16.

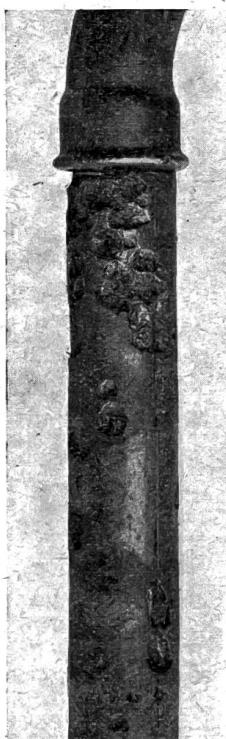


Fig. 17.

Cu = Kupferplatten.

G = Weichgummiplatte.

H = Holzrahmen.

L = Gummiaaderanschlussleitungen.

P = Pergamentpapier.

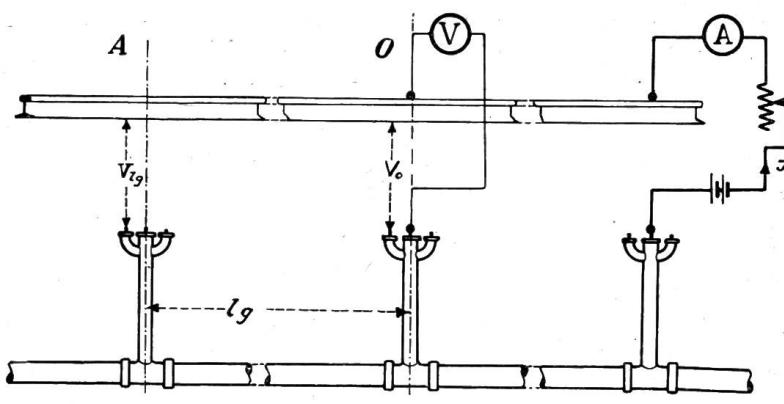
S = Brei aus Kupfersulfat und Schwefelsäure.

Unseres Erachtens sind Messungen von Erdstromdichten mit dem Haberschen Rahmen in Ermangelung einer besseren Messmethode nur dann am Platze, wenn sich die beiden interessierten Parteien nicht einigen können und ein Entscheid gefällt werden muss auf Grund eines möglichst „direkten Beweises“, der aber trotzdem nicht einwandfrei erhältlich sein wird. Können grössere mittlere Erdstromdichten als $0,75 \text{ m A pro } \text{dm}^2$ nachgewiesen werden, so sind in der Nähe liegende Rohrleitungen, wie es in § 5 der deutschen Vorschriften heisst: „unbedingt als durch die Bahn gefährdet zu bezeichnen“. Können aber solche Erdstromdichten nicht nachgewiesen werden, so darf nicht der Schluss gezogen werden, dass die Rohrleitungen als nicht durch die Bahn gefährdet anzusehen sind. Dieser Schluss wird in den deutschen Vorschriften allerdings nicht ausgesprochen, aber er liegt nahe, hauptsächlich da auch in den Erläuterungen zu den Vorschriften nicht ausdrücklich darauf aufmerksam gemacht wird.

Aus den bisher gemachten Angaben gehen ohne weiteres die prinzipiellen Schwächen dieser Messmethode hervor. Beim Betrachten eines durch Erdströme elektrischer Bahnen angegriffenen Rohres (siehe Figur 17) fällt sofort der ungleichmässige elektrolytische Angriff auf. Die Rohrströme treten eben, wie auch der Inhomogenität des Erdreiches und der Rohroberfläche wegen zu erwarten ist, gar nicht gleichmässig über die Rohroberfläche verteilt aus, sodass, wie auch schon Besig sagt, die mit einem gebräuchlichen Rahmen von 1 dm^2 Oberfläche gemessene Erdstromdichte *das Mittel über die Rahmenoberfläche* darstellt. Tatsächlich werden aber an einzelnen Punkten innerhalb der Rahmenfläche bedeutend über dem gemessenen Mittelwert liegende Erdstromdichten auftreten. Nun ist aber für die Rohrgefährdung nicht irgend eine mittlere Erdstromdichte, sondern die *maximale* ausschlaggebend. Diese kann aber mit dem Rahmen nicht einmal für den gewählten Messort festgestellt werden, geschweige denn für eine ganze Rohrleitung oder gar ein verzweigtes Rohrnetz, denn immer wird die Zahl der Messorte eine relativ sehr beschränkte bleiben müssen. Das erhaltene Ergebnis wird also immer ein *Zufallsergebnis* sein und bleiben müssen, auch dann, wenn Messungen in einem speziell gefährdeten Gebiet gemacht werden. Ferner wird trotz aller Sorgfalt bei Einführung des Messrahmens das bestehende Gefüge des Erdreichs gestört und damit auch die vor Einfügung des Messrahmens an diesem Orte bestehende mittlere Stromstärke eine andere sein als nach derselben, mit anderen Worten, es wird nicht die einzige massgebende, vor Störung des Erdreiches vorhanden gewesene Erdstromstärke gemessen. Das sind auch die Gründe, weshalb wir von solchen, überdies sehr umständlichen und kostspieligen Messungen abgesehen haben.

12. *Messung des Widerstandes zwischen Schiene und Rohr und Angaben über Erdwiderstand.*

Der Widerstand zwischen Schienen und Rohrleitungen ist einwandfrei wohl nur an speziell dafür hergerichteten Versuchsstrecken messbar. Eingehende Untersuchungen dieser Art



Meter von diesem entfernten Hydranten gemessen, während welcher Zeit der Batteriestrom konstant gehalten wird. Bei Annahme eines örtlich konstant bleibenden Widerstandes zwischen Schiene und Rohr lässt sich für diesen Widerstand folgende Formel ableiten:

$$r_e = (r_g + r_r) \frac{I_g^2}{\left\{ \ln \left(\frac{V_{lg}}{V_0} \right) \right\} 2} \quad (9)$$

worin bedeuten :

r_g den Widerstand der Geleise in Ohm/km;

r_r den Widerstand der Rohrleitung in Ohm/km;

r_e den Widerstand zwischen Schiene und Rohrleitung in Ohm×km;

I_g die Länge des Geleises in km zwischen den Spannungsmesspunkten O und A (Fig. 18);

V_0 die Spannung zwischen Schiene und Rohr in Volt im Messpunkt O ;

V_{lg} die Spannung zwischen Schiene und Rohr in Volt im Messpunkt A .

Die Spannung V_{lg} wird dabei zweckmässigerweise nicht nur an einen Hydranten, sondern an mehreren gemessen. Praktische Messungen nach dieser Methode ergaben ganz unzuverlässige Werte für den spezifischen Widerstand zwischen Schiene und Rohrleitung. Wir vermuten eine ziemlich starke Beeinflussung der Messungsergebnisse durch Polarisationsspannungen. Wahrscheinlich würden wir zuverlässigere Werte bei Messung mittelst Wechselstrom erhalten, die aber den tatsächlichen Verhältnissen nicht entsprechen würden, da beim Strassenbahnbetriebe Polarisationerscheinungen tatsächlich auftreten. Die Messungen scheinen u. a. zu zeigen, dass der Widerstand zwischen Schiene und Rohr auch von der Spannung abhängig ist, indem für grössere Spannungen am selben Orte kleinere Widerstände erhalten wurden.

Wie schon erwähnt, hat das Bureau of Standards in Washington ausgedehnte Versuche über den Erdwiderstand anstellen lassen, über die es in seinem Technologic paper No. 26³⁾ ausführlich berichtet. Zusammenfassend kann über diese Messungen etwa folgendes gesagt werden:

Der Erdwiderstand (ohne Uebergangswiderstände) nimmt mit zunehmendem Druck allmählich, etwa bis zu einem Drucke von sieben Atm. ab, von demselben an ist er für die meisten Erdsorten vom Drucke unabhängig und erreicht mit diesem Werte etwa den Widerstand von festgestampfter Erde. Die Abhängigkeit des Erdwiderstandes vom Drucke ist jedoch klein und kann in der Regel vernachlässigt werden.

Von sehr grossem Einfluss ist aber der Feuchtigkeitsgehalt der Erde. Ganz trockene Erde hat im allgemeinen einen grossen Widerstand, der oft mehrere Millionen Ohm für

hat das Bureau of Standards in Washington angestellt¹⁾ über deren Ergebnisse wir noch berichten werden. Wir haben versucht, diesen Widerstand auf folgende Art zu bestimmen:²⁾ Eine Batterie wird über einen Widerstand und ein Ampermeter zwischen Schienen und Rohrleitungen geschaltet und die Spannungen zwischen Schienen und Rohr an einem benachbarten Hydranten und einem weiteren, einige hundert

¹⁾ Electrical Railway Journal, 1919, Heft No. 4.

²⁾ Eine ähnliche Messmethode wird im Electrical Railway Journal, 1919, Heft No. 4 beschrieben.

³⁾ Earth resistance and its relation to electrolysis of underground structures.

einen Würfel von 1 cm Kantenlänge betragen kann. Dieser Widerstand sinkt aber mit zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt sehr rasch, oft auf wenige Tausendstel seines ursprünglichen Wertes und nimmt bei sehr hohem Wassergehalte in der Regel wieder etwas zu. Sehr deutlich sind diese Verhältnisse aus der folgenden Tabelle VII, die wir der oben erwähnten Quelle entnehmen, ersichtlich, in welcher der Erdwiderstand in $\Omega \text{ cm}$ für eine rötliche Tonerde in Funktion des Feuchtigkeitsgehaltes angegeben ist.

*Erdwiderstand von Tonerde in Abhängigkeit des Feuchtigkeitsgehaltes
nach Bureau of Standards.*

Tabelle VII.

Feuchtigkeitsgehalt in %	Spez. Erdwiderstand in Ohm \times cm	Feuchtigkeitsgehalt in %	Spez. Erdwiderstand in Ohm \times cm
5,0	2,340,000	44,5	4725
11,1	237,400	55,6	4870
16,7	13,880	56,7	5197
22,2	6,830	77,8	5045
33,3	5,400	—	—

Der natürliche Feuchtigkeitsgehalt solcher Tonerde im Boden schwankt im allgemeinen zwischen 10 und 20 %.

Wie die Feuchtigkeit, so hat auch die Temperatur auf den Erdwiderstand einen grossen Einfluss, der aus der folgenden Tabelle VIII, die wir derselben Publikation des Bureau of Standards entnehmen, ersichtlich ist. Die Zahlen gelten für einen feuchten, etwas sandhaltigen Ton von einem spezifischen Widerstande von $6260 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$ bei 20°C und 18,6 % Feuchtigkeitsgehalt. Die in der Tabelle angeführten Werte sind Absolutwerte (keine spezifischen Werte) und in Ohm angegeben.

*Abhängigkeit des Erdwiderstands von der Temperatur
nach Bureau of Standards.*

Tabelle VIII.

Temperatur in $^\circ\text{C}$	Widerstand in Ohm	Temperatur in $^\circ\text{C}$	Widerstand in Ohm
18,0	224	— 3,0	1185
13,0	286	— 5,5	4340
8,5	398	—13,0	21600
1,5	458	—13,0	24600
1,0	462	—15,0	36200
0,0	542	—18,0	45000
—2,0	940	—19,0	48900

Auffallend ist der überaus rasche Anstieg des Widerstandes vom Eispunkte an. Da der Temperaturkoeffizient im ganzen untersuchten Intervalle negativ, derjenige der Schienen dagegen positiv ist, so werden die Erdströme ganz allgemein im Sommer grösser als im Winter sein. Das bestätigen auch Messungen des Bureau of Standards¹⁾.

Der spezifische Widerstand von Erdproben aus verschiedenen amerikanischen Städten wurde vom Bureau of Standards bei Zimmertemperatur und Feuchtigkeitsgehalten von $10 \div 25\%$ als etwa zwischen den Grenzen von 600 und 40 000 $\text{Ohm} \cdot \text{cm}$ liegend bestimmt. Weitauß am häufigsten treten dabei bei Feuchtigkeitsgehalten von $10 \div 20\%$ Werte zwischen

¹⁾ Technologic paper No. 54, pages 56 \div 58 und No. 26, page 45.

1000 und 8000 Ohm · cm auf. Im allgemeinen weist Humus- oder Tonerde kleinere Widerstandswerte auf als Kies- oder Sandboden, zum Teil wohl auch wegen des im allgemeinen geringeren Feuchtigkeitsgehaltes dieser beiden letzteren Erdsorten.

Polarisationserscheinungen erhöhen den scheinbaren Widerstand. Derselbe kann bei feuchtem Boden bis zum Doppelten des mit Wechselstrom bestimmten betragen. Aus diesem Grunde sollten reine Erdwiderstands- und Erdübergangswiderstandsmessungen im allgemeinen mittelst Wechselstrom ausgeführt werden, man erhält aber dann nicht den beim Bahnbetrieb mit Gleichstrom massgebenden Widerstand.

Der Widerstand zwischen Schiene und Rohr hängt aber nicht nur vom Erdwiderstand, sondern ebenso sehr und oft mehr von den Uebergangswiderständen zwischen Schiene und Erde, und zwischen Erde und Rohr ab, wobei im allgemeinen der Widerstand zwischen Schiene und Erde ganz wesentlich grösser als derjenige zwischen Erde und Rohr ist, wenn am letzteren keine speziellen Massnahmen zur Erhöhung des Uebergangswiderstandes getroffen werden. Wie schon erwähnt, hat das Bureau of Standards in den Jahren 1915–1918 den Widerstand zwischen Schiene und Rohr an 14 eigens zu diesem Zwecke hergestellten kurzen Versuchsstrecken bei verschiedenen Witterungsverhältnissen bestimmt und so auch den Einfluss von verschiedenen Schienenbettungen auf den Widerstand zwischen Schiene und Rohr untersucht.¹⁾ Diese Messungen, die an eingleisigen Strecken vorgenommen wurden, zeigen, dass dieser Widerstand, als Mittelwert einer dreijährigen Beobachtungsperiode bestimmt, bei *Betonbettungen* die *kleinsten* Werte aufweist. Derselbe betrug bei einer Betonunterlage mit Eisenschwellen etwa 0,11 Ohm · km. Wenn allerdings diese Verlegungsart in der Schweiz nicht gebräuchlich ist, so wird sie doch in ihrem Widerstande nicht wesentlich verschieden sein von der hier gebräuchlichen Einbetonierung von Schienenstücken, die den Fahrschienen als Unterlage dienen.

Bei Einbettung von Rillenschienen in Schotterstrassen mit Bruchsteinunterlage und Verwendung von Holzschwellen erhöht sich der Widerstand zwischen Schiene und Rohr auf zirka 0,33–0,36 Ohm · km, d. h. auf ungefähr den dreifachen Wert desjenigen bei Betonunterlagen. Bedeutend höhere Widerstände weisen Vignol-Schienen bei offener Verlegung auf. Es wurden bei Verlegung der Schienen auf Holzschwellen und Erdunterlage bis zum Schieneneinfuss Werte zwischen 1,2 und 1,4 Ohm · km gefunden. Eine Imprägnierung der Holzschwellen mit Kreosot erhöht die Lebensdauer derselben und ist ohne wesentlichen Einfluss auf den Widerstand zwischen Schiene und Rohr; dagegen setzt eine Tränkung der Schwellen mit einer auch nur schwachen Lösung von Zinkchlorid diesen Widerstand auf etwa den halben Wert herunter. Werden Vignol-Schienen auf Schotterunterlage und Holzschwellen, wie bei Bahnen auf eigenem Bahnkörper viel gebräuchlich, verlegt, so steigt der Widerstand zwischen Schiene und Rohr auf etwa 4 Ohm · km.

Alle die hier angegebenen Widerstände zwischen Schiene und Rohr sind Mittelwerte aus einer ungefähr dreijährigen Beobachtungsperiode. Maximalwerte des Widerstandes treten durchwegs bei gefrorenem Boden auf und erreichen im Mittel den 2,3-fachen Wert der oben angegebenen Mittelwerte. Minimalwerte wurden nach länger andauernden Regenperioden beobachtet und betragen bei Schieneneinbettung in Beton etwa $\frac{3}{4}$ bei Verlegung derselben in Schotterstrassen, etwa $\frac{3}{5}$ und bei offener Verlegung etwa $\frac{1}{2}$ der oben angegebenen Mittelwerte. Bei zweigleisigen Strecken beträgt der Widerstand zwischen Schiene und Rohr bei Betonunterlage etwa 70 %, bei Einbettung in Schotterstrassen etwa 60 % und bei offener Verlegung etwa 50 % desjenigen von entsprechenden eingleisigen Strecken.

13. Messung des Widerstandes von Schienen- und Speisekabeln.

Die Messung des Widerstandes von Schienen- und Speisekabeln, deren Kenntnis für eventuell vorzunehmende Verbesserungen an der Schienenspeiseanlage unerlässlich ist, geschieht zweckmässigerweise nach folgender, in Fig. 19 dargestellten Schaltung, ausserhalb der Betriebszeit durch Strom- und Spannungsmessung.

Es wird eine Batterie über einen Widerstand und ein Amperemeter zwischen die Sammelschiene und das Schienenspeisekabel geschaltet, dessen Widerstand zu bestimmen ist.

¹⁾ Electrical Railway Journal 1919, Heft vom 25. Januar.

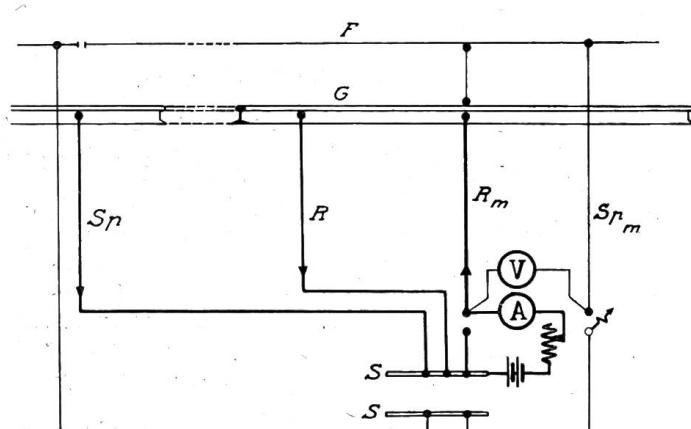


Fig. 19.

Schaltungsschema zur Messung des Widerstandes von Schienenspeisekabeln.

- F = Fahrdräht.
- G = Geleise.
- R = Schienenspeisekabel.
- R_m = Schienenspeisekabel, dessen Widerstand gemessen werden soll.
- S = Sammelschiene.
- S_p = Fahrdrähtspeisekabel.
- S_{p_m} = Fahrdrähtspeisekabel, das zur Spannungsmessung benutzt wird.

gemeinen für Korrosionsuntersuchungen bestehender Bahnen nicht sehr zuverlässig, weil u. a. Übergangswiderstände dabei nicht berücksichtigt werden. Wo in bestehende, namentlich ältere Rückleitungskabel Zusatzwiderstände oder Zusatzdynamos eingebaut werden sollen, sollte der Kabelwiderstand immer gemessen werden.

14. Messung des Stromes in den Schienenspeisekabeln.

Die Bestimmung des mittleren Stromes der Schienenspeisekabel geschieht am besten durch Einbau eines Amperestundenzählers, den man während einem oder mehreren Tagen eingeschaltet lässt. Ist auch die Kenntnis von Maximalwerten erwünscht, so leistet ein registrierendes Amperemeter gute Dienste, doch ist der Dämpfung desselben besondere Aufmerksamkeit zu schenken, auch sollte die Skala eine proportionale Stromeinteilung besitzen. Natürlich können auch Wattstundenzähler verwendet werden, wenn deren Spannungsspule an eine konstante Spannung angeschlossen wird. Steht nur ein direkt zeigendes Amperemeter zur Verfügung, so soll mindestens eine Stunde lang bei Normalbetrieb abgelesen werden. Bei sehr kurzen Kabeln kann unter Umständen durch den Einbau eines Nebenschlusswiderstandes die Stromverteilung unter den verschiedenen Kabeln geändert werden. Ist das der Fall, so kann man den Strom meistens durch Messung des Spannungsabfallen an einer schon eingebauten Kupferschiene oder einem Kabelstück bestimmen, dessen Widerstand berechnet werden kann.

(Fortsetzung in der nächsten Nummer.)

Berichtigung zu den Artikeln:

Die kritischen Drehzahlen der Kurbelgetriebe elektrischer Lokomotiven und Graphische Ermittlung der Spannungsverhältnisse in sterngesetzten Drehstromwiderständen. (Bulletin Nr. 9, 1920.)

Verschentlich sind auf Seite 241 die Clichés der Figuren 2 und 3 dieses Artikels verwechselt worden. Ferner ebenso auf Seite 245 in Fig. 7 die beiden Spannungen E'_{P1} und E'_{P2} . Wir ersuchen unsere Leser von diesen Berichtigungen Vormerk nehmen zu wollen.

Die Redaktion.

Der Strom wird durch die Schienen und die anderen Schienenspeisekabel des Stromwerkes der Sammelschiene wieder zugeführt. Als Spannungsmesskabel dient dabei zweckmässigerweise ein Fahrdrähtspeisekabel und eventuell auch der Fahrdräht selbst. Bei Verwendung eines hochohmigen Voltmeters kann in der Regel der Widerstand dieser Spannungsmessleitungen vernachlässigt werden, ist das nicht der Fall, so muss er rechnerisch ermittelt werden. Man benutzt dabei auch mit Vorteil das Fahrdrähtspeisekabel und den Fahrdräht selbst vor und nach der Messung als Telephonleitung.

Blosse Berechnungen der Widerstände von Schienenspeisekabeln aus Länge und Querschnitt sind im allgemeinen nicht sehr zuverlässig, weil