

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000294738

W 1/3
178.

Elektrotechnik in Einzel-Darstellungen

Herausgegeben von Dr. G. Benischke

Heft 4

DIE

VAGABUNDIERENDEN STRÖME

ELEKTRISCHER BAHNEN

VON

DR. CARL MICHALKE

OBER-INGENIEUR

MIT 34 EINGEDRUCKTEN ABBILDUNGEN

BRAUNSCHWEIG

DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN

1904

ANKÜNDIGUNG.

Das unter dem Titel „Elektrotechnik in Einzeldarstellungen“ neu erscheinende Sammelwerk, dessen viertes Bändchen: „Die vagabundierenden Ströme elektrischer Bahnen“ von Dr. Carl Michalke hiermit vorliegt*), ist in erster Linie für Studierende an höheren technischen Schulen und für Ingenieure bestimmt, die bereits in der Praxis stehen und über einzelne Gebiete der Elektrotechnik zuverlässig unterrichtet zu sein wünschen.

Das Unternehmen trägt einem allgemein empfundenen Bedürfnis Rechnung, da die bisher erschienenen umfangreichen Spezialwerke über die einschlägigen Gebiete und die noch größeren Handbücher über das gesamte Gebiet der Elektrotechnik ihrer Kostspieligkeit wegen naturgemäß nur einem geringen Bruchteil des dafür vorhandenen großen Interessentenkreises zugänglich waren.

Andererseits bürgt für den gediegenen Wert und die vollendete Ausführung des vorliegenden Unternehmens der Umstand, daß durchweg erste Kräfte aus der Praxis, welche zu größeren literarischen Arbeiten am meisten befähigt, für die Ausführung derselben aber am wenigsten Zeit haben, für diese kurzen und gedrängten Einzeldarstellungen als Mitarbeiter gewonnen werden konnten, und an deren Spitze ein so hervorragender Fachmann wie Oberingenieur Dr. Gustav Benischke als Herausgeber des ganzen Werkes genannt wird.

*) Früher erschienen:

- I. Heft: **Benischke, Dr. G., Die Schutzvorrichtungen der Starkstromtechnik gegen atmosphärische Entladungen.** Mit 43 Abbildungen. Preis geh. *M.* 1,20, geb. *M.* 1,60.
- II. Heft: **Benischke, Dr. G., Der Parallelbetrieb von Wechselstrommaschinen.** Mit 43 Abbildungen. Preis geh. *M.* 1,20, geb. *M.* 1,60.
- III. Heft: **Benischke, Dr. G., Die Grundgesetze der Wechselstromtechnik.** Mit 113 Abbildungen. Preis geh. *M.* 3,60, geb. *M.* 4,20.

Braunschweig, im Juli 1904.

Friedrich Vieweg und Sohn.

REPRINT OF BOOK

BY THE AUTHOR

THE AUTHOR'S

REMARKS

ON THE

REMARKS

OF THE

REMARKS

ON THE

REMARKS

ELEKTROTECHNIK
IN
EINZELDARSTELLUNGEN

UNTER MITWIRKUNG HERVORRAGENDER FACHMÄNNER

HERAUSGEGEBEN VON

DR. GUSTAV BENISCHKE

VIERTES HEFT

DIE VAGABUNDIERENDEN STRÖME
ELEKTRISCHER BAHNEN

VON

DR. CARL MICHALKE

MIT 34 EINGEDRUCKTEN ABBILDUNGEN

BRAUNSCHWEIG
DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN
1904

DIE
VAGABUNDIERENDEN STRÖME
ELEKTRISCHER BAHNEN

VON

DR. CARL MICHALKE
OBER-INGENIEUR

MIT 34 EINGEDRUCKTEN ABBILDUNGEN

BRAUNSCHWEIG
DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN
1904



II- 351675

Alle Rechte, namentlich dasjenige der Übersetzung in fremde
Sprachen, vorbehalten

II ~~5238~~



Akc. Nr.

~~4662~~ / 50

VORWORT.

Die Litteratur über die Stromentweichungen aus den zur Stromleitung benutzten Schienen elektrischer Straßensbahnen ist zwar sehr umfangreich, findet sich aber in verschiedenen Zeitschriften zerstreut, so daß es schwierig ist, sich rasch hierüber zu orientieren, zumal die verschiedenen Fachzeitschriften nicht jedermann bequem zur Hand sind. An der Frage, inwieweit die in die Erde entweichenden vagabundierenden Ströme Störungen oder Zerstörungen anrichten können, oder wie solche Übelstände zu vermeiden sind, sind interessiert der Bahntechniker, der die Bahnanlagen zu entwerfen und auszuführen hat, der Gas- und Wassertechniker, der die Rohre verlegt, der Chemiker, der die Korrosionserscheinungen untersucht, die Behörden als Besitzer der Gas- und Wasserrohre, der Physiker und die Telephon- und Telegraphenbehörde. Obgleich die Ansichten über die betreffenden Fragen noch zum Teil auseinander gehen, erschien es doch wünschenswert, schon jetzt das vorhandene Material zu sichten und zusammenzustellen, um so vielleicht auch zu neuen Arbeiten und Versuchen, die weitere Klärung bringen können, anzuregen. Ich bin daher gern der Aufforderung des Herrn Dr. Benischke nachgekommen, in einem Hefte der „Elektrotechnik in Einzeldarstellungen“ das Material über die vagabundierenden

Ströme zusammenzustellen. Der Inhalt des Heftes soll und kann keine allgemein gültige Anweisung zur Vermeidung oder Beseitigung der Störungen geben, da hierbei zu viele Faktoren mitsprechen, die von den örtlichen Verhältnissen abhängen. Das Heft soll vielmehr nur schnell über die einzelnen Punkte Auskunft geben.

Da die Mittel zur Vermeidung und Bekämpfung der Gefahren sich auf die Kenntnis des Verlaufs und der Größe der vermutlich auftretenden Erdströme stützen, so ist auch der Stoff zum Teil rechnerisch behandelt worden. Die entwickelten Formeln sollen hauptsächlich nur den Einfluss der einzelnen in Betracht kommenden Faktoren zeigen. Die Rechnungen sind durchweg elementar durchgeführt, die strengere mathematische Behandlung ist in Fußnoten beigefügt.

Charlottenburg, im Juni 1904.

Dr. C. Michalke.

INHALTSVERZEICHNIS.

	Seite
Allgemeines	1
Erdströme bei gleichmäßiger Strombelastung der Geleise	2
Erdströme bei gleichmäßig zunehmender Strombelastung der Ge- leise	13
Widerstandswerte	21
Spannungsverteilung in der Erde	25
Korrosionsströme	32
Korrosionsströme, die nicht von den Bahnströmen herrühren	37
Korrosionen	38
Messungen	46
Abwehrmittel	62
Sonstige Störungen der vagabundierenden Ströme	75
Schluss	80
Zusammenstellung der verwendeten Bezeichnungen	82
Abkürzungen	82
Register	83

Allgemeines.

Ein Stromleiter kann durch geeignete Isolation stets so geschützt werden, daß keine nennenswerte Stromableitung in die Umgebung erfolgt, auch wenn diese für sich den Strom gut leiten würde. Ist es aber nicht möglich, den Stromleiter gegen die leitungsfähige Umgebung genügend zu isolieren, so wird je nach den Verhältnissen die Umgebung mehr oder minder an der Stromfortleitung teilnehmen. Es ist dies bei Strafsenbahnschienen der Fall, die zur Fortleitung des Stromes benutzt werden. Ein Teil des Stromes verläßt die Schienen und verzweigt sich in der Erde, um an geeigneten Stellen wieder in die Schienen einzutreten. Diese von den Schienen abirrenden Ströme werden gewöhnlich als vagabundierende Ströme bezeichnet. Diese vagabundierenden Ströme treten in vermindertem Maße auch bei Dreileiteranlagen mit blankem Mittelleiter auf, sie können in stärkerem Maße in Kabelleitungen auftreten, wenn diese Isolationsfehler aufweisen.

Isolationsfehler an Kabeln geben meist nur zu lokalen Störungen Veranlassung, die sich in der Mehrzahl der Fälle leicht ermitteln und schnell beseitigen lassen. Die aus dem blanken Mittelleiter in die Erde austretenden Ströme lassen sich bei richtiger Stromverteilung so gering halten, daß sie praktisch zu Schäden keine Veranlassung geben. Es werden daher im folgenden im wesentlichen nur die aus den Schienen elektrischer Strafsenbahnen austretenden Ströme berücksichtigt.

Durch das Auftreten der vagabundierenden Ströme werden die Schienen zum Teil entlastet, da durch die Leitungsfähigkeit der Erde die gesamte Leitungsfähigkeit für den Bahnstrom erhöht wird. Der Spannungsverlust in den Schienen und der Energieverlust wird hierdurch vermindert. Es wäre demnach von Vor-

teil, die Erde mit zur Fortleitung des Stromes zu benutzen, wenn anderseits nicht hiermit Nachteile verbunden wären.

Die Erdströme verändern die örtlichen Werte des Erdmagnetismus der Größe und Richtung nach. Es werden hierdurch Messungen, bei denen der Erdmagnetismus eine Rolle spielt, gestört oder unmöglich gemacht. Diese Störungen sind um so unangenehmer, da die Erdströme infolge der wechselnden Belastung des Bahnnetzes fortwährend in Richtung und Stärke sich ändern, so daß ungeschützte Galvanometernadeln nicht zur Ruhe kommen. Es können ferner die aus den Straßenbahnschienen ausbrechenden Ströme in Telephon-, Telegraphen- und Signalanlagen, bei denen die Erde zur Stromrückleitung benutzt wird, eindringen und die betreffenden Anlagen stören.

Während die erwähnten Störungen ohne weiteres der genaueren Beobachtung und Kontrolle zugänglich sind, sind die durch die vagabundierenden Ströme hervorgerufenen elektrolytischen Einwirkungen, die verborgen in der Erde vor sich gehen, ungleich schwerer zu bekämpfen. Durch Elektrolyse werden Metallmassen in der Erde überall dort korrodiert, wo die in die Metallmassen eingedrungenen Ströme in die Erde zurücktreten. Es ist hierbei um so größere Vorsicht geboten, da gerade an Orten mit großer Verkehrsdichte, wo also größere Belastungen der Schienen elektrischer Bahnen auftreten, auch ausgedehnte metallische Rohrleitungen sich befinden, zumal in größeren Städten fast ausschließlich die Schienen zur Stromrückleitung benutzt werden. Die Verhütung der Zerstörung der Rohrleitungen durch die vagabundierenden Ströme ist bei den großen in Betracht kommenden Werten eine der wichtigsten Aufgaben der Bahntechnik.

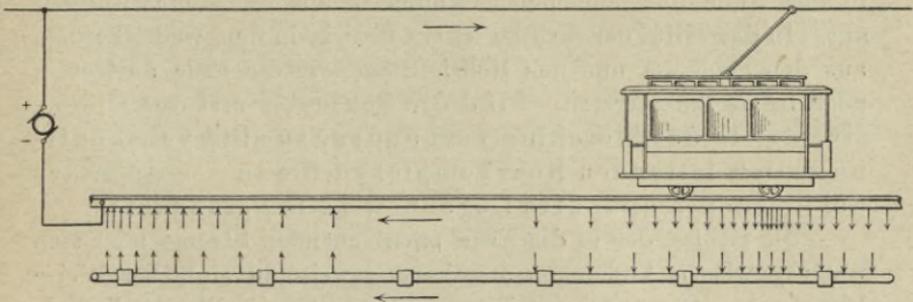
Erdströme bei gleichmäßiger Belastung der Schienen.

Sind die Schienen einer elektrischen Straßenbahn nicht von Erde isoliert, so fließt nicht der gesamte Nutzstrom durch die Schienen zum Kraftwerk (Fig. 1) zurück, ein Teil entweicht in die Erde, verzweigt sich in der Erde, um schließlich wieder zu den Schienen zurückzukehren. Die Verzweigung in der Erde hängt von der Leitfähigkeit des Erdbodens in den einzelnen Bezirken und von der Lage und Beschaffenheit der in der Erde

befindlichen Metallteile ab. Grundwasserverhältnisse, Flüsse, Seen u. s. w. beeinflussen mehr oder weniger den Verlauf der Erdströme. Einen größeren Einfluss haben ausgedehnte Metallrohrleitungen, wenn sie an den Stofsstellen kontinuierlich elektrisch leitend verbunden sind.

Die aus den Schienen in die Erde übertretenden Ströme haben an der Austrittsstelle einen Übergangswiderstand (w_u)¹⁾ zu überwinden, den man sich zur rechnerischen Verfolgung als dünne, schlecht leitende Haut an den Schienen vorstellen kann. Ferner ist der Ausbreitungswiderstand (w_e) in der Erde zu überwinden, der von der Bodenbeschaffenheit und den Metallmassen in der Erde abhängt. Beim Übertritt des Stromes von den Schienen zu benachbarten Metallrohren ist daher der Widerstand

Fig. 1.



$w_e + w_u$ zu überwinden. Zur Vereinfachung der Rechnung dürfte es zumeist genügen, beide Größen vereint $w = w_e + w_u$ als Übergangswiderstand etwa von den Schienen zum Grundwasser oder von den Schienen zur Rohrleitung zu betrachten. Die unter dieser Annahme theoretisch errechneten Werte für die Erdströme sind etwas zu ungünstig, geben also einen Grenzwert. Diese Werte sind um so höher, als die tatsächlich auftretenden Ströme, je größer w_e ist oder je größere Spannungsdifferenzen längs der Geleise in der Erde auftreten. Der auftretende Fehler ist daher bei Überlandbahnen größer als bei Bahnen in Städten, in denen ein Spannungsausgleich zum Teil durch die Rohrleitungen erfolgt. Die Fehler sind aber nicht so bedeutend, daß die Rechnung allzu ungenau würde. Kann sich nämlich der Strom in

¹⁾ Vgl. Ulbricht, E. T. Z. 1902, S. 212.

der Erde weit ausbreiten, so hängt der Widerstand wesentlich von der Gröfse der metallischen Leiter ab, von denen der Strom in die Erde übergeht. Fließt zwischen zwei metallischen Kugeln¹⁾ in der Erde Strom, so ist der Widerstand weniger von dem Abstände der Kugeln als von der Oberflächengröfse der Kugeln abhängig.

Ist die Oberleitung der Strafsenbahn, wie dies gewöhnlich der Fall ist, mit dem positiven Pol der Maschine verbunden, und befindet sich nur ein Wagen auf der Strecke (Fig. 1), so sind die Austrittsstellen des Stromes aus den Schienen auf Seite der Konsumstelle, die Wiedereintrittsstellen des Stromes in die Schienen auf Seite des Schienenspeisepunktes. Umgekehrt treten bei kontinuierlich leitend verbundenen Rohrkomplexen die Ströme an der Konsumstelle in die Rohrleitung ein und treten in der Nähe des Schienenspeisepunktes aus den Rohrleitungen aus. In der Mitte der Strecke ist ein Bezirk, in dem weder Ströme aus den Schienen und den Rohrleitungen in die Erde austreten, noch in sie hineintreten. Sind die Schienen mit dem negativen Pole der Maschine verbunden, so sind von kontinuierlich leitenden Rohrkomplexen die in der Nähe des Schienenspeisepunktes liegenden Teile gefährdet²⁾.

Die Gröfse der in die Erde entweichenden Ströme läfst sich unter gewissen Annahmen annäherungsweise in einfacher Weise berechnen. Die Geleise seien unverzweigt, ein Wagen befinde sich am Ende der Strecke (entsprechend Fig. 1).

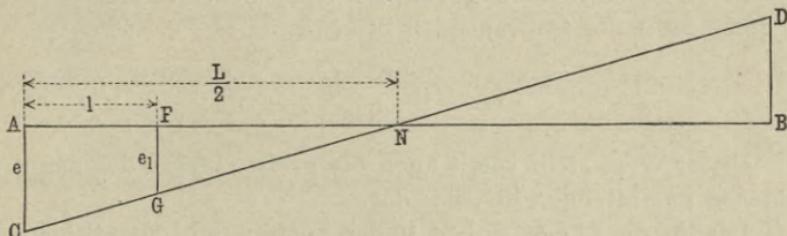
Es sei, in Fig. 2 schematisch gezeichnet, A der Schienenspeisepunkt, AB die gesamte Geleisstrecke von der Länge L (von Kallmann freitragende Strecke genannt). Der Strafsenbahnwagen befinde sich am Ende der Strecke (bei B). Der Wagen verbrauche den Strom J . In der Erde (Grundwasser von großer Ausdehnung oder weit verzweigter Rohrkomplex) seien keine nennenswerten Spannungsdifferenzen vorhanden. Es treten dann

¹⁾ Bell-Rasch, Stromverteilung für elektrische Bahnen 1898, S. 32.

²⁾ In den folgenden Ausführungen ist stets angenommen, daß das Geleis mit dem negativen Pole der Maschine verbunden ist, wie dies in der Praxis ja zumeist der Fall ist. Ist das Geleis mit dem positiven Pole verbunden, so sind die Schlußfolgerungen sinngemäß zu ändern.

derartige Spannungsverteilungen auf, daß die Schienen am Speisepunkte negativ, am Ende der freitragenden Strecke positiv gegen die Erde sind. In der Mitte befindet sich eine neutrale Stelle N . Die Spannungen gegen Erde sind bei A und B gleich, sie sind in Fig. 2 durch $AC = BD = e$ dargestellt. Die Spannungen

Fig. 2.



des Geleises gegen Erde nehmen von den Enden der freitragenden Strecke nach der neutralen Stelle N gesetzmäßig ab. Angenähert kann angenommen werden, daß die Spannung proportional der Entfernung abnimmt. Ist e_l die Spannung gegen Erde in der Entfernung l , vom Schienenspeisepunkte an gerechnet, so ist

$$e_l = \frac{e(L - 2l)}{L}.$$

Die Stromentweichung von den Schienen nach der Erde auf bestimmter Geleislänge ist von der Spannung gegen die Erde abhängig und von dem Übergangswiderstande. Ist w der mittlere Übergangswiderstand für die Längeneinheit, so ist die Stromentweichung für die Längeneinheit am Anfang oder Ende der Strecke (bei A oder B)

$$i_0 = \frac{e}{w}.$$

In N , der Mitte der freitragenden Strecke, ist keine Spannung gegen Erde vorhanden. Es stellt daher e auch die Spannung zwischen A und N dar. Diese Spannung würde, wenn keine wesentlichen Stromübergänge zur Erde stattfinden, $\frac{JWL}{2}$ sein, wobei W der mittlere Schienenwiderstand für die Längeneinheit ist. Meist ist es ausreichend, mit obigem Werte zu rechnen. Berücksichtigt man die Stromübergänge nach

$$i_l = \frac{JW(L - 2l)}{2w}, \dots \dots \dots 2a)$$

$$i = \frac{J(L - l)l}{2} \cdot \frac{W}{w} \dots \dots \dots 3a)$$

Um gröfsere Annäherung¹⁾ zu erhalten, kann man zur Berechnung von p setzen: $pJ = \frac{J + J_1}{2}$, wobei J den Schienenstrom am Speisepunkte, J_1 am Punkte F bedeutet. Da $J_1 = J - i$ ist, so ist $pJ = \frac{2J - i}{2}$. Wird dieser Wert in Gleichung 3) eingesetzt, so erhält man nach Umformung:

$$p = \frac{1}{\frac{L - l}{4} \cdot l \frac{W}{w} + 1},$$

d. h. einen Wert, der bei nicht zu grossem L oder $\frac{W}{w}$ nahe an 1 liegt.

Den gesamten auf der Strecke A bis N austretenden Strom erhält man für $l = \frac{L}{2}$. Es wird:

$$i_{\max} = \frac{JL^2}{8} \cdot \frac{W}{w} = 0,125 \frac{JWL^2}{w} \dots \dots \dots 4)$$

Bezeichnet man den gesamten Geleiswiderstand WL mit W_L , den gesamten Übergangswiderstand auf der freitragenden Strecke $\frac{w}{L} = w_L$, so wird

$$i_{\max} = \frac{J}{8} \frac{W_L}{w_L}, \dots \dots \dots 4a)$$

d. h. der gesamte aus den Schienen in die Erde austretende Strom ist proportional dem Geleiswiderstande und der Über-

¹⁾ Genaue, streng mathematisch entwickelte Formeln erhält man durch Aufstellung und Lösung von Differentialgleichungen, wie sie E. T. Z. 1895, S. 417 ff. durchgeführt sind. Es ergibt dies für die Berechnung des Erdstromes eine Kettenlinie, deren freitragende Strecke gleich der Geleislänge, und deren Durchhang der Gröfse des Erdstromes entspricht. Vgl. auch E. T. Z. 1902, S. 208.

leitungsfähigkeit auf der freitragenden Strecke von den Schienen zur Erde.

Nach Messungen von Larsen und Faber¹⁾ betrug bei einer Schienenspeisung von $J = 100$ Amp. der Erdstrom 15 Amp. für eine Strecke von 1210 m bei einem Schienenwiderstande von 210×10^{-6} Ohm für 6 m Länge. Nimmt man an, daß der Geleiswiderstand durch die Schienenverbindungen um 50 Proz. erhöht wird, so erhält man für den Erdübergangswiderstand rund 0,13 Ohm für 1 km. Der Wert stimmt mit andernorts auf andere Weise gefundenen Werten für den Erdübergangswiderstand überein. Die Gleichungen geben daher für die Praxis genügend genaue Werte.

Der in den Schienen verbleibende Strom ist

$$J' = J - i.$$

In der Entfernung l (vom Schienenspeisepunkte aus gemessen) ist daher der Schienenstrom

$$J' = J \left(1 - \frac{L-l}{2} l \frac{W}{w} \right) \dots \dots \dots 5)$$

Am neutralen Punkte (N) ist der Schienenstrom am geringsten. Er ist

$$J'_{\min} = J \left(1 - \frac{L^2}{8} \frac{W}{w} \right) \dots \dots \dots 6)$$

Die Spannung der Schienen gegen Erde nimmt vom Schienenspeisepunkte an ab, sie ist in der Entfernung l :

$$e_l = \frac{JW}{2} (L - 2l) \dots \dots \dots 7)$$

Aus den Rechnungen, die für den einfachsten Fall einer unverzweigten Bahnstrecke mit nur einem Wagen auf dem Endpunkte der Strecke gelten, folgt, daß die Entwicklung der Erdströme vermindert wird:

1. Wenn W (Schienenwiderstand) möglichst klein ist, wenn also starkes Schienenprofil und gut leitende sichere Stofsverbindungen genommen werden. Die Leitungsfähigkeit des Schienenmaterials nimmt mit zunehmender Härte ab. Es kann daher mit Rücksicht auf die geforderte Dauer-

¹⁾ E. T. Z. 1901, S. 1038.

haftigkeit der Geleise die Leitungsfähigkeit des Eisens nicht zu hoch gewählt werden.

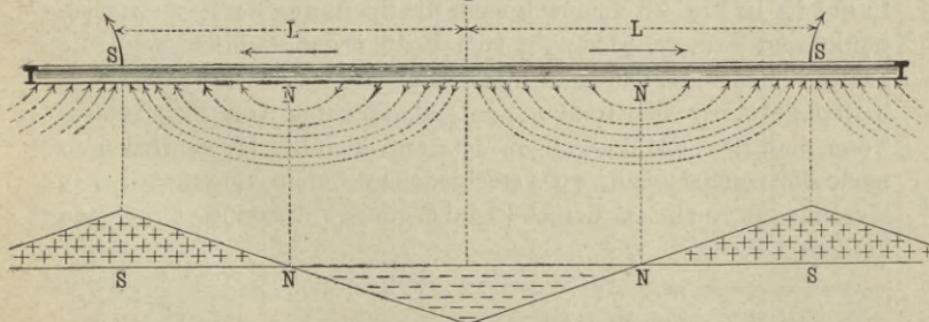
2. Der Übergangswiderstand (w) der Schienen zur Erde soll möglichst groß sein. Die Schienen sollen bei gut leitendem Erdboden, soweit dies die örtlichen Verhältnisse zulassen, möglichst gut isoliert sein. Metallrohre in der Erde sollen nicht zu nahe an den Schienen verlegt werden. Kommen die Rohre an einzelnen Stellen den Schienen sehr nahe, so wird dort der Ausbreitungswiderstand (w_e) sehr klein. An solchen Stellen tritt eine ähnliche Wirkung wie bei Fehlerstellen elektrischer Leitungen auf, indem dort eine stärkere Stromaustritts- oder -eintrittsdichte auftritt, die leicht zu Korrosionen Veranlassung geben kann. Stellen, an denen Rohrleitungen nahe an die Geleise treten, sind daher mit besonderer Vorsicht zu behandeln, indem sie schärfer kontrolliert werden oder indem man für geeignete Isolierung sorgt.

3. Die Erdströme nehmen mit dem Quadrate der Länge (L) der freitragenden Strecke zu. Es ist daher diese Länge nach Möglichkeit kurz zu halten. Dies kann z. B. durch Anordnung einer größeren Anzahl von Schienen- speisepunkten erfolgen.

4. Die Strombelastung in den Schienen darf nicht zu hoch sein. Die Schienenspeisepunkte müssen daher der Geleisverzweigung und der Verkehrsdichte entsprechend verteilt werden, um keine zu hohe Stromdichte in den Schienen zu erhalten.

Wird die Strecke in mehreren Punkten gespeist (Fig. 3), so ist als freitragende Strecke die halbe Entfernung der Schienen-

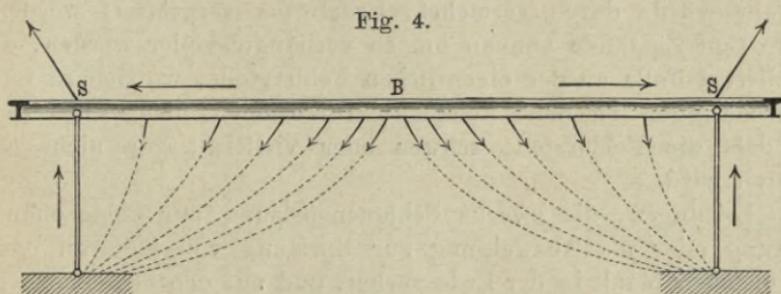
Fig. 3.



Ist der Geleiswiderstand einschließlich der Stofsverbindungen bekannt, so kann unter Benutzung der Gleichung 8) der Übergangswiderstand und unter Benutzung von Gleichung 4) der Erdstrom für eine unverzweigte Strecke bei gleichmäßiger Strombelastung berechnet werden.

Macht das Geleis eine scharfe Krümmung, so wird die Entwicklung von Erdströmen nur insofern begünstigt, als der Ausbreitungswiderstand in Erde etwas vermindert wird. Die Dichte für die längs des Geleises austretenden Ströme ist auch in diesem Falle angenähert entsprechend der Gleichung 2).

Abzweigungen können je nach ihrer Lage stromsaugend oder ausstrahlend wirken. Abzweigungen der Geleise vermehren den Überleitungswiderstand an den betreffenden Stellen, Abzweigungen in der Nähe des Speisepunktes wirken stromsaugend,



solche am Endpunkte der freien Strecke wirken stromausstrahlend, solche in der Nähe des neutralen Punktes sind indifferent, wenn die Abzweigungen nicht in die Schutz- oder Gefahrbezirke hineinragen. Durch Abzweigungen, die Erdströme aufnehmen oder abgeben, wird der Stromverlauf in der Erde verändert, Schutz-, neutrale und Gefahrzone werden verschoben.

In stärkerem Maße als Ausläufer wirken direkte Erdungen der Schienen, sei es daß die Schienen durch besondere Platten geerdet oder mit Metallrohren in der Erde verbunden werden. Werden beispielsweise an den Speisepunkten die Schienen geerdet, um aus Rohrleitungen Ströme direkt in die Schienen abzusaugen, so treten, möglichst widerstandslose Erdung vorausgesetzt, Ströme längs der ganzen Geleisstrecke (Fig. 4) aus den Schienen aus, um an Erdungsstellen wieder zu den Schienen zurückzukehren. Neutrale Stellen treten also nicht auf. Ist die

Erdung unvollkommen, so bilden sich neutrale Bezirke, die um so weiter von den Speisepunkten S entfernt sind, je größer die Erdungswiderstände sind. Man kann auf diese Weise die Rückströmung nach den Schienen lokalisieren, doch werden die gesamten Erdströme durch Verbesserung des Erdübergangswiderstandes um so mehr vermehrt, je besser die Erdüberleitung ist. An bestimmten Stellen auf diese Weise unschädlich gemachte Ströme können infolge ihrer größeren Dichte an anderen Stellen um so mehr schaden.

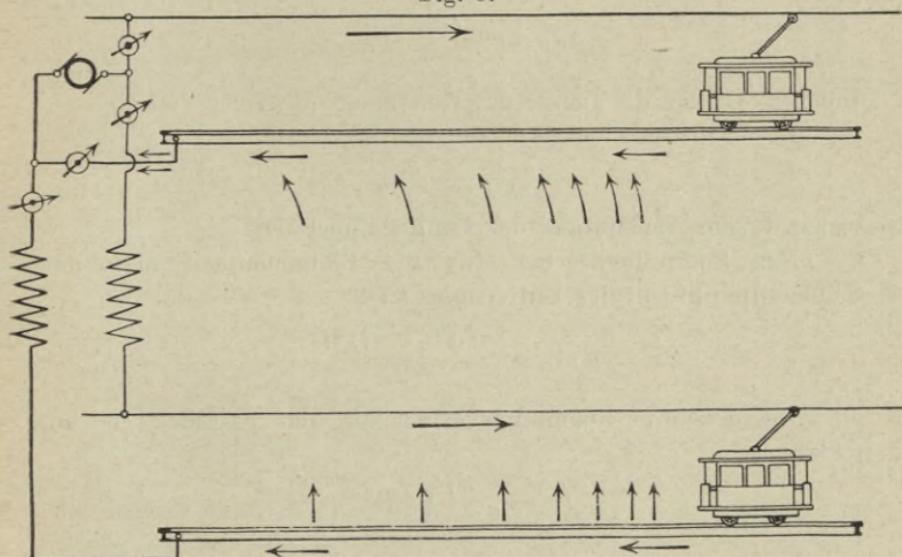
Erdungen am Ende der freitragenden Strecke (etwa in B , Fig. 4) oder geringer Übergangswiderstand etwa durch zu große Annäherung von Rohrleitungen an die Geleise haben umgekehrt eine Lokalisierung der aus den Schienen austretenden Ströme zur Folge. Die Gefahrbezirke würden hierdurch erweitert, die Gefahr würde durch vermehrte Erdströme vergrößert werden. Derartige Zustände können um so verhängnisvoller werden, da in diesem Falle an der eigentlichen Fehlerstelle, wo Geleise und Rohrleitungen zu nahe kommen, Korrosionen nicht auftreten, so daß die Fehlerstelle schwer oder vielleicht gar nicht ermittelt wird.

Leitungen, die zwecks Schienenspeisung zur Schienenentlastung oder als Abzweigung zur Speisung von Motoren oder dergleichen blank in der Erde verlegt und mit den Schienen verbunden werden, vergrößern die Überleitungsfähigkeit nach der Erde und tragen daher zur Entwicklung von schädlichen Erdströmen bei. Werden solche unisolierte Leitungen parallel zu dem Geleise verlegt, so vermindern sie zwar den Geleiswiderstand, sie können aber trotzdem die Erdströme verstärken, wenn durch sie die Überleitungsfähigkeit nach Erde in höherem Grade als die Leitfähigkeit in den Geleisen verstärkt wird. Die Überleitungsfähigkeit solcher Drähte nach Erde kann trotz der im Verhältnis zu den Schienen geringen Oberfläche in Betracht kommen, wenn die Leitungen tiefer als die Schienen liegen.

Mangelhafte Schienenstofsverbindungen vermehren den Schienenwiderstand und daher auch die Erdströme. Ist der Strom nicht auf der ganzen Strecke gleich stark, sondern nimmt er nach den Schienenspeisepunkten zu, so haben fehlerhafte Stofsverbindungen um so stärkeren Einfluß, je näher sie an den Speisepunkten liegen.

Stärkere Erdströme können sich auch bei unzuweckmäßiger Gesamtanordnung entwickeln. Werden beispielsweise (Fig. 5) zwei räumlich getrennte, nicht zusammenhängende Geleise vom gleichen Kraftwerk derart gespeist, daß die Speiseleitung für das eine Geleis nahezu ohne Spannungsverlust ist, während die Speiseleitung für das andere Geleis größere Spannungsverluste hat, so wird der Rückleitungsstrom des entfernteren Geleises nur teilweise durch die Schienenspeiseleitungen gehen, während

Fig. 5.



ein Teil den widerstandsloseren Weg durch die Erde und das nähere Geleis nehmen wird. Werden Stromzeiger in die Speiseleitungen für Oberleitung und Schienen eingeschaltet, so zeigt der Stromzeiger in der Speiseleitung für das entferntere Geleis um den Betrag der Erdströme weniger, der für das nähere Geleis mehr als die Stromzeiger für die Oberleitung. Diese Erdströme werden vermieden, wenn die beiden Netze von getrennten Maschinen gespeist werden.

Erdströme bei gleichmäßig zunehmender Schienenbelastung.

Die obigen Schlusfolgerungen wurden der Einfachheit wegen aus den Gleichungen abgeleitet, die für gleichmäßige Schienen-

belastung gelten. Sinngemäß gelten die Folgerungen auch für den allgemeinen Fall, daß sich mehrere Wagen in bestimmten Abständen auf der Strecke befinden. In diesem Falle nimmt die Stromstärke in den Schienen vom Endpunkte der freitragenden Strecke bis zum Speisepunkte zu. Wird die Stromstärke gleichmäßig zunehmend angenommen, so ist, wenn der Schienenstrom am Speisepunkte gleich J , am Ende der freitragenden Strecke gleich Null gesetzt wird, der Strom J_l in der Entfernung l vom Speisepunkte an gerechnet

$$J_l = \frac{(L - l) J}{L},$$

wobei L wieder die Länge der freitragenden Strecke ist.

Der Schienenwiderstand auf der Strecke l ist

$$W_l = l W,$$

wobei W der Widerstand der Längeneinheit ist.

Der Spannungsverlust für die Längeneinheit an einem Schienenpunkte in der Entfernung l ist

$$J_l W = \frac{J (L - l) W}{L}.$$

Der gesamte Spannungsverlust auf der Strecke l ist angenähert

$$\frac{J + J_l}{2} \cdot l W$$

oder

$$E_l = \frac{J (2L - l)}{2L} \cdot l W. \dots \dots \dots 9)$$

Der Spannungsverlust auf der ganzen freitragenden Strecke ist (für $l = L$)

$$E_L = \frac{J L W}{2} \dots \dots \dots 10)$$

Die Gleichung 9) kann einfacher gestaltet werden, wenn statt der Strecke l , die vom Speisepunkte an gemessen ist, die Strecke x , vom Endpunkte der freitragenden Strecke an gemessen, eingeführt wird. Es ist $x = L - l$.

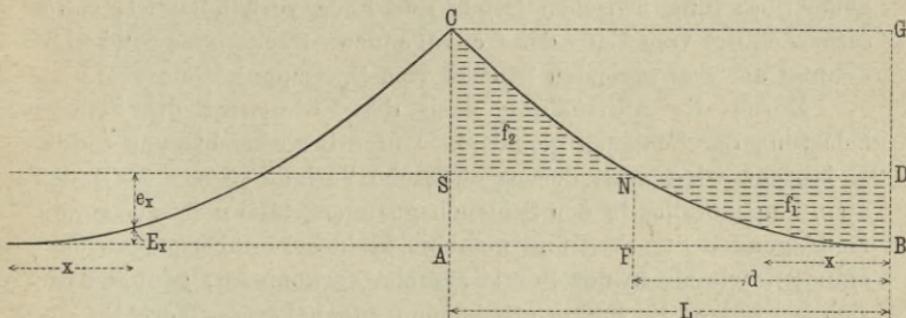
Es ist alsdann der Spannungsverlust auf der Strecke x :

$$E_x = \frac{J}{2} \frac{W}{L} x^2 \dots \dots \dots 9a)$$

Es ist dies die Gleichung einer Parabel. Der Spannungsverlust nimmt daher vom Endpunkte der freien Strecke an nach einer Parabel zu.

Für die Abströmung von den Schienen nach der Erde ist die Spannung gegen Erde maßgebend. Trägt man (Fig. 6) den Spannungsverlust in den Schienen vom Endpunkte B der freitragenden Strecke L graphisch auf, so erhält man die Kurve BC . Der Übersichtlichkeit wegen ist die Kurve über den Speisepunkt A hinausgehend gezeichnet. Es sei das Erdpotential durch

Fig. 6.



die Strecke SD dargestellt, die die Kurve BC im neutralen Punkte N schneidet. CS stellt dann die Spannung am Speisepunkte, BD die Spannung am Endpunkte gegen Erde dar. Die Abströmung nach der Erde an den einzelnen Geleispunkten entspricht der Ordinate der Kurve BC gegenüber der Abszisse SD . Die Fläche $BND = f_1$ stellt den gesamten Erdstrom dar, der auf der Strecke BF aus den Schienen ausgetreten ist, die Fläche $CNS = f_2$ stellt den gesamten Erdstrom dar, der auf der Strecke FA wieder zu den Schienen zurückgekehrt ist. Es ist daher $f_1 = f_2$.

Für die Quadratur der Parabel gilt die Beziehung

$$CBG = \frac{2}{3} AC \cdot AB = \frac{2}{3} LE_L = \frac{2}{3} \frac{JL^2 W}{2}.$$

Da $f_1 = f_2$ ist, ist die Fläche CBG gleich dem Rechteck

$$CSDG = DG \cdot AB = (E_L - E_d) L,$$

wobei $d = BF$ den Abstand des neutralen Punktes vom Endpunkte der freien Strecke und $E_d = NF$ den Spannungsverlust

auf der Strecke d bedeutet. Unter Berücksichtigung der Gleichung 9 a) ergibt sich:

$$^{2/3} \frac{J L^2 W}{2} = \frac{J W}{2} (L^2 - d^2),$$

demnach

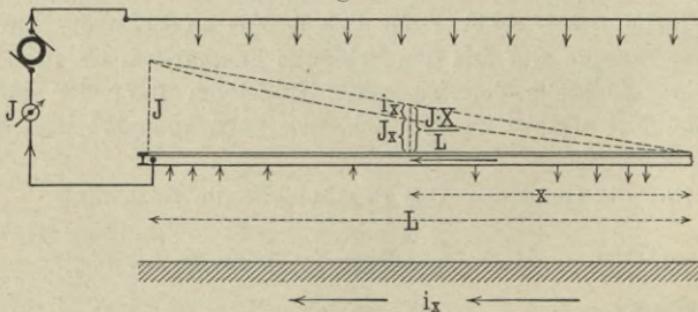
$$d = \frac{L}{\sqrt{3}} = 0,58 L, \dots \dots \dots 11)$$

d. h. unter der Annahme einer vom Speisepunkte aus gleichmäßig abnehmenden Belastung ist der neutrale Punkt, an dem keine Spannung zwischen Geleis und Erde vorhanden ist, rund sechs Zehntel vom Ende der freitragenden Strecke oder rund vier Zehntel der freitragenden Strecke vom Speisepunkte entfernt.

Durch die Abströmung nach der Erde wird die Strombelastung der Schienen geändert. Unter Berücksichtigung dieser Erdströme wird auch der parabolische Verlauf (Kurve BC) des Spannungsabfalles in den Schienen geändert. Bei nicht zu langen freitragenden Strecken und nicht zu kleinen Erdübergangswiderständen, wie sie in der Praxis zumeist vorkommen, genügen die sich bei obiger Rechnung ergebenden angenäherten Werte¹⁾.

¹⁾ Eine genauere Rechnung kann in folgender Weise durchgeführt werden. Wird längs der ganzen freitragenden Strecke dem Geleise Strom zugeführt (Fig. 7), so ist die gesamte dem Geleise zu-

Fig. 7.



geführte Stromstärke in der Entfernung x vom Endpunkte der freitragenden Strecke $\frac{Jx}{L}$, wobei wieder J den Strom am Speisepunkte, L die Länge der freitragenden Strecke bedeutet. Der gesamte auf der

Die Spannungen zwischen Geleis und Erde werden nach Fig. 6 durch die Ordinaten der Kurve BC gegen die Abszisse SD bestimmt. Es ist für einen Geleispunkt in der Entfernung x vom

Strecke x aus den Schienen in die Erde ausgetretene Strom sei i_x . Der wirkliche Schienenstrom ist dann

$$J_x = \frac{Jx}{L} - i_x,$$

demnach

$$dJ_x = \frac{J dx}{L} - di_x.$$

Die Spannungsdifferenz dV für ein kleines Schienenstück von der Länge dx ist

$$-dV = J_x W dx$$

$$\frac{dV}{dx} = -J_x W.$$

Der auf der Länge dx aus den Schienen austretende Erdstrom ist

$$di_x = (V - V_E) \frac{dx}{w},$$

wenn V_E das Erdpotential, V das des Schienenstückes ist. Demnach

$$\frac{dV}{dx} = w \cdot \frac{d^2 i_x}{dx^2}.$$

Durch zweimaliges Differenzieren der obersten Gleichung erhält man

$$\frac{d^2 i_x}{dx^2} = -\frac{d^2 J_x}{dx^2}.$$

Man erhält somit die Differentialgleichung

$$\frac{d^2 J_x}{dx^2} - J_x \frac{W}{w} = 0,$$

deren Auflösung ist:

$$J_x = C_1 e^{x \sqrt{\frac{W}{w}}} + C_2 e^{-x \sqrt{\frac{W}{w}}}.$$

Die Konstanten C_1 und C_2 werden durch die Grenzwerte von x bestimmt. Es ist $J_x = J$ für $x = L$ und $J = 0$ für $x = 0$. Setzt man die so ermittelten Konstanten ein, so erhält man

$$J_x = \frac{e^{x \sqrt{\frac{W}{w}}} - e^{-x \sqrt{\frac{W}{w}}}}{e^{L \sqrt{\frac{W}{w}}} - e^{-L \sqrt{\frac{W}{w}}}} \cdot J.$$

Strecke ein Drittel des Spannungsverlustes auf der ganzen freitragenden Strecke.

Die obigen Spannungswerte zwischen Geleis und Erde gelten nicht mehr, wenn ein verzweigtes Geleisnetz mit einzelnen Ausläufern einen Speisepunkt innerhalb des Geleisnetzes erhält. Durch die Geleisverzweigung wird der Übergangswiderstand nach Erde vermindert. Dementsprechend werden innerhalb des Geleisnetzes die Spannungen gegen Erde vermindert, während am Ende des Ausläufers die entsprechenden Spannungen höher sind.

Der aus den Schienen auf einer kleinen Strecke a in der Entfernung x ausgetretene Strom ist $\frac{e_x a}{w}$, der gesamte auf der Schienenstrecke x ausgetretene Strom wird durch den Teil der Fläche f_1 oder f_2 bestimmt, der durch BD bzw. CS , durch SD , einem Teil der Kurve BC und die Ordinate in der Entfernung x begrenzt wird. Diese Fläche setzt sich aus einem Rechteck $e_x x$ und einem Parabelstück $\frac{2}{3} E_x x$ zusammen. Es ist

$$i_x = (\frac{2}{3} E_x + e_x) \frac{x}{w},$$

oder unter Einsetzung der entsprechenden Werte

$$i_x = \frac{J W x (L^2 - x^2)}{6 L w} \dots \dots \dots 15)$$

Der gesamte aus den Schienen austretende Strom ist (entsprechend Fläche f_1 oder f_2) für $x = \frac{L}{\sqrt{3}}$

$$i_{\max} = \frac{J W L^2 \sqrt{3}}{27 w} = 0.064 \frac{J W L^2}{w} \dots \dots \dots 16)$$

Für Metallrohrleitungen, die sich längs der ganzen Geleisstrecke vom Schienenspeisepunkte bis zum Ende der freitragenden Strecke in elektrisch leitendem Zusammenhange befinden, erstreckt sich die Gefahrzone vom Speisepunkte bis etwa vier Zehntel der freitragenden Strecke. Diese Gefahrzone wird in Fig. 6 durch die Fläche f_2 dargestellt. Für kontinuierlich leitende Rohrleitungen stellt die Fläche f_1 den Schutzbezirk dar.

In Orten mit verzweigten Netzen und mehreren Schienenspeisepunkten bilden sich die Gefahrzonen um den Speisepunkt

herum aus. Die Erdstromdichte in der Nähe der Geleise nimmt mit der Annäherung an den Speisepunkt zu. In der Nähe des neutralen Punktes ist unmittelbar an den Geleisen die Erdstromdichte gering. Die gesamten aus den Schienen ausgetretenen Erdströme haben jedoch in der neutralen Zone ihren höchsten Wert. Diese Ströme sind jedoch zum Teil in gröfserer Entfernung aus den Schienen ausgetreten, sie verzweigen sich stark, so dafs sie in der neutralen Zone von den Schienen gröfsere Entfernung haben. Wegen der weiten Verzweigung ist daher auch die Erdstromdichte nicht grofs.

Die Stromrichtung in der Erde wird durch die verschiedene Leitungsfähigkeit des Erdbodens, durch Metallmassen u. s. w. stark beeinflusst, so dafs namentlich in grofsen Städten mit verzweigten Rohrnetzen eine Gesetzmässigkeit nicht festzustellen ist. Im allgemeinen ist die Stromrichtung an den Speisepunkten zu dem Geleise hin, in der Mitte zwischen zwei Speisepunkten von dem Geleise weg gerichtet. In der neutralen Zone verlaufen die Erdströme parallel zum Geleise nach den Speisepunkten zu.

Wird entgegen der üblichen Anordnung der positive Pol mit der Fahrschiene verbunden, so treten die Schutzbezirke in der Nähe der Speisepunkte, die Gefahrbezirke zwischen den Speisepunkten auf. Die Spannungen gegen Erde in den Gefahrbezirken sind hierbei kleiner, (etwa halb so grofs nach Gleichung 13) und 14), als bei umgekehrtem Leitungsanschlufs, die Gefahrbezirke selbst sind aber ausgedehnter.

Vergleicht man die beiden Gleichungen 4) und 16) für den höchsten auftretenden Erdstrom, so fällt die grofse Verschiedenheit der Koeffizienten auf, 0,125 für den Fall, dafs nur ein Wagen am Ende der Strecke sich befindet, 0,064, wenn die Wagen gleichmäfsig über die ganze Strecke verteilt sind. Die Verschiedenheit erklärt sich dadurch, dafs die näheren Wagen die Geleise nur auf kürzeren Strecken belasten, wobei bedeutend geringere Erdströme auftreten, da diese angenähert mit dem Quadrate der Entfernung des Wagens zunehmen. Es hängt demnach die Gröfse der entwickelten Erdströme von der Belastungsverteilung auf der Strecke ab.

Widerstandswerte.

Um die obigen Gleichungen auswerten zu können, ist die Kenntnis der Widerstandswerte erforderlich. Allgemein gültige Angaben hierüber können nicht gemacht werden, da je nach den verwendeten Materialien und den lokalen Verhältnissen die Werte sehr verschieden sind. Die in der Fachliteratur angegebenen Werte weichen daher auch sehr voneinander ab. Die folgenden Werte können daher auch nur einen ungefähren Anhalt geben.

Der Schienenwiderstand hängt von der Materialbeschaffenheit ab. Es stehen sich hier zwei Forderungen, Härte und Dauerhaftigkeit einerseits und gute Leitungsfähigkeit andererseits, gegenüber. Je nach der Härte und den chemischen Beimengungen schwankt die Leitfähigkeit zwischen 4 bis 8, wobei der Wert von 8 für weiches, für Fahrschienen kaum mehr verwendbares, Material gilt. Je härter das Material ist, um so geringer ist die Leitungsfähigkeit. Für Fahrschienen muß man daher aus mechanischen Gründen die geringere Leitfähigkeit in Kauf nehmen. v. Gaisberg giebt¹⁾ für 1 m Schiene für eine Stahlschiene von 6464 qmm Querschnitt im Mittel den Wert 0,000 03 Ohm bei 29° C an. Es entspricht dies einer Leitungsfähigkeit von rund 5. Werte von 5 bis 6 können wohl allgemein dem gebräuchlichen Schienenmaterial zu Grunde gelegt werden. Der Widerstand für 1 km Einfachgeleis würde hiernach ohne Berücksichtigung des Widerstandes an den Stofsstellen 0,015 Ohm, also für 1 km Doppelgeleis 0,007 5 Ohm sein. Kallmann²⁾ giebt pro 1 km Doppelgeleis einen durchschnittlichen Wert von etwa 0,007 5 Ohm für Schienen Phönix XIV a. oder XIV f. an. Durch den Widerstand an den Stofsstellen wird der gesamte Geleiswiderstand erhöht. Nach den Leitsätzen des Verbandes Deutscher Elektrotechniker, betreffend den Schutz metallischer Rohrleitungen gegen Erdströme elektrischer Bahnen (§ 6), sollen die Schienen an den Stöfsen derart leitend verbunden sein, daß der Widerstand des verlegten Geleises durch die Stöße um nicht mehr als 0,03 Ohm auf 1 km einfachen Geleises vermehrt wird. Nach v. Gaisberg können Stofsstellen so hergestellt werden, daß eine nennenswerte Widerstands-

¹⁾ E. T. Z. 1903, S. 492.

²⁾ Ibid. 1899, S. 163.

erhöhung nicht auftritt. Im Betriebe wird man sich auf die Leitungsfähigkeit der Laschenverbindung für die Dauer nicht verlassen können, man kann daher die Leitungsfähigkeit der Laschenverbindung unberücksichtigt lassen und den Widerstand der Stofsverbindungen am einfachsten aus den Widerständen der zu den Stofsverbindungen verwandten Kupferdrähte berechnen. Obige Werte von 0,03 Ohm für Stöße auf 1 km Länge dürften bei fehlerfreien Geleisen als obere Grenzwerte zu betrachten sein. Ulbricht¹⁾ rechnet mit einem Widerstande von 0,01 Ohm für 1 km Doppelgeleis (einschließlich Stofsverbindungen). Rasch²⁾ giebt für Schienen von 30 kg pro Meter 0,019 Ohm für 1 km Einfachgeleis unter Vernachlässigung der Schienenverbindungen an. Es würde dies einer Leitfähigkeit von rund 6,5 entsprechen. Zur Berechnung des Widerstandes der Stofsstellen nimmt Rasch für gut eingesetzte Verbindungsbolzen einen Widerstand von 0,000 2 Ohm pro Kontakt an. Einschließlich der Verbindungsdrähte würde der Widerstand für 1 km Schienenleitung durch die Stofsstellen um 0,045 5, also für 1 km Geleis um rund 0,023 Ohm vermehrt werden.

Für den Übergangswiderstand von Schienen zur Rohrleitung giebt Kallmann³⁾ für Berliner Boden einen Wert von 0,1 bis 0,2 Ohm pro 1 km Doppelgeleis an. In diesem Werte sind Übergangswiderstand (w_u) und Ausbreitungswiderstand (w_e) einbegriffen. Ulbricht⁴⁾ rechnet mit einem Übergangswiderstande (w_u) von 0,2 Ohm und einem Ausbreitungswiderstande (w_e) von 0,1 Ohm pro 1 km. Die Werte sind je nach den örtlichen Verhältnissen verschieden. In Städten mit verzweigtem Rohrnetz und stellenweise großer Annäherung der Rohre an die Schienen sind die Überleitungswiderstände verhältnismäßig niedrig. Die Verschiedenheiten in den einzelnen Angaben sind groß. Wietlisbach⁵⁾ giebt für den Übergangswiderstand der Schienen gegen das umgebende Erdreich 15 bis 20 Ohm für 1 km an. Schienen auf trockenem Sandboden haben größeren Über-

¹⁾ E. T. Z. 1902, S. 212.

²⁾ Bell-Rasch, Stromverteilung für elektr. Bahnen. 1898, S. 26.

³⁾ E. T. Z. 1899, S. 167.

⁴⁾ Ibid. 1902, S. 214.

⁵⁾ Schiemann, Bau und Betrieb elektrischer Bahnen 1, 132 (1900).

gangswiderstand als solche auf feuchtem Boden. Außerdem kommt die Isolierung der Schienen in Betracht. Überlandbahnen mit eigenem Bahnkörper können einen so hohen Übergangswiderstand besitzen, daß eine nennenswerte Stromentweichung aus den Schienen nicht vorhanden ist.

Für die Stromverteilung in der Erde kommt der Ausbreitungswiderstand (w_u) in Betracht, der durch den Widerstand des Bodens bestimmt wird. Reiner ausgewaschener Sand, ebenso Felsen haben nur sehr geringe Leitfähigkeit. Für einen Würfel von 1 cbm wurden in wenig angefeuchtetem Zustande Werte von 100 bis 1000 Ohm gefunden, je nach dem Salzgehalt. Fleming¹⁾ giebt rund 15 Ohm für lehmigen Boden an. Durch das zum Schmelzen von Schnee längs der Geleise gestreute Salz, das in den Boden eindringt, wird nach v. Gaisberg²⁾ der Erdwiderstand stark vermindert und die Elektrolyse begünstigt. Wasser, selbst in dem schmutzigen Zustande, wie es im Straßengrunde vorkommt, besitzt nach Rasch einen Widerstand von 10 Ohm und mehr für 1 cbm. Für gewöhnliches Leitungswasser wurden Werte von 3 bis 80 Ohm gefunden. Hiernach erklärt es sich, daß das Wasser von Flüssen nur wenig zur Ableitung der vagabundierenden Ströme beiträgt. Nur wenn großer Querschnitt des Bodens für die Stromfortleitung in Betracht kommt, fällt der Widerstand nicht so sehr ins Gewicht. Mörtel und Cementmasse haben nach Lindeck³⁾ im trockenen Zustande einen Widerstand von 0,7 Ohm pro 1 cbm. Die Leitfähigkeit gegenüber dem Erdboden ist verhältnismäßig groß. Es wird demnach die Entwicklung von Erdströmen etwas begünstigt, wenn die Schienen in Beton eingebettet sind. Asphaltbeton, das für Wasser praktisch undurchlässig ist, ist nach Schieman n bedeutend besser isolierend, so daß auch bei einer dünnen Zwischenschicht von Asphaltbeton der Übergangswiderstand bedeutend erhöht wird.

Der Gesamtwiderstand einer Rohrleitung setzt sich aus dem Rohrwiderstande und dem Übergangswiderstande an den Stofstellen zusammen. Ulbricht nimmt für ein Rohr von 20 cm Durchmesser für 1 km einschließlic der Stofverbindungen einen Widerstand von 0,02 Ohm an. Die Stofverbindungen können

¹⁾ Electrician 41, 689 (1898).

²⁾ E. T. Z. 1903, S. 492.

³⁾ Ibid. 1896, S. 180.

bei längerem Liegen der Rohre sehr hohe Werte annehmen. Meng¹⁾ untersuchte die Widerstände in den Verbindungsmuffen von Rohren, die 20 bis 40 Jahre in der Erde gelegen hatten. Er fand bei Gasrohren Muffenwiderstände zwischen 0,08 und 1200 Ohm, im Mittel rund 230 Ohm, bei Wasserrohren Widerstände zwischen 0,02 und 115 Ohm, im Mittel rund 14 Ohm. Es zeigte sich bei den Messungen, daß bei den Wasserrohren die Füllung mit Wasser nur geringen Einfluß auf die Leitungsfähigkeit hat. Das Wasser innen nimmt daher wenig an der Fortleitung der vagabundierenden Ströme teil. Es sind daher Stromaustritte aus den Rohren innen in das im Rohre befindliche Wasser und dadurch bewirkte elektrolytische Zersetzungen innen wenig zu befürchten. Es ist das noch insofern von Wichtigkeit, weil im entgegengesetzten Falle die Rohre auch in den Bezirken, in denen Strom aus der Erde in das Rohr eintritt, innen durch Korrosion gefährdet würden. Nach Messungen von Larsen und Faber²⁾ beträgt die Leitfähigkeit englischer gulseiserner Rohre nahezu 1. Ein Rohr von 9 Zoll innerem Durchmesser und $\frac{33}{64}$ Zoll Wandstärke, also von rund 26 cm äußerem Durchmesser, hat hiernach pro Meter einen Widerstand von $96 \cdot 10^{-6}$ Ohm, also für 1 km ohne Berücksichtigung der Stofsverbindungen rund 0,1 Ohm. Mit den Messungen von Faber stimmen auch die von Lubberger³⁾ überein, der für 1 m Rohr von 100 mm lichter Weite 0,00028 Ohm angiebt. Für die Muffenverbindungen fand Lubberger Werte von 0,00072 bis 0,076 Ohm. Auch er fand⁴⁾, daß durch das Wasser im Innern des Rohres der Widerstand nicht wesentlich geändert wird.

Der Übergangswiderstand von der Erde zur Rohrleitung hängt von der Größe und Beschaffenheit der Rohre ab. Ulbricht nimmt 0,2 Ohm pro 1 km an. Durch isolierenden Anstrich wird, falls dieser sorgfältig aufgebracht wird, der Übergangswiderstand bedeutend vermehrt. Durch einen Cementüberzug wird, da Cement, wie oben erwähnt, leitend ist, der Übergangswiderstand nicht vergrößert, das Rohr also nicht geschützt. Bei lange Zeit im Boden liegenden Rohren bildet die oberflächliche Rost-

¹⁾ E. T. Z. 1901, S. 354.

²⁾ Ibid. 1901, S. 1038.

³⁾ Journ. für Gas- und Wasserversorgung 1901, S. 508.

⁴⁾ Ibid. 1901, S. 723.

schicht durch Vermehrung des Übergangswiderstandes einen gewissen Selbstschutz, der nach v. Gaisberg besonders bei gußeisernen Rohren in Betracht kommt.

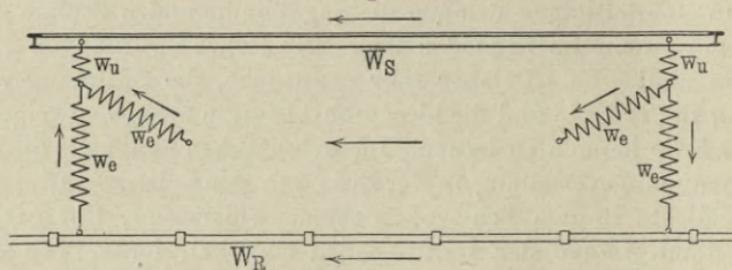
Spannungsverteilung in der Erde.

In Rohrleitungen dringen die vagabundierenden Ströme nur dann ein, wenn im Erdboden längs der Rohre Spannungen vorhanden sind. Es ist daher sehr erwünscht, die Spannungsverteilung in der Erde und die hierdurch bedingte Stromverzweigung in der Erde kennen zu lernen. Im wesentlichen hängt die Strom- und Spannungsverteilung in der Erde von den Geleisverhältnissen (Stromdichte in den Schienen, Schienenwiderstand, Übergangswiderstand, Länge der freitragenden Strecke), ferner von den Widerstandsverhältnissen in der Erde (Ausbreitungswiderstand) ab. Lage und Beschaffenheit des Grundwassers und vor allem Lage, Ausdehnung und Leitfähigkeit der Rohrleitungen sind hierbei von grossem Einfluss. Für vielfach sich kreuzende Geleisnetze und weit verzweigte Rohrsysteme ist es in grossen Städten schwierig, sich ohne eingehende Messungen ein übersichtliches Bild über den Verlauf der aus den Schienen austretenden Erdströme zu machen. Diese Übersicht wird besonders dann erschwert, wenn in Städten Geleisnetze vorhanden sind, die unabhängig voneinander von verschiedenen Kraftwerken aus nach verschiedenen Systemen gespeist werden, wobei meist die Schienen des einen Netzes streckenweise Ströme aus dem anderen Netze führen werden.

Würden das Grundwasser oder die Rohrleitungen nahezu widerstandslos sein, so würden längs der Grundwasserschicht oder der Rohrleitungen keine nennenswerten Spannungen auftreten. Tatsächlich können jedoch, wie schon näher ausgeführt, in den erwähnten Leitungen grosse Widerstände auftreten. Es sind daher für die in die Rohre eindringenden Ströme (Fig. 8 a. f. S.) der Übergangswiderstand w_u von den Schienen nach dem nahen umgebenden Erdboden, der Ausbreitungswiderstand w_e und der Rohrleiterwiderstand W_R in Betracht zu ziehen. Bei den von Ulbricht diesbezüglich vorgenommenen Rechnungen ist auf den Ausbreitungswiderstand w_e in der Erde besonders Rücksicht genommen. Sind die in die Rohrleitungen eingedrungenen Ströme

nicht groß, der Rohrwiderstand klein, so kann man praktisch mit einem mittleren Werte rechnen; den man als das Rohrpotential oder Erdpotential bezeichnen kann. Dieses mittlere Rohrpotential entspricht im allgemeinen dem des neutralen Punktes des Geleises. Man kann daher auch statt der Spannung eines Punktes

Fig. 8.



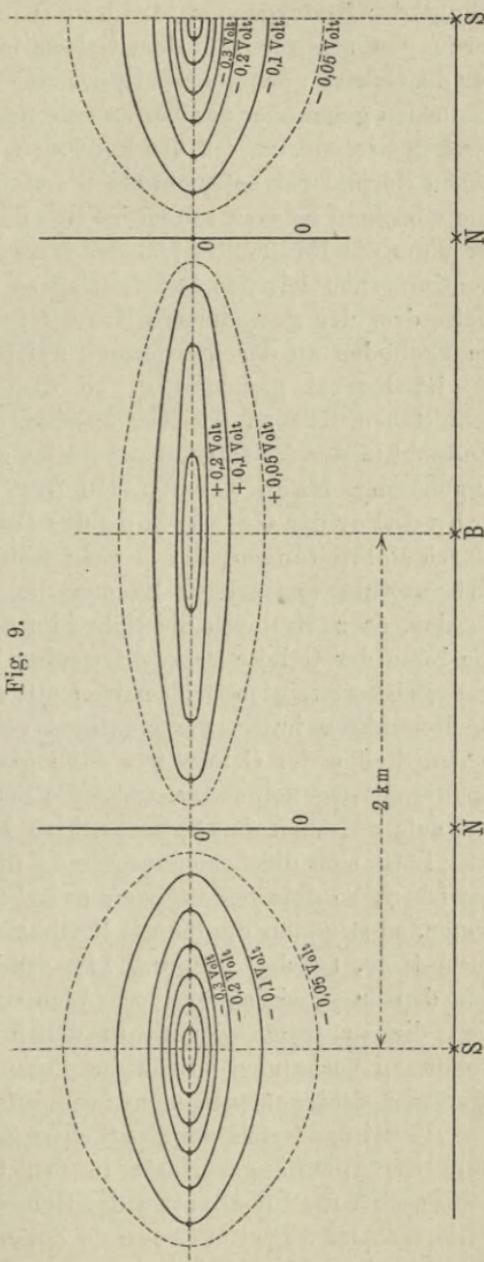
gegen Rohr auch die Spannung dieses Punktes gegen den neutralen Punkt des Geleises in Betracht ziehen. Es wird in den folgenden Rechnungen daher die Spannung gegen den neutralen Punkt und die gegen das Rohr oder die Erde gleich gesetzt. Der Einfachheit wegen wird diese Spannung als die gegen Normalerde bezeichnet.

Ulbricht¹⁾ hat eingehende theoretische Untersuchungen und praktische Messungen über den Verlauf der Erdströme angestellt. Hiernach läßt sich die Spannungsverteilung an den einzelnen Stellen in der Erde senkrecht zu den Schienen bestimmen. Die Kenntnis der Spannungsverteilung ist besonders in der Nähe des Speisepunktes erwünscht, wo die Gefährdung der Rohre am größten ist. Für eine zweigleisige Bahn von 4 km mit Schienenspeisung an den Endpunkten (also 2 km freitragender Strecke) und Geleisflächenbreite von 4 m bei einer Belastung von 50 Amp. für 1 km, also 100 Amp. an jedem Speisepunkte und einem Schienenwiderstande von 0,01 Ohm pro 1 km, hat Ulbricht die Spannungswerte berechnet. Die Spannung gegen Normalerde, also gegen den neutralen Punkt, beträgt am Speisepunkte nach Gleichung 13) ($J = 100$, $W = 0,01$, $L = 2$) 0,67 Volt. In den verschiedenen Abständen δ senkrecht zu dem Geleise ergeben sich folgende Werte:

¹⁾ E. T. Z. 1902, S. 212 u. 720.

d	Spannung gegen Normalerde
0 m	0,67 Volt
20 "	0,38 "
200 "	0,13 "
2000 "	0,004 5 "

Die Spannung gegen Normalerde nimmt daher mit dem Abstände von den Schienen rasch ab. Konstruiert man hiernach die Äquipotentialkurven, indem man die Punkte, die gleiche Spannung gegen Normalerde haben, verbindet, so schmiegen sich die Kurven eng an die Geleise an. In Fig. 9 sind diese Kurven für das erwähnte Beispiel dargestellt. Die Verschiebungen der Spannungswerte durch die Rohrnetze sind hierbei nicht berücksichtigt. Zwischen Punkten zweier benachbarter Kurven herrscht die Spannung von 0,1 Volt. Punktirt ist noch die Kurve eingezeichnet für Punkte, die gegen Normalerde eine Spannung von 0,05 Volt haben. S sind die Speisepunkte, N die



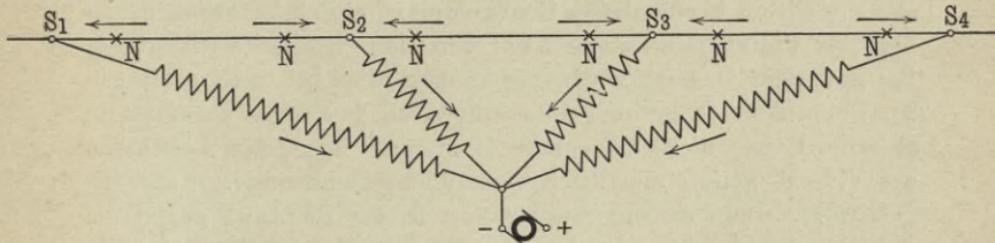
neutralen Punkte, B der Endpunkt der freitragenden Strecke. Die Länge der freitragenden Strecke SB beträgt 2 km. Für die Entfernungen senkrecht zu dem Geleise ist der gleiche Maßstab wie für die Geleise genommen. In der Nähe des Speisepunktes ist der Erdboden gegenüber der Normalerde negativ, in der Mitte zwischen zwei Speisepunkten ist der Erdboden positiv. Die Spannungen gegen Normalerde betragen bei $S - 0,67$ Volt, bei $B + 0,33$ Volt. Die einzelnen Kurven schließens sich um die Schienenspeisepunkte bzw. um die Endpunkte (B) der freitragenden Strecke. Ist eine kontinuierlich leitende Rohrleitung so verlegt, daß sie beispielsweise drei der gezeichneten Kurven schneidet, so ist die höchste im Erdboden an der Rohrleitung auftretende Spannung 0,3 Volt. Es ist hierbei gleichgültig, ob die von der Rohrleitung geschnittenen Kurven der Kurvenschar am Speisepunkte oder am Endpunkte der freitragenden Strecke oder beiden Kurvenscharen angehören. Nach der Anzahl der geschnittenen Kurven kann daher die Gefährdung des Rohres bestimmt werden. Durch Rohrleitungen, die in elektrisch gut leitender Verbindung sich weithin erstrecken, können die Kurven stark verschoben werden, da z. B. durch die Rohre Potentiale entfernter Stellen in die Nähe der Geleise gebracht werden können.

Bei verzweigten Geleisnetzen mit einer größeren Anzahl von Speisepunkten haben die einzelnen rechnerisch ermittelten neutralen Stellen der Geleise nur dann gleiches Potential, also keine Spannung gegeneinander, wenn die Schienenspeisung so geregelt ist, daß zwischen den Speisepunkten keine Spannung vorhanden ist. Läßt sich die Schienenspeisung nicht genügend vollkommen bewirken, so daß Spannungen zwischen den Speisepunkten auftreten, so stimmen die für die Bestimmung des neutralen Punktes theoretisch, (nach Gleichung 11), ermittelten Werte nicht mehr mit den in Wirklichkeit vorhandenen überein. Es verschieben sich die neutralen Zonen, in denen gegen Normalerde keine Spannung vorhanden ist, da das Potential der Normalerde durch sämtliche Schienenspeisungen beeinflusst wird.

Es sei das Geleis an vier Stellen $S_1 S_2 S_3 S_4$ (Fig. 10) gespeist. Sind die Spannungsverluste in den Speiseleitungen gleich, so ändern sich die Spannungen des Geleises gegen Erde parabolisch (entsprechend Fig. 6). Neutrale Zonen treten bei N auf. Wird die Schienenspeisung bei S_3 vermindert, bei S_2 und S_4 ent-

sprechend vermehrt, so verschieben sich die neutralen Punkte, ihre Entfernung von den Speisepunkten vergrößert sich, die Gefahrzone dehnt sich somit weiter aus. Die Spannungen gegen Normalerde werden an den Speisepunkten S_2 und S_4 vergrößert, am Speisepunkte S_3 erniedrigt. Es gilt dies allgemein. Durch verstärkte Schienenspeisung wird allgemein an dem Speisepunkte und dessen Umgebung die Spannung gegen Normalerde erhöht, durch verminderte Speisung erniedrigt. Man hat es so in der Hand, in gewissen Grenzen

Fig. 10.



die Spannungen gegen Normalerde und somit die Gefahrbezirke zu verändern und demnach auch unter Umständen an bestimmten Stellen die Gefährdung von Rohren zu vermindern. Zu berücksichtigen ist hierbei aber, daß eine Spannungsverminderung an der einen Stelle eine entsprechende Spannungserhöhung an anderer Stelle zur Folge hat.

In der Praxis dürfte es meist zu umständlich sein, ein genaueres Bild über die Spannungen in der Erde vor dem Bau der Bahn zu entwerfen. Um überschlägig über die Spannungsverteilung in der Erde schon vor Ausführung der Bahnanlage sich ein Urteil bilden zu können, genügt es für die am meisten gefährdeten Punkte, die Spannungen gegen Normalerde zu bestimmen. Nach Ulbricht¹⁾ kann man, gleichmäßigen Übergangswiderstand von den Schienen zur Erde vorausgesetzt, die Spannungen an den einzelnen Punkten in verschiedenem senkrechtem Abstände vom Speisepunkte in roher Annäherungsformel für nicht zu große Abstände berechnen. Es ist

$$e_{\delta} = \frac{e_0}{1 + b\delta} \dots \dots \dots 17)$$

¹⁾ E. T. Z. 1903, S. 690.

e_j ist hierbei die Spannung im Erdboden gegen Normalerde an einem Punkt im Abstände δ (in Metern) vom Speisepunkte, e_0 ist diese Spannung am Speisepunkte (nach Gleichung 13), b ist eine Konstante, die angenähert 0,1 gesetzt werden kann. Setzt man für e_0 die aus Gleichung 13) ermittelten Werte ein, so wird

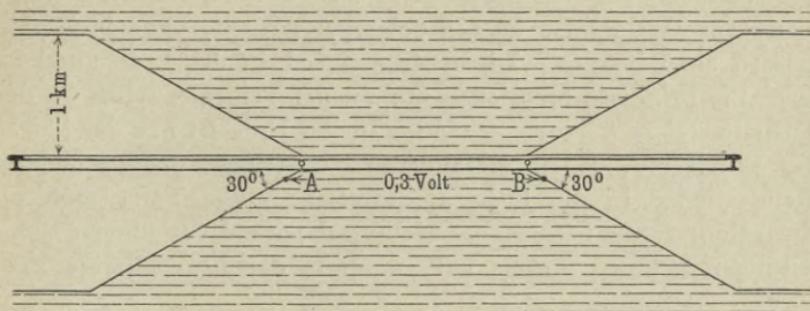
$$e_j = \frac{JWL}{3(1 + 0,1\delta)} \dots \dots \dots 17a)$$

Da die Spannung im Erdboden stark mit der Entfernung vom Geleise abnimmt, so gelten nach den Leitsätzen des V. D. E. alle metallisch verbundenen Rohrkomplexe als ungefährdet, deren nächster Punkt mindestens 1 km von den Geleisen entfernt ist. Bei günstiger Gesamtanordnung können aber bei noch größeren Annäherungen so geringe Spannungen an den Rohren auftreten, daß die Rohre nicht als gefährdet gelten. Nach den Leitsätzen des V. D. E. gelten metallisch verbundene Rohrkomplexe als ungefährdet, wenn sie innerhalb zweier in der Richtung gegen die Bahn zu konvergierenden Geraden liegen, die mit der Bahnlinie Winkel von 30° einschließen und deren Schnittpunkte mit den Geleisen voneinander nicht so weit entfernt sind, daß innerhalb dieser Strecke ein Spannungsunterschied in der Erde dicht neben dem Geleise von 0,3 Volt, bezogen auf den Jahresdurchschnitt der Belastung, überschritten wird.

Die 0,3 Volt beziehen sich auf das Jahresmittel einschließlich der Betriebspausen. Bei 16 stündigem Tagesbetrieb erhöht sich die zulässige gemessene Spannung auf 0,45 Volt. Es würden hiernach als ungefährdet Rohrkomplexe gelten, die innerhalb einer in Fig. 11 schraffiert gezeichneten Fläche liegen. Vorausgesetzt ist hierbei, daß auch in Richtung senkrecht zum Geleise in der Erde keine höheren Spannungen auftreten als 0,3 bzw. 0,45 Volt. Die obigen Spannungen werden nicht zwischen Geleispunkten, sondern zwischen Punkten dicht neben dem Geleise an den Punkten AB gemessen. Spannungen an den entsprechenden Geleispunkten sind höher, da durch den Übergangswiderstand Spannungsverluste entstehen. Es ist hierbei vorausgesetzt, daß nicht bloß zwischen den Endpunkten A und B die Grenzspannung nicht überschritten wird, sondern daß auch beliebig zwischen zwei Punkten innerhalb AB keine höhere Spannung auftritt. Befindet sich z. B. das Rohr in der Nähe des Schienen-

speisepunktes S_2 (Fig. 10) zwischen den Punkten NN , so ist die Spannung zwischen den Endpunkten Null, während die Spannung zwischen N und S_2 den Grenzwert überschreiten kann, wobei das Rohr als gefährdet gelten würde.

Fig. 11.



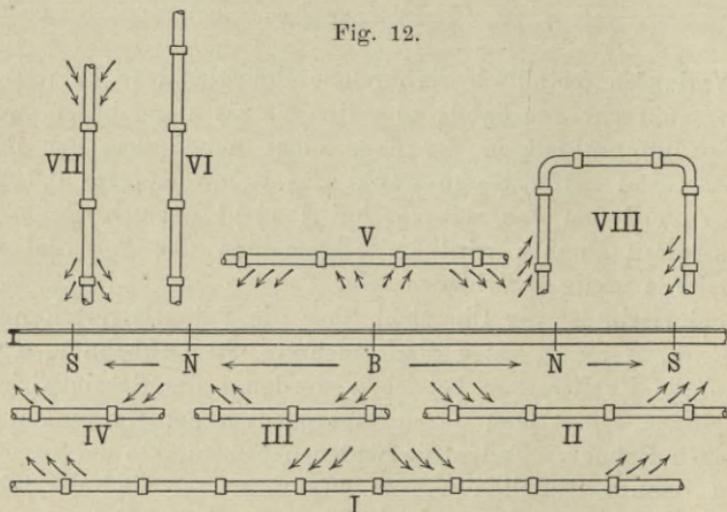
Verlaufen metallisch verbundene Rohrkomplexe im wesentlichen senkrecht zur Bahn, so gelten sie als ungefährdet, wenn der Spannungsabfall in der Erde dicht neben dem der Bahn nächsten und entferntesten Punkt des Rohrkomplexes 0,3 Volt (bezogen auf den Jahresdurchschnitt) nicht überschreitet. Am entferntesten Punkte wird im allgemeinen das Potential von Normalerde wenig verschieden sein.

Schwierig ist die Übersicht über die Potentialverteilung in der Erde, wenn in einer Stadt mehrere Straßenbahnnetze von getrennten Kraftwerken betrieben werden. Die Gesamtwirkung der Bahnen erhält man durch Superposition der Wirkungen der einzelnen Bahnen. Fallen die Schienenspeisepunkte der verschiedenen Bahnen räumlich nahezu zusammen, so sind die schädlichen Erdströme nahezu gleich der Summe der Erdströme der einzelnen Bahnen. Sind die Speisepunkte zweier Bahnnetze so angeordnet, daß die Speisepunkte des einen Netzes etwa in der Mitte zwischen den Speisepunkten des anderen Netzes liegen, so entsteht eine günstigere Potentialverteilung, indem durch die vermehrte Saugwirkung die Gefahrbezirke verkleinert werden. Sind zwei ausgedehntere Netze vorhanden, von denen das erstere eine vollkommene Einrichtung mit Schienenspeisung an verschiedenen Punkten hat, während das zweite nur an einer Stelle gespeist ist, so können größere Spannungen in den Schienen durch

zweckentsprechende Schienenspeisungen im ersteren Netze vermieden werden.

Korrosionsströme.

Von den aus den Schienen in die Erde abirrenden Strömen fließt ein Teil wieder zu den Schienen zurück, ohne in Metallmassen einzudringen. Diese Ströme sind in der Erde unschädlich. Sie bringen Korrosionen nur an den Schienen selbst an den Austrittsstellen hervor. Schädlich in der Erde ist nur der Betrag der Erdströme, der in Metallmassen eindringt, um an anderer Stelle wieder in die Erde auszutreten. Diese kann man als Korrosionsströme bezeichnen. Metallisch leitend verbundene Rohrleitungen nehmen Ströme auf, wenn in der benachbarten Erde



Spannungen vorhanden sind, d. h. wenn sie Kurven gleichen Potentials (Fig. 9) schneiden. Es gilt dies allgemein unabhängig davon, ob die Rohrleitungen sich im Gefahrbezirke oder im Schutzbezirke befinden. Durch die Polarität der Spannungen im Erdboden in der Nähe der Rohre wird die Richtung der Ströme bestimmt. In Fig. 12 ist beispielsweise für eine Anzahl von Rohrstücken angedeutet, wie der Verlauf der Rohrströme bei verschiedener Lage der Rohre sein würde. Die Rohrleitung I verlaufe kontinuierlich leitend längs des ganzen Geleises zwischen

den beiden Speisepunkten *SS*. In den Bezirken zwischen *NN* treten die Erdströme in die Rohre ein, um in der Nähe der Speisepunkte *SS* wieder auszutreten, entsprechend den vorher erwähnten Darstellungen. Rohrleitung II verläuft längs der freitragenden Strecke rechts. Die Ströme treten in der Schutzzone in die Rohre ein, in der Gefahrzone aus. Die Rohrleitungen III und IV erstrecken sich längs der Geleise nur innerhalb der Schutz- bzw. der Gefahrzone. In beide Rohre treten die Ströme an dem vom Speisepunkte entfernteren Ende ein, um an dem dem Speisepunkte näheren Ende wieder auszutreten. Es sind die beiden Rohrleitungen, obwohl sie in verschiedenen Zonen liegen, an dem einen Ende geschützt, an dem anderen Ende gefährdet. In die Rohrleitung V, die sich nur zwischen den neutralen Stellen *NN* befindet, treten die Ströme in der Mitte ein, um an den beiden Enden auszutreten. Rohrleitung VI verläuft senkrecht zum Geleise. In das Rohr treten keine Ströme ein. Das parallel zu Rohr VI verlaufende Rohr VII nimmt in der größeren Entfernung Strom auf, um ihn im Gefahrbezirke abzugeben. Rohrleitung VIII ist am neutralen Punkte senkrecht zum Geleise gerichtet und reicht bis in den Gefahrbezirk. Die Ströme treten an der neutralen Stelle in das Rohr ein und treten in der Gefahrzone aus. Die Bezeichnungen „Gefahrbezirk“ oder „Schutzbezirk“ gelten daher streng nur für ausgedehntere metallisch verbundene Rohrkomplexe, die längs der ganzen freitragenden Strecke verlaufen.

In größerer Entfernung von dem Geleise nimmt der Erdboden das mittlere Schienenpotential, das des neutralen Punktes *N* oder der Normalerde an. Rohrleitungen, die sich von dem Geleise weit entfernen, verhalten sich ähnlich, wie wenn sie von der neutralen Zone ausgingen. Nähern sich diese Rohrleitungen dem Geleise in der Gefahrzone (Rohrleitung VIII, Fig. 12), so nehmen sie in der Entfernung Strom auf, um ihn in der Nähe der Geleise abzugeben, nähern sie sich in der Schutzzone dem Geleise, so nehmen sie hier Strom auf, um ihn an entfernter Stelle abzugeben. Senden große, weit verzweigte Rohrkomplexe Ausläufer nach der Gefahrzone, so können die Komplexe viel Strom ansaugen, um ihn konzentriert im Gefahrbezirke abzugeben, wodurch der Ausläufer stark gefährdet werden kann. Es gelten diese Beziehungen nur für metallisch leitend verbundene Rohre.

Die Größe der in die Rohrleitungen eindringenden Ströme läßt sich rechnerisch schwer feststellen. Nimmt man, was allerdings nicht streng zutrifft, an, daß ebenso wie in den Schienen die Spannung sich parabolisch ändert (entsprechend Gleichung 9 a), so auch im Erdboden parallel zu den Schienen die Spannungsänderung parabolisch erfolgt, so kann man den Spannungsverlauf in der Erde durch die Gleichung darstellen:

$$e_x = c \frac{J}{2} \frac{W}{L} x^2$$

(x parallel zum Geleise vom Endpunkte der freitragenden Strecke an gerechnet). c ist hierbei kleiner als 1. Die Konstante c nimmt hierbei mit dem Abstände vom Geleise nach den Ulbricht'schen Formeln ab. Unter Vernachlässigung des Leitungswiderstandes der Rohre in der Erde und unter der Annahme, daß die Rohre das Potential des neutralen Punktes annehmen, erhält man als Spannung des Erdbodens gegen das Rohr (entsprechend Gleichung 12):

$$= c \frac{J W}{6 L} (L^2 - 3 x^2),$$

und als gesamten auf der Strecke x in die Rohre ein- oder aus tretenden Strom, wenn w_R den Übergangswiderstand vom Rohre zur Erde bedeutet, entsprechend Gleichung 15):

$$i_R = c \frac{J W x}{6 w_R L} (L^2 - x^2).$$

Der maximale in die Rohre eindringende Strom (für $x = \frac{L}{\sqrt{3}}$) ist:

$$i_R = \frac{c J W L^2 \sqrt{3}}{27 w_R} \dots \dots \dots 18)$$

(c hängt von dem Übergangswiderstande von den Schienen zur Erde ab.)

Da c mit dem Abstände von den Schienen abnimmt, so nimmt auch die Gefährdung der Rohre in gleichem Verhältnis ab. Für das oben erwähnte Beispiel einer zweigeleisigen Bahn von 2 km freitragender Strecke ergibt sich bei 0,2 Ohm Übergangswiderstand pro 1 km nach Gleichung 16) ein Erdstrom

$$i_s = 1,28 \text{ Amp.}$$

Ist der Übergangswiderstand vom Rohre zur Erde ebenfalls 0,2 Ohm pro 1 km, so erhält man für Rohrleitungen in 20 m Entfernung $i_R = 0,73$ Amp. In Wirklichkeit sind die Rohrströme kleiner, da bei der Berechnung der Widerstand des Rohres und vor allem die durch die Rohrleitungen veränderte Potentialverteilung nicht berücksichtigt ist. Letztere Beeinflussung ist um so größer, je geringer der Übergangswiderstand vom Rohr zur Erde ist. Es ist daher für kleine Werte von w_R Gleichung 19) nicht mehr gültig.

Für den Rohrabstand von 2 m berechnet Ulbricht¹⁾, daß vom gesamten aus den Schienen ausgetretenen Strome $\frac{110}{147}$, also nahezu drei Viertel in das Rohr eindringen. Larsen und Faber²⁾ fanden in Kopenhagen, daß von dem gesamten Erdstrome etwa die Hälfte in die Rohrleitungen eingedrungen war.

Genauere Rechnungen³⁾ unter Berücksichtigung des Rohr-

¹⁾ E. T. Z. 1902, S. 212.

²⁾ Ibid. 1901, S. 1038.

³⁾ Für den in die Rohre in der Entfernung x eindringenden Strom $d i_R$ gilt, wenn V_x das Potential im Rohre v_x das des benachbarten Erdbodens, W_s der Schienenwiderstand, W_R der Rohrwiderstand für die Längeneinheit ist,

$$d i_R = \frac{(v_x - V_x) dx}{w_R}.$$

Ist v_N das Potential der Normalerde, so ist

$$d i_R = \frac{[(v_x - v_N) - (V_x - v_N)] dx}{w_R}$$

$$V_x - v_N = \frac{c J W_s}{6 L} (L^2 - 3 x^2)$$

$$d v_x = - \frac{c J W_s x dx}{L},$$

da $d V_x = - i_R W_R dx$ ist, so wird

$$\frac{d^2 i_R}{d x^2} = \frac{d v_x - d V_x}{d x w_R} = - \frac{c J W_s x}{w_R L} + i_R \frac{W_R}{w_R}.$$

Die Auflösung der Differentialgleichung ergibt:

$$\frac{c J W_s x}{w_R L} - i_R \frac{W_R}{w_R} = b_1 e^{x \sqrt{\frac{W_R}{w_R}}} + b_2 e^{-x \sqrt{\frac{W_R}{w_R}}}.$$

widerstandes führen zu ähnlicher Gleichung wie 18). Der Rohrstrom ist hiernach

$$i_R = \frac{c J W L^2 \sqrt{3}}{27 w_R \left(1 + \frac{L^2}{6} \frac{W_R}{w_R} \right)} \dots \dots \dots 19)$$

Setzt man den Rohrwiderstand $W_R = 0$, so erhält man Gleichung 18).

Die höchste in dem Erdboden am Rohre auftretende Spannung ist

$$E = \frac{c J L W}{2}.$$

Setzt man diesen Wert in Gleichung 19) ein, so erhält man

$$i_R = \frac{2 L E \sqrt{3}}{27 w_R \left(1 + \frac{L^2}{6} \frac{W_R}{w_R} \right)} \dots \dots \dots 19 a)$$

In dem oben erwähnten Beispiele, bei dem nach Gleichung 18) ein Rohrstrom = 0,73 Amp. ermittelt wurde, erhält man nach Gleichung 19) bei einem Rohrwiderstande von 0,2 Ohm für 1 km

Die Konstanten b_1 und b_2 ergeben sich aus den Grenzwerten

für $x = 0$ wird $i_R = 0$,

für $x = L$ wird $i_R = 0$.

Man erhält so:

$$i_R = \frac{c J W_s x}{L W_R} - \frac{c J W_s}{W_R} \cdot \frac{e^{x \sqrt{\frac{W_R}{w_R}}} - e^{-x \sqrt{\frac{W_R}{w_R}}}}{e^{L \sqrt{\frac{W_R}{w_R}}} - e^{-L \sqrt{\frac{W_R}{w_R}}}}.$$

Die Exponentialgrößen in Reihen entwickelt ergibt sich in Annäherung

$$i_R = \frac{c J W_s x (L^2 - x^2)}{L (6 w_R + L^2 W_R)},$$

und für $x = \frac{L}{\sqrt{3}}$ als Maximalwert des Rohrstromes

$$i_{\max} = \frac{c J W L^2 \sqrt{3}}{27 w_R \left(1 + \frac{L^2}{6} \frac{W_R}{w_R} \right)}.$$

$i_R = 0,44$ Amp. Unter Berücksichtigung des Rohrwiderstandes ergeben sich demnach bedeutend kleinere Werte für den Rohrstrom als unter der Annahme von widerstandsloser Rohrleitung.

Obige Rechnungen gelten für den Fall metallisch leitender Verbindung des Rohrsystems. Mit zunehmendem Rohrwiderstand nehmen die Rohrströme ab. Ist durch isolierende Zwischenstücke dafür gesorgt, daß die metallische Leitung an einzelnen Stellen der Rohrleitung unterbrochen wird, so können nur geringe Rohrströme auftreten, wenn die Strecken metallisch leitender Rohrverbindung nur kurz sind.

Korrosionsströme, die nicht von den Bahnströmen herrühren.

Bei Bahnen mit Stromrückleitung durch die Schienen wird man nach obigen Ausführungen Erdströme und demnach auch Rohrströme nie vollständig beseitigen können. Es ist aber des öfteren vorgekommen, daß irrtümlicherweise den Bahnströmen Korrosionen zur Last gelegt wurden, die offenbar andere Ursachen hatten. Die natürlichen Erdströme, die Telegraphenströme und dergleichen kommen hierbei kaum in Betracht. Eine größere Rolle spielen die Zersetzungen, die galvanische Ströme bei Verbindung verschiedener Metalle in der Erde verursachen. Starke Erdströme können bei Isolationsfehlern von Kabeln auftreten. Es seien an der negativen Leitung eines ausgedehnten Kabelnetzes verschiedene Isolationsfehler vorhanden. Dies kann leicht vorkommen, da sich bekanntlich eine gute Isolation der negativen Leitung schwerer auf die Dauer aufrecht erhalten läßt, als die der positiven Leitung. Erhält nun die positive Leitung an einer Stelle etwa durch Pickenhiebe bei Erdarbeiten einen Erdschluss, so gehen von der Fehlerstelle des positiven Kabels nach allen Fehlerstellen der negativen Leitung Erdströme aus. Die durch die Fehlerstelle mit der positiven Leitung verbundene Armatur nimmt das Potential der positiven Leitung an und strahlt auf ihrer ganzen Länge Strom aus. Die entstehenden Erdströme und deren Wirkungen sind um so stärker, je länger die Armatur ist und je höher die Spannung ist. Durch diese Erdströme wird in erster Linie die Armatur in ihrer ganzen Länge zerstört. Die Zerstörungen können sich nur dann weithin erstrecken, wenn an

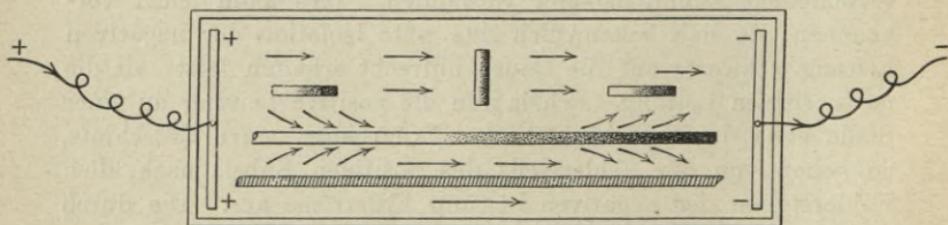
den Verbindungsmuffen die Armaturen voneinander nicht isoliert sind. Wird der Fehler nicht rechtzeitig bemerkt, so kann in kurzer Zeit das Kabel zerstört sein. Auch die Armaturen der Kabel, die neben dem fehlerhaften verlegt sind, können durch Berührung das gefährliche Potential annehmen und ebenfalls zerstört werden.

Derartige Korrosionen erkennt man als nicht von Bahnströmen herrührend besonders daran, daß sie nur lokal auftreten und daß große Potentialdifferenzen in der Erde vorhanden sind, die sich durch vagabundierende Ströme elektrischer Bahnen nicht erklären lassen. In erster Linie werden durch derartige Fehler der positiven Kabel diese selbst gefährdet. Vermieden werden derartige Korrosionen durch Aufrechterhalten einer guten Isolation sowie durch sofortige Beseitigung von Erdschlüssen, besonders der positiven Leiter.

Korrosionen.

Zersetzungen des Metalls in der Erde finden an den Stellen statt, an denen der Strom vom Metall in einen zersetzend wirkenden Leiter (Elektrolyten) übergeht. Diesbezügliche Versuche wurden in verschiedenen, 1 m langen Holzkisten gemacht, die mit Erde gefüllt waren, der zum Teil absichtlich schädliche Salze zugefügt waren. Durch Kupferplatten (Fig. 13) wurden in die

Fig. 13.



Erde Ströme geleitet, wobei die Spannung zwischen den Platten konstant 2 Volt gehalten wurde. Der Erdboden wurde dauernd feucht gehalten, was durch besondere Vorrichtungen kontrolliert wurde. In die Erde wurden ein Eisenrohr, ein normal armiertes Kabelstück und verschiedene Armaturteile eingebettet. Zur Kontrolle wurden Parallelversuche mit Kisten ohne Strom gemacht.

Nachdem die Kisten einige Monate gestanden hatten, zeigte es sich, daß die Eisenrohre in den unter Spannung gesetzten Kisten auf der einen, der negativen Kupferplatte zugewandten Seite sehr stark, etwa von der Mitte beginnend, angerostet waren, während die Rohre auf der anderen Seite keine Spur von Rost zeigten. Die Rohre in den nicht unter Spannung stehenden Kisten zeigten einen schwachen, gleichmäßig über das ganze Rohr verlaufenden Rostansatz. Es hatte demnach der aus dem Rohre austretende Strom stark korrodierend gewirkt (Gefahrbezirk), während an den Stromeintrittsstellen sich eine Schutzschicht (Wasserstoffschicht) gebildet hatte, die Korrosionen verhütete (Schutzbezirk). Die durch Juteumspinnung geschützte Kabelarmatur zeigte keine Spur von Korrosion. Die in die Erde mit eingebetteten Armaturteile zeigten sich sämtlich korrodiert, und zwar unabhängig, ob sie sich im Gefahr- oder Schutzbezirke befanden. Stets war die der negativen Kupferplatte zugewandte Seite korrodiert. Selbstverständlich waren auch die positiven Kupferplatten stark angefressen.

Die Zersetzung von Eisen in einem Elektrolyten beträgt an der Stromaustrittsstelle für 1 Amperestunde rund 1 g.

Diese Werte gelten unter der Voraussetzung, daß der Erdboden sich vollkommen wie ein Elektrolyt verhält. Wenn aber die salzhaltige Feuchtigkeit im Erdboden nicht allein die Leitungsfähigkeit bedingt, sondern der Erde auch eine gewisse metallische Leitfähigkeit zugeschrieben werden kann, so wirkt der Erdboden nicht rein elektrolytisch¹⁾, es wirkt vielmehr nur ein Teil des aus den Rohren austretenden Stromes zersetzend. Diese von Claude²⁾ aufgestellte Theorie wurde allerdings von Larsen³⁾ nicht bestätigt gefunden. Nach den Laboratoriumsversuchen von Larsen wirkt der aus den Metallmassen in den Erdboden austretende Strom mit voller Stärke elektrolysierend. Es wurde gefunden, daß innerhalb der Versuchsgrenzen der Gewichtsverlust für 1 Amperestunde (rund 1,10 g ermittelt) unabhängig war von der Stromdichte, der Spannung, der Eisensorte und dem Chlornatriumgehalte, und unab-

¹⁾ Vgl. E. T. Z. 1902, S. 69.

²⁾ Eclairage électrique 1900, p. 141.

³⁾ E. T. Z. 1902, S. 841.

hängig davon, ob der Strom dauernd oder periodisch geschlossen ist.

Es ist hiernach für die Stärke der Korrosion der Rohre die Stromdichte an der Austrittsstelle (Frefsdichte) maßgebend. Im allgemeinen erfolgt der elektrolytische Angriff, wie sich auch aus den entwickelten Formeln ergibt, über eine größere Fläche. In besonderen Fällen kann sich aber an den Rohren eine größere Frefsdichte entwickeln. Dies ist z. B. der Fall, wenn durch einen größeren metallisch leitend verbundenen Rohrkomplex größere Ströme angesaugt werden, die durch einzelne Ausläufer an das Gefahrgelände in die Nähe der Geleise übergeleitet werden. Die Zerstörungen machen sich an den Rohren empfindlicher bemerkbar, wenn die Rohre, die sonst gut gegen Erde isoliert sind, an einzelnen Stellen gute Überleitung besitzen. An solchen Stellen tritt der Strom mit großer Dichte aus. Infolge der hohen Frefsdichte entstehen hier, wie dies wiederholt beobachtet wurde, eng begrenzte tiefe Löcher.

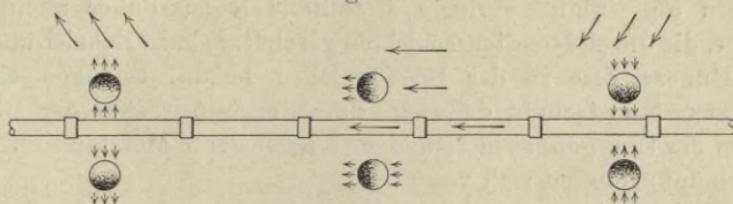
Beim Übergang des Stromes vom Erdboden nach den Rohrleitungen treten Polarisationsspannungen auf, deren Höhe nach Larsen von den wirksamen Spannungen abhängt. Gleichartigkeit des Bodens an der Ein- und Austrittsstelle vorausgesetzt, werden die Polarisationsspannungen an der Ein- und Austrittsstelle im allgemeinen gleich, aber entgegengesetzt gerichtet sein, so daß sie sich gegenseitig aufheben. Es genügen demnach sehr kleine Spannungen, um Rohrströme zu erzeugen, die durch Polarisationsspannungen im allgemeinen nicht verhindert werden. Hiermit stimmen die eingehenden Versuche von Fleming¹⁾ überein, ebenso die von Larsen und die erwähnten Versuche in den Holzkästen, bei denen auch kleine in den Erdboden eingebettete Metallteile korrodiert wurden, obwohl an ihnen nur sehr geringe Spannungen aufgetreten sein können.

Umgekehrt würden geeignet hergestellte kleine Prüfscheibchen oder Prüfkügelchen aus leicht zersetzbarem Metall in der Erde neben den Rohrleitungen erkennen lassen, ob Erdströme von größerer Dichte vorhanden sind und welche Richtung diese Ströme haben. Solche Probescheibchen erscheinen an der Stromaustrittsstelle korrodiert (Fig. 14).

¹⁾ E. T. Z. 1898, S. 835.

Die chemische Beschaffenheit des Bodens spielt bei den Korrosionen eine große Rolle, indem namentlich die Leitfähigkeit des Bodens erhöht und so die Fressdichte verstärkt wird. Wie v. Gaisberg ¹⁾ beobachtete, wird die elektrolytische Stromwirkung durch den Salzgehalt im Boden gefördert, der auf das zum Schneeaufthauen verwandte Salzstreuen zurückzuführen ist.

Fig. 14.



Die gelösten Chloride dringen in den Boden ein, wenn nicht durch eine gute dichte Asphalttschicht, oder bei Pflasterung durch geeigneten Fugenverguss dies verhindert wird. In erster Linie scheinen lösliche Chloride für die Korrosionen in Betracht zu kommen. Durch Elektrolyse wird aus den in der Erde befindlichen Salzen, wie Chlornatrium und Chlorkalium, Chlor frei. Dieses Chlor wirkt besonders stark auf Eisen. Es bildet sich zunächst Eisenchlorid, das einen Rostüberzug auf der Eisenarmatur bildet. Infolge des vorhandenen Wassers bildet sich an der Eisenoberfläche Eisenhydroxyd, indem wieder Chlor frei wird, das wieder weitere Zerstörungen veranlaßt. In zweiter Linie wirken Sulfate. Infolge der schwereren Löslichkeit, besonders des Gipses, unterliegen sie schwerer der Zersetzbarkeit, so daß ihr Einfluß nicht so sehr in Betracht kommt. In dritter Linie kommen Nitrate in Betracht. Die in der Erde vorhandenen organischen Salze haben vermutlich nur unwesentlichen Einfluß, ebenso dürften vorhandene Kieselsäure und Carbonate ohne größeren Einfluß sein.

Durch die Ströme in der Erde werden die verschiedensten Metalle angegriffen, wenn auch in verschiedener Weise, je nach der Oberflächenbeschaffenheit und je nachdem die elektrolytischen verursachten Zerstörungen noch durch den direkten chemischen Angriff unterstützt werden. Gußeisen wird weniger stark an-

¹⁾ E. T. Z. 1903, S. 492.

gegriffen¹⁾ als Schmiedeeisen. Bleirohre werden ebenfalls stark angegriffen. Bei großer Stromdichte in der Erde können selbst die Bleizeichen der Kabel zerstört werden.

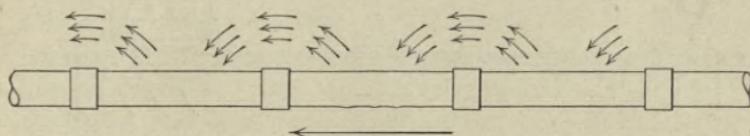
Nach den entwickelten Formeln hängt das Eindringen des Erdstromes in Metallmassen und demnach die Stärke der Korrosionen außer von der Spannung an den Rohren noch von dem Übergangswiderstande und dem Leitungswiderstande der Metallmassen ab. Blank verlegte Metallteile leiden daher mehr als solche, die durch Isolationsschichten geschützt sind. Rohrleitungen, die längere Zeit in der Erde gelegen haben, erlangen einen gewissen Selbstschutz dadurch, daß durch Anrosten der Oberfläche der Übergangswiderstand und auch der Widerstand an den Verbindungsmuffen sich vergrößert.

Es ist irrig, anzunehmen, daß bei Rohren durch die Widerstände an den Muffen besonders starke Korrosionen an den Stofstellen auftreten. Es würde dies nur zutreffen, wenn der Übergangswiderstand vom Rohr zum benachbarten Erdboden sehr klein, der Ausbreitungswiderstand in der Erde aber sehr groß ist. Nimmt man z. B. einen Übergangswiderstand von nur 0,1 Ohm für 1 km, also 100 Ohm für 1 m an, so würde, selbst unter Vernachlässigung des Ausbreitungswiderstandes, der Widerstand von 400 Ohm an der Stofstelle zu überwinden sein, wenn angenommen wird, daß auf $\frac{1}{2}$ m Entfernung von der Muffe der Strom ein- und austritt. Um nur 0,01 Amp. an der Muffe über den Erdboden weg zu leiten, würden demnach 4 Volt erforderlich sein. Es ist demnach Vergrößerung des Muffenwiderstandes nicht nur nicht schädlich, sondern sogar sehr empfehlenswert. Der V. D. E.

¹⁾ Vgl. v. Gaisberg, E. T. Z. 1903, S. 493 und Schiemann, Bau und Betrieb elektrischer Bahnen 1, 148 (1900). Daß im allgemeinen Schmiedeeisen stärker der Zerstörung durch Rost ausgesetzt ist, als Gußeisen, wie zumeist angenommen, wird auch bestritten. Vgl. Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbefleißes. Bericht vom 4. Januar 1904. Prof. Dr. Freund in Frankfurt a. M. untersuchte eingehend gußeiserne Rohre, die stark zerfressen waren, wobei nicht mit Sicherheit festgestellt war, ob die Zerstörungen durch den Einfluß der vagabundierenden Ströme oder durch Lokalströme veranlaßt waren, die durch Berührung der Graphitteilchen mit dem Eisen unter Mitwirkung des feuchten Erdreiches zustande kommen können. Auszug nach der Zeitschr. für angew. Chemie 1904 im Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung 1904, S. 232. Vgl. auch S. 509.

hat daher den Leitsatz aufgestellt, daß ein Gefahrzustand bei Metallrohren nicht besteht, deren Verbindungsstellen den Strom schlecht leiten. Bei Isolierung der Rohrleitungen an den Verbindungsstellen werden im allgemeinen die Rohrströme nicht bloß an den Stofsstellen ein- und austreten, vielmehr werden die Ströme (Fig. 15) auf etwa der halben Rohrlänge austreten, wobei

Fig. 15.



an jeder Ein- oder Austrittsstelle ein großer Übergangswiderstand zu überwinden ist. Nur unter besonderen Verhältnissen (großer Ausbreitungswiderstand, geringer Übergangswiderstand) können Korrosionen an den Stofsstellen auftreten, wie dies tatsächlich beobachtet sein soll¹⁾. Der Vorteil der Isolation an den Stofsstellen zeigt sich besonders zu Tage tretend bei Kabelkorrosionen. Es wurde beobachtet, daß starke Korrosionen der Armatur (veranlaßt durch Kabelfehler) nur bis zur Muffe reichten, an der die Armaturen isoliert waren, während hinter der Muffe das Kabel völlig unversehrt blieb.

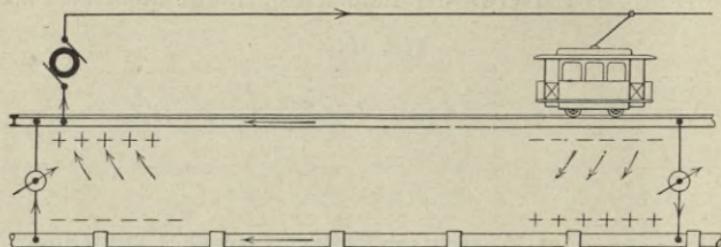
Isolierende Überzüge schützen stets, weshalb Kabel, trotzdem sie den Geleisen meist näher liegen als die Rohrleitungen, wenig gefährdet sind. Rohrleitungen sind um so gefährdeter, je näher sie den Geleisen liegen. An Stellen, an denen die Rohre sich den Geleisen stark nähern, sind die Rohre gegen Korrosionen besonders zu schützen.

An den Ein- und Austrittsstellen der Rohrströme treten Polarisationsspannungen auf. Die Erdströme verlaufen, wie in Fig. 16 dargestellt, während des Betriebes am Speisepunkte von den Rohren zum Geleise, am Ende der freitragenden Strecke umgekehrt. Nach Betriebsschluss entsteht, falls Polarisation stattgefunden hat, ein Strom, der Fig. 17 entspricht. Spannungsmesser, die am Speisepunkte oder am Ende der freitragenden Strecke angeschlossen sind, zeigen in beiden Fällen gleiche Stromrichtung. Die Polarisationsspannungen wirken wie zwei hinter-

¹⁾ Vgl. Journ. f. Gasbeleuchtung u. Wasserversorgung 1903, S. 955.

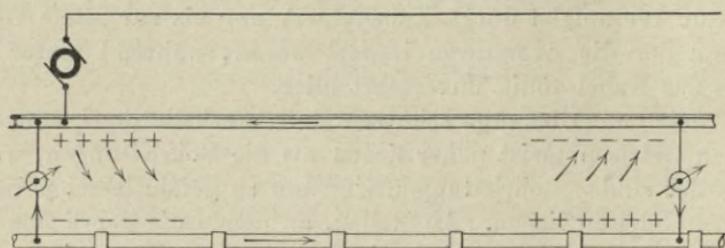
einander geschaltete Elemente, die einerseits durch die Schienen, andererseits durch die Rohrleitungen geschlossen sind. Durch Beobachtung der Spannungen vor und nach Betriebsschluss kann ermittelt werden, ob und in welchem Mafse Polarisationsspannungen

Fig. 16.



auftreten. Durch die nach Betriebsschluss auftretenden Polarisationsströme im Erdboden, die den während des Betriebes auftretenden Erdströmen entgegengerichtet sind, kann eine teilweise, wenn auch geringe Reduktion stattfinden.

Fig. 17.



Nach den Versuchen von Larsen ist die Zersetzung unabhängig davon, ob der Zersetzungstrom dauernd oder periodisch fließt. Es würde hiernach keine merkliche Reduktion durch die Polarisierung auftreten.

Nach Lubberger¹⁾ wurden aufer den vagabundierenden Strömen in den Rohren noch nahezu konstante Ströme festgestellt, die auch nach Betriebsschluss noch dauernd fließen. Während des Betriebes lagern sich die vagabundierenden Ströme über diese konstanten Ströme, die Ruheströme, die Lubberger

¹⁾ Journ. f. Gasbeleuchtung u. Wasserversorgung 1901, S. 508 und 723.

hauptsächlich den in den Muffen sitzenden elektromotorischen Kräften zuschreibt. Auch durch diese konstant fließenden Ströme werden Korrosionen unabhängig von den Bahnströmen veranlaßt.

Naturgemäß treten auch Korrosionen an den Strafsenbahnschienen selbst auf, und zwar in bedeutend höherem Maße als an den Rohren, da die Erdströme sich in der Erde weit verzweigen und auch nur ein Teil in die Rohre eindringt. Werden daher an den Stromaustrittsstellen der Schienen starke Korrosionen wahrgenommen, so kann auf die Entwicklung starker Erdströme geschlossen werden. Die Gefährdungsstellen der Rohre fallen jedoch nicht, wie auch aus den entwickelten Formeln hervorgeht, mit den Korrosionsstellen der Schienen zusammen. Wenn Schienen, die am Endpunkte der freitragenden Strecke gelegen haben, nach vieljährigem Liegen nur ganz geringe Spuren von Korrosionen zeigen, so dürfte auch für die Rohre keine Gefahr vorliegen. Die Freisdichte an den Geleisen kann nach Gleichung 12) bestimmt werden. Für eine Strecke a in der Entfernung x vom Endpunkte der freitragenden Strecke ist der aus den Geleisen in die Erde übertretende Strom

$$\frac{e_x a}{w} = \frac{J W a}{2 L w} \left(\frac{L^2}{3} - x^2 \right).$$

Am Endpunkte der freitragenden Strecke (also für $x = 0$) ist hiernach der auf einem Geleisstücke von 1 m austretende Strom, wenn w der Übergangswiderstand für 1 km ist,

$$\frac{J W 0,001 L}{6 w}.$$

Auch sonstige in der Erde unisoliert verlegte Metallteile, z. B. Eisenkonstruktionen, können der Gefahr der Korrosion ausgesetzt sein, dies um so mehr, auf je längerer Strecke die Metallmassen kontinuierlich leitend verbunden sind, oder wenn infolge örtlicher Verhältnisse größere Spannungen zwischen den Eisenteilen und der Erde derart auftreten, daß die Ströme von den Metallteilen nach der Erde fließen. Kabelleitungen sind, wie bereits erwähnt, trotz großer Länge durch ihre Isolationschicht genügend geschützt, wenn sie nicht allzu nahe den Geleisen verlegt sind und wenn die Armaturen an den Stofsstellen voneinander isoliert sind. Ist aus irgend welchen Gründen, z. B. bei Hochspannungskabeln, die Verbindung der Armaturen erwünscht,

so sind vorteilhaft die Kabel in etwas größerem Abstände von den Geleisen zu verlegen.

Dafs durch die von den Schienen ausgesandten Erdströme Knallgas entwickelt wird, das zu Explosionen Veranlassung geben könnte, ist bei den geringen Spannungen, die in der Erde auftreten, und der meist sehr geringen Stromdichte in der Erde kaum zu befürchten.

Messungen.

Rechnerisch wird man sich in einer projektierten oder vorhandenen Anlage schon ein Bild über die voraussichtlich oder vermutlich auftretenden Erdströme und die Korrosionsgefahr machen können. Es werden aber durch praktische Messungen die Verhältnisse noch mehr geklärt werden, wenn auch Messungen allein ohne Berücksichtigung der Örtlichkeiten, ohne genauere Kenntnis der Anlage, der Entfernung der Rohre von dem Geleise, etwaiger Stellen besonders guter Überleitungsfähigkeit der Kontinuität der Rohrleitungen u. s. w. keinen genauen Aufschluß über etwaige Korrosionsgefahr an den einzelnen Stellen geben.

Die für die Beurteilung der Korrosionsgefahr wünschenswerten Messungen¹⁾ erstrecken sich auf die Geleisspannungen, die Spannungen im Erdboden, die Stromentweichungen aus den Schienen und die Ströme in den Rohren.

Die Spannungsverteilung in den Geleisen wird während des Betriebes am vorteilhaftesten unter Verwendung von Kabelprüfdrähten gemessen, wobei den Schwankungen des Betriebes Rechnung getragen werden mufs. Die Spannungsmessungen zwischen den Speisepunkten dienen zur Beurteilung, ob in genügend vollkommener Weise die Schienenspeisung erfolgt. Der Spannungsverlust zwischen Speisepunkt und Endpunkt der freitragenden Strecke (Mitte zwischen zwei Speisepunkten) giebt den Grenzwert für die Spannung an, die in dem betreffenden Bezirke im Erdboden auftreten kann. Das Messen dieser Spannung ist im Betriebe schwierig, da zu dem Endpunkte der freitragenden Strecke im allgemeinen keine Messleitungen geführt sind. Es

¹⁾ Ausführlich sind die einschlägigen Messungen in dem Vortrage von Kallmann vom 24. Januar 1899 (E. T. Z. 1899, S. 163) behandelt.

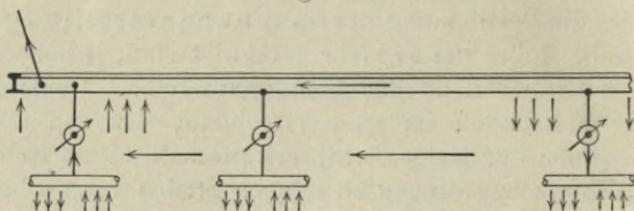
genügt, diese Werte von Zeit zu Zeit zu kontrollieren. Zur Beurteilung der Erdströme sind diese Werte jedoch ohne Kenntnis der Erdwiderstände nicht zu verwenden, da, wie Gleichung 8) zeigt, der Spannungsverlust in den Geleisen um so geringer ist, je stärker die Überleitung nach Erde ist.

Einen guten Anhalt zur Beurteilung der Gefährdung der Rohre giebt die Bestimmung der Spannungsverteilung in der Erde, da die Rohre um so mehr gefährdet sind, je höhere Spannungen im Erdboden an den Rohren auftreten. Obgleich diesbezügliche Messungen im ganzen Gebiete, das von den elektrischen Bahnen durchzogen wird, erwünscht sind, dürfte es meist genügen, Kontrollmessungen an solchen Stellen vorzunehmen, die nach den örtlichen Verhältnissen als besonders gefährdet erscheinen. Nach den Leitsätzen des V. D. E. sind zur Messung solcher Potentialdifferenzen Metallstangen als Elektroden zu verwenden. Bei diesen Messungen ist der Übergangswiderstand der Metallstangen in Rücksicht zu ziehen, z. B. durch Messen mit verschiedenen Vorschaltwiderständen im Stromkreise des Spannungsmessers. Die Potentialverteilung und die Stromverteilung in der Erde darf durch die Messungen nicht verändert werden, es sind daher Spannungsmesser mit großem Widerstande, also geringem Stromverbrauch zu wählen. Kontrollmessungen sind möglichst nach Betriebsschluss zu machen, wobei zu berücksichtigen ist, daß durch die Polarisationswirkung an den Schienen und Rohren die Messungen noch beeinflusst werden können. Um die Bezirke, in denen Rohrkomplexe nach den Leitsätzen des V. D. E. nicht als gefährdet gelten, zu bestimmen, sind Spannungsmessungen in der Erde dicht neben dem Geleise und den Rohren erforderlich. Die Elektroden sind hierbei in einer seitlichen Entfernung von etwa 10 cm von dem Schienenfusse oder Rohre mindestens bis zur Tieflage derselben einzutreiben.

Spannungsmessungen zwischen Geleis und Rohrleitungen können zur Ermittlung der Gefahrbezirke und Schutzbezirke dienen. Für die Beurteilung der Rohrgefährdung haben sie nur Wert, wenn angenommen werden kann, daß sämtliche Rohre metallisch gut leitend verbunden sind. Für kürzere Rohrstücke oder nicht metallisch leitend verbundene Rohrkomplexe haben diese Messungen für die Beurteilung der Rohrströme keinen Wert. Kurze Rohrstücke (Fig. 18) nehmen angenähert

das Potential der Umgebung an. Sie verhalten sich gegenüber dem benachbarten Geleise positiv, neutral oder negativ, je nach der Entfernung vom Schienenspeisepunkte. Im Schutzbezirke sowohl wie im Gefahrbezirke und in der neutralen Zone treten Ströme in die Rohrstücke ein und aus ihnen wieder heraus.

Fig. 18.



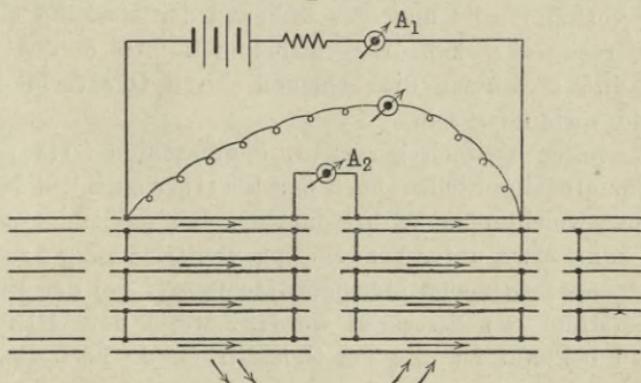
Es giebt auch bei kontinuierlich leitend verbundenen Rohrkomplexen die Spannungsmessung zwischen Schienen und Rohren nur qualitativ, nicht quantitativ Aufschluß über die Gefährdung der Rohre, da diese Gefährdung nur von der Dichte der aus den Rohren austretenden Ströme abhängt¹⁾. Diese Dichte (Fresdichte) hängt jedoch noch von anderen Faktoren, der Spannung des Rohres gegen den umgebenden Erdboden und dem Rohrübergangswiderstande ab. In den Gleichungen 7) und 12) kommt für die Berechnung der Spannung zwischen Geleis und Erde der Übergangswiderstand w nicht vor. Diese Spannung hängt nur von den Geleislängen, dem Geleiswiderstande und Geleisstrom ab. Es sind demnach die Korrosionsströme noch nicht durch jene Spannungen allein bestimmt.

Um die Stromentweichungen aus den Schienen rechnerisch verfolgen zu können, muß man den Widerstand des fertig verlegten Geleises kennen. Ist es möglich, eine Strecke von einigen hundert Metern vom Netze zu trennen, so verbindet man am Anfang und Ende die Schienen gut leitend durch Querverbindungen. Durch eine Stromquelle, etwa einige Akkumulatorenzellen, wird ein konstanter Strom in die Geleise geschickt. Der Geleiswiderstand wird aus Strom- und Spannungsmessungen bestimmt. Mißt man die Spannungsverluste streckenweise, so kann man die Stromentweichungen feststellen. Wird die Versuchsstrecke in der Mitte getrennt (Fig. 19) und durch einen

¹⁾ Vgl. Lubberger, E. T. Z. 1902, S. 186.

Stromzeiger möglichst gut leitend wieder verbunden, so giebt die Differenz der Stromstärken A_1 und A_2 die aus den Schienen in die Erde ausgesandte Stromstärke an. Diese Methode, die Stromentweichung zu bestimmen, ist aber ungenau, da durch die Überbrückung in der Mitte durch den Stromzeiger der Geleiswiderstand

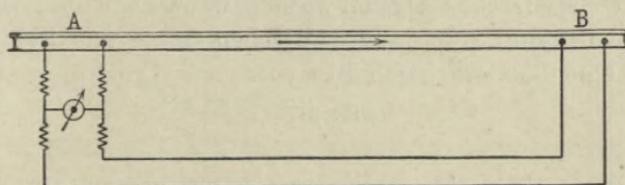
Fig. 19.



nicht unerheblich vergrößert wird. Die nach dieser Methode gefundenen Werte für die Erdströme sind daher zu groß.

Für genauere Messungen der Stromentweichungen hat Kallmann¹⁾ eine Differentialmethode angegeben. Das Prinzip der Messung ist aus Fig. 20 ersichtlich. Soll die auf der Strecke AB

Fig. 20.



auftretende Stromentweichung bestimmt werden, so werden bei A und B von gleichen Schienenstrecken von etwa 10 m Länge Abzweigungen für Spannungsmessungen gemacht. Ein empfindlicher Spannungsmesser ist so geschaltet, daß er die Differenz der Spannungen an den Abzweigstellen A und B anzeigt. Bei genauer Vorjustierung durch konstanten Strom (außer der Betriebs-

¹⁾ E. T. Z. 1899, S. 163 und E. T. Z. 1898, S. 683.

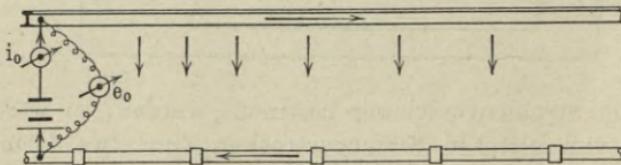
zeit) können die Verhältnisse so gewählt werden, daß einem bestimmten Ausschlag am Spannungsmesser eine runde Amperezahl der Stromentweichung entspricht. Einmal genau vorgeacht, kann die Anordnung im normalen Straßenbahnbetriebe verwandt werden. Bei der Messung ist vorausgesetzt, daß auf der Strecke zwischen A und B keine Geleiskreuzung und keine Abzweigung vorhanden ist und daß während der Messung sich auf der Meßstrecke AB kein Wagen befindet. An den Abzweigestellen A und B müssen die Schienen durch Querverbindungen gut leitend verbunden sein.

Für große, vielfach gespeiste, engmaschige Netze genügt es, nur für einzelne Stellen nach der Kallmannschen Methode die Stromentweichungen zu bestimmen. Bei passend gewählten Strecken kann etwa unter Verwendung von Gleichung 4) aus der so gefundenen maximalen Stromentweichung (i_{\max}) der Erdübergangswiderstand (w) berechnet werden, wenn der Geleiswiderstand (W) bekannt ist und der Geleisstrom (J) noch besonders bestimmt wird.

Der Erdübergangswiderstand kann indirekt auch nach Gleichung 8) ermittelt werden, wenn J und W demnach der Spannungsabfall bei einem abgetrennten, von konstantem Strome durchflossenen Geleis bekannt ist, der ohne Stromentweichungen auftreten würde.

Direkt kann der Erdübergangswiderstand für eine abgetrennte Geleisstrecke bestimmt werden, wenn Rohr- und Schienenwiderstand bekannt sind, indem zwischen Geleis und Rohrleitung (Fig. 21) eine Batterie geschaltet wird, die Erdströme von den

Fig. 21.



Schienen nach dem Rohre erzeugt. Nimmt man angenähert an, daß der Stromübergang von Schienen nach Rohr proportional der Länge bis zum Ende der Strecke abnimmt, so ist, wenn der Strom am Anfang i_0 ist, der mittlere Strom $\frac{i_0}{2}$. Ist der Schienen-

widerstand für die Längeneinheit W_S , der der Rohrleitung W_R , so sind die Spannungsverluste in Rohr und Schienen bis zum Ende der Strecke L

$$\frac{i_0 (W_R + W_S) L}{2}.$$

Die Spannung Rohr gegen Schienen am Ende ist demnach

$$e_0 - \frac{i_0 (W_R + W_S) L}{2}.$$

Hierbei ist e_0 die Spannung der Batterie. Es ist demnach die mittlere Spannung

$$\frac{4 e_0 - i_0 (W_R + W_S) L}{4}.$$

Der mittlere für die Längeneinheit aus den Schienen nach den Rohren fließende Strom ist demnach

$$\frac{4 e_0 - i_0 (W_R + W_S) L}{4 w},$$

demnach ist der gesamte auf der Strecke L zur Rohrleitung überfließende Strom

$$\frac{[4 e_0 - i_0 (W_R + W_S) L] L}{4 w}.$$

Dies ist der Strom i_0 . Es folgt demnach

$$i_0 = \frac{4 e_0 L}{4 w + L^2 (W_R + W_S)} \dots \dots \dots 20)$$

Eine genauere ¹⁾ Rechnung giebt den Wert

$$i_0 = \frac{e_0 L}{w} \cdot \frac{6 w + L^2 (W_S + W_R)}{6 w + 3 L^2 (W_S + W_R)} \dots \dots \dots 20 a)$$

¹⁾ Es sei V_l das Potential eines Geleispunktes in der Entfernung l von der Stromeinführungsstelle, v_l sei das entsprechende Rohrpotential, dann ist der auf einer Strecke dl vom Geleise nach der Rohrleitung überfließende Strom

$$d i = (V_l - v_l) \frac{d l}{w},$$

also

$$\frac{d^2 i}{d l^2} = (d V_l - d v_l) \frac{1}{w}.$$

Setzt man beispielsweise $e_0 = 2$ Volt, $L = 2$ km, $w = 0,2$ Ohm, $W_S = 0,01$, $W_R = 0,1$ Ohm pro 1 km, so erhält man Gleichung 20) für $i_0 = 12,9$ Amp. Rechnet man nach Gleichung 20 a), so erhält man 13 Amp.

Indirekt kann man aus Gleichung 20) oder 20 a) den Wert von w berechnen, wenn i_0 und die übrigen Größen bekannt sind.

Wird der Strom nicht, wie in Fig. 20, an einem Ende der Strecke eingeführt, so setzt sich der an der Einführungsstelle auftretende Strom aus den zwei nach beiden Richtungen hin verlaufenden Strömen zusammen. Wird der Strom in der Mitte der Strecke eingeführt und ist L die Teillänge, so ergibt sich für i nach Gleichung 20) der doppelte Wert. Ähnliche Erwägungen gelten, wenn der Strom an einer Kreuzungs- oder Verzweigungsstelle eingeführt wird. Nach Gleichung 20) oder 20 a) müssen für die vom Kreuzungspunkte ausgehenden Strecken die Ströme einzeln berechnet werden.

$$\begin{aligned} \text{Es ist} \quad & dV_l = i W_S dl \\ & d v_l = i W_R dl, \end{aligned}$$

wenn i der Strom (im Geleise bezw. Rohr) in der Entfernung l ist.

Es ergibt dies die Differentialgleichung:

$$\frac{d^2 i}{dl^2} - i \left(\frac{W_S + W_R}{w} \right) = 0,$$

deren Auflösung ist:

$$i = b_1 e^{l \sqrt{\frac{W_S + W_R}{w}}} + b_2 e^{-l \sqrt{\frac{W_S + W_R}{w}}}.$$

Setzt man der Einfachheit wegen

$$\sqrt{\frac{W_S + W_R}{w}} = \alpha,$$

so wird

$$i = b_1 e^{l \alpha} + b_2 e^{-l \alpha}.$$

Die Konstanten b_1 und b_2 werden aus den Grenzwerten bestimmt. Es ist für

$$l = 0 \quad \frac{di}{dl} = \frac{e_0}{w}$$

$$l = L \quad i = 0.$$

Für die erste Bedingungsgleichung erhält man:

$$\frac{di}{dl} = b_1 \alpha e^{\alpha l} - b_2 \alpha e^{-\alpha l},$$

Vernachlässigt man in den Gleichungen 20) und 20 a) Geleis- und Rohrwiderstand, so erhält man für i zu große Werte (in obigem Beispiel 20 Amp. statt 13 Amp.). Ebenso erhält man, da nach Gleichung 20)

$$w = \frac{e_0 L}{i_0} - \frac{L^2 (W_R + W_S)}{4} \dots \dots \dots 21)$$

ist, für w zu hohe Werte, wenn Rohr- und Geleiswiderstände vernachlässigt werden.

Verbindet man nach dem Vorgange von Herrick¹⁾ während des Betriebes einen Geleispunkt mit einem Rohrpunkte durch einen Widerstand, so ist der übertretende Strom aufser vom Rohr- und Geleiswiderstände vom Übergangswiderstände und der Stromverteilung in den Geleisen abhängig. Ohne die ersteren zu kennen, kann daher nicht ohne weiteres aus den Strom- und Spannungsmessungen allein auf den Übergangswiderstand ge-

also mit $l = 0$

$$\alpha (b_1 - b_2) = \frac{e_0}{w};$$

ferner ist für $l = L$

$$b_1 e^{\alpha L} + b_2 e^{-\alpha L} = 0.$$

Man erhält so:

$$b_1 = \frac{e_0}{\alpha w} \cdot \frac{e^{-L\alpha}}{e^{L\alpha} + e^{-L\alpha}}$$

$$b_2 = \frac{e_0}{\alpha w} \cdot \frac{e^{L\alpha}}{e^{L\alpha} + e^{-L\alpha}},$$

demnach für den Strom i

$$i = \frac{e_0}{\alpha w} \cdot \frac{e^{(l-L)\alpha} - e^{(L-l)\alpha}}{e^{L\alpha} + e^{-L\alpha}}.$$

Es interessiert nur der Wert für $l = 0$. Es wird

$$i_0 = \frac{e_0}{\alpha w} \cdot \frac{e^{-L\alpha} - e^{L\alpha}}{e^{L\alpha} + e^{-L\alpha}}.$$

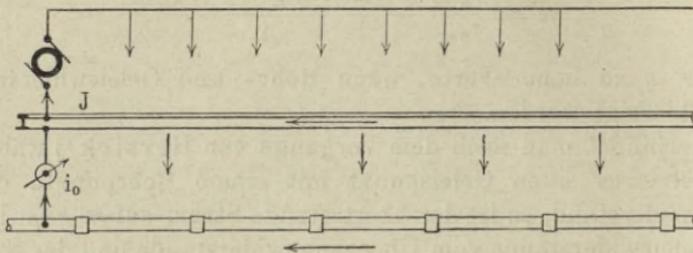
In Reihen aufgelöst erhält man in Annäherung (ohne Rücksicht auf das Vorzeichen von i_0):

$$i_0 = \frac{e_0 L}{w} \cdot \frac{6 w + L^2 (W_S + W_R)}{6 w + 3 L^2 (W_S + W_R)}.$$

¹⁾ Street Railway Journal 1898, p. 775.

geschlossen werden. Ist am Speisepunkte das Geleis widerstandslos mit der Rohrleitung verbunden (Fig. 22), so tritt auf der ganzen freitragenden Strecke vom Geleis nach den Rohren Strom über und zwar mit der größten Stromdichte am Endpunkte. Nimmt

Fig. 22.



der Strom vom Speisepunkte an im Geleis gleichmäßig ab, so ist, wenn der Geleisstrom am Speisepunkte J ist, der mittlere Strom $\frac{J}{2}$, der Spannungsverlust auf der ganzen freitragenden Strecke L (mit Vernachlässigung der entwichenen Leckströme) $\frac{J W_s L}{2}$, der Strom in der Verbindung zwischen Geleis und Rohr sei i_0 ; da der Rohrstrom am Ende Null ist (unter Voraussetzung, daß der Einfluß der Verbindung von Rohr und Geleis nur bis zum Ende der freitragenden Strecke reicht), so ist der mittlere Rohrstrom $i_0/2$, der Spannungsverlust in der Rohrleitung $\frac{i_0 W_R L}{2}$.

Die Spannung zwischen Geleis und Rohr am Ende der freitragenden Strecke ist demnach

$$\frac{J W_s L - i_0 W_R L}{2}.$$

Die mittlere Spannung zwischen Geleis und Rohr ist, da infolge der Kurzschlussverbindung am Anfange die Spannung Null ist,

$$\frac{J W_s L - i_0 W_R L}{4}.$$

Der mittlere für die Längeneinheit austretende Strom ist demnach

$$\frac{J W_s L - i_0 W_R L}{4 w}.$$

Der gesamte auf der freitragenden Strecke L austretende Strom ($= i_0$) ist daher

$$\frac{J W_s L^2 - i_0 W_R L^2}{4w} = i_0.$$

Es folgt:

$$i_0 = \frac{J W_s L^2}{4w + W_R L^2} \dots \dots \dots 22)$$

Eine genauere Rechnung¹⁾ ergibt

$$i_0 = \frac{J W_s}{W_s + W_R} \left(1 - \frac{1 + L^2 \frac{W_s + W_R}{6w}}{1 + L^2 \frac{W_s + W_R}{2w}} \right) \dots \dots 22 a)$$

¹⁾ Es sei V_x das Potential eines Geleispunktes, v_x das eines Rohrpunktes in der Entfernung x vom Endpunkte der freitragenden Strecke. Für den Stromübergang auf der Strecke dx gilt die Beziehung

$$\begin{aligned} \frac{di}{dx} &= \frac{V_x - v_x}{w} \\ \frac{d^2 i}{dx^2} &= \frac{1}{w} \left(\frac{dV_x}{dx} - \frac{dv_x}{dx} \right), \\ dV_x &= - J_x W_s dx \\ dv_x &= - i W_R dx, \end{aligned}$$

wenn J_x der Geleisstrom in der Entfernung x ist,

$$J_x = \frac{Jx}{L} - i,$$

wobei J der Geleisstrom am Speisepunkte ist.

Es folgt:

$$\frac{d^2 i}{dx^2} - \frac{i W_s}{w} + \frac{Jx W_s}{Lw} - \frac{i W_R}{w} = 0,$$

für

$$i (W_s + W_R) - \frac{Jx W_s}{L} = u$$

gesetzt erhält man:

$$\frac{d^2 u}{dx^2} - u \cdot \frac{W_s + W_R}{w} = 0.$$

Demnach

$$u = b_1 e^{x\alpha} + b_2 e^{-x\alpha},$$

wobei

$$\alpha = \sqrt{\frac{W_s + W_R}{w}} \text{ ist.}$$

Die Gleichungen 22) und 22 a) führen zu annähernd gleichen Werten; setzt man beispielsweise $J=100$, $W_S=0,01$, $W_R=0,1$, $L=2$, $w=0,2$, so wird nach Gleichung 22) $i_0=3,3$ Amp., nach Gleichung 22 a) $i_0=3,27$ Amp.

Ist die Stromverteilung anders, als bei der Berechnung der Gleichungen angenommen wurde, so ändern sich die Werte. Ist beispielsweise nur am Endpunkte die freitragende Strecke belastet, so erhält man für i_0 den Wert

$$\frac{J W_S L^2}{2 w + L^2 (W_S + W_R)}.$$

Ist die Art der Belastung nicht genau bekannt, so geben die Messungen nur allgemein orientierend Aufschluss über den Erdübergangswiderstand.

Verzweigt sich der Maschinenstrom vom Schienenspeisepunkte aus (Fig. 23) nach zwei oder mehreren Richtungen, so

Man erhält:

$$i (W_S + W_R) - \frac{J x W_S}{L} = b_1 e^{x\alpha} + b_2 e^{-x\alpha}.$$

Die Konstanten b_1 und b_2 können wieder aus den Grenzbedingungen ermittelt werden:

$$\text{für } x = 0 \text{ wird } i = 0,$$

$$\text{für } x = L \text{ wird } \frac{di}{dx} = 0.$$

Durch Differenzieren erhält man:

$$\frac{di}{dx} (W_S + W_R) = \frac{J W_S}{L} + b_1 \alpha e^{x\alpha} - b_2 \alpha e^{-x\alpha} = 0.$$

Man erhält

$$b_1 = -b_2 \quad \text{und} \quad b_1 = -\frac{J W_S}{L \alpha (e^{L\alpha} + e^{-L\alpha})}.$$

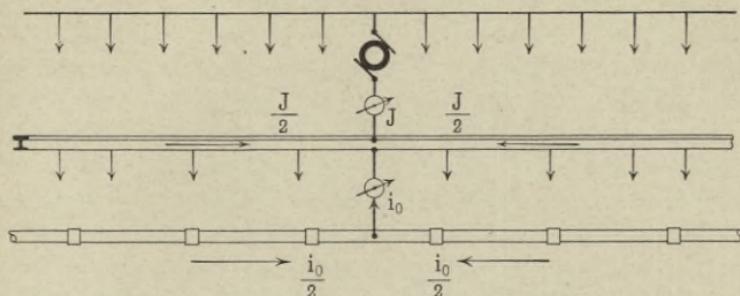
$$i (W_S + W_R) - \frac{J x W_S}{L} = -\frac{J W_S (e^{x\alpha} - e^{-x\alpha})}{L \alpha (e^{L\alpha} + e^{-L\alpha})}.$$

Die Exponentialgrößen in Reihen aufgelöst (für $x=L$) erhält man schließlich angenähert:

$$i_0 = \frac{J W_S}{W_S + W_R} \left(1 - \frac{1 + L^2 \frac{W_S + W_R}{6 w}}{1 + L^2 \frac{W_S + W_R}{2 w}} \right).$$

gilt die Gleichung 22) sinngemäß für die einzelnen Zweigstrecken. Gehen vom Speisepunkte zwei Strecken von gleicher Länge aus, die gleich belastet sind, so würde die Gleichung 22) bestehen

Fig. 23.



bleiben, wenn unter J der gesamte am Speisepunkte in die Geleise eintretende Strom und unter i_0 der gesamte in der Verbindungsleitung von Geleis und Rohr fließende Strom verstanden wird.

Die Widerstände der Schienen ohne Stofsverbindungen können am sichersten vor der Verlegung im Laboratorium bestimmt werden. Den Widerstand des fertig verlegten Geleises kann man bestimmen, indem man in eine nicht zu lange, am besten vom übrigen Netze abgetrennte Strecke konstanten Strom schickt und aus dem Spannungsverluste den Widerstand berechnet. Vorteilhaft ist hierbei, aufer dem gesamten Spannungsverluste noch die Spannungen für kleinere Längen zu messen, um die Abströmung nach Erde nach Gleichung 3 a) und 4) berücksichtigen zu können.

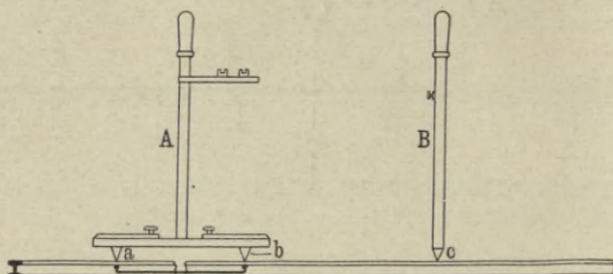
Durch fehlerhafte Stofsverbindungen wird der Geleiswiderstand vermehrt und dadurch das Entweichen von Strom nach Erde begünstigt. Die Kontrollmessungen zur Ermittlung schlechter Stofsverbindungen werden zumeist derart vorgenommen, daß der Widerstand einer Stofsverbindung mit dem eines Schienenstückes unter Verwendung eines Differentialgalvanometers verglichen wird¹⁾.

Der zur Messung der Widerstände von Schienenstößen dienende Apparat von Siemens & Halske enthält eine Kontakt-

¹⁾ Vgl. E. T. Z. 1900, S. 796 und 986. Ibid. 1901, S. 84.

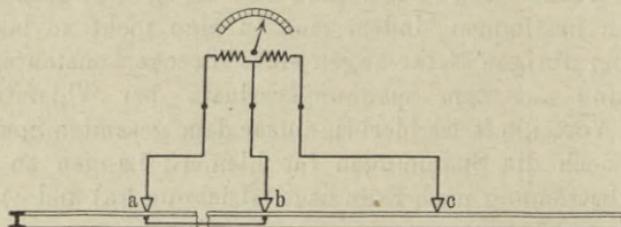
stange *A* mit zwei verschiebbar angeordneten Kupferkontaktspitzen *a* und *b* (Fig. 24), die am Schienenstosse aufgesetzt werden und eine zweite Kontaktstange *B* mit einer Kontaktspitze in *c*, die in etwa 4 m Entfernung auf die Schiene aufgesetzt wird.

Fig. 24.



Von den Kontaktspitzen führen Verbindungsleitungen zu einem Differentialgalvanometer (nach Deprez d'Arsonval), das gegen äußere magnetische Störungen unempfindlich ist und eine Teilung in Millivolt besitzt. Die Schaltung ist aus Fig. 25 ersicht-

Fig. 25.



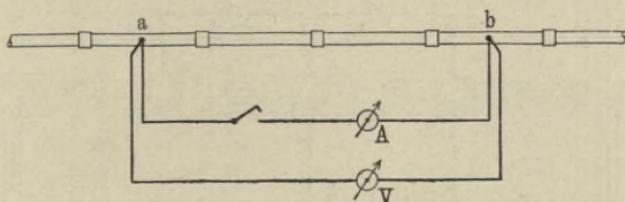
lich. Werden nur die Spitzen *a* und *b* auf die unter Strom (in normalem Betriebe) stehende Schienenverbindung aufgesetzt, so ist die eine Wicklung des Galvanometers eingeschaltet, das die Spannung an diesem Stosse mißt. Wird die zweite Kontaktstange bei *c* aufgesetzt, die mit der zweiten Wicklung des Galvanometers in Verbindung steht, so wird der Ausschlag vermindert und kann durch Verschiebung des Kontaktes *c* auf Null gebracht werden. Die Entfernung *bc* ist dann die Schienenlänge, die der Stofsverbindung entspricht. Ist der Schienenwiderstand pro Meter bekannt, so kann der Widerstand der Stofs-

verbindung in Ohm ermittelt werden. Die Messungen sind unabhängig vom Betriebsstrom, sie sind aber, um die Empfindlichkeit der Messung zu steigern, bei möglichst hohem Betriebsstrom vorzunehmen.

Die Rohrströme einwandfrei zu messen, macht meist große Schwierigkeiten. Larsen und Faber¹⁾ führten derartige Messungen in Kopenhagen aus, indem sie außer Betrieb möglichst genau den Widerstand von bestimmten, in der Erde verlegten Rohrstücken maßen und während des Betriebes durch hochempfindliche Zeiger galvanometer an den Rohrstücken Spannungsmessungen machten. Werden solche Messungen an verschiedenen Stellen ausgeführt, so kann man unter Berücksichtigung der örtlichen Verhältnisse ein gutes Bild über die gefährdeten Bezirke erhalten. Da der Rohrstrom proportional dem Bahnstrom ist, so genügen auch kurzzeitige Beobachtungen, wenn gleichzeitig der Strom im benachbarten Geleise gemessen und so der Rohrstrom in Prozenten des Geleisstromes bestimmt wird.

Angenähert kann nach Herrick²⁾ der Rohrstrom aus zwei Spannungs- und einer Strommessung bestimmt werden. In die Rohrleitung sind bei *a* und *b* (Fig. 26) Abzweigungen gemacht,

Fig. 26.



an die ein Voltmeter *V* und mit einem Schalter ein Amperemeter *A* angeschlossen werden. Der Strom im Voltmeter sei so klein, daß er gegenüber dem Rohrstrom J_R vernachlässigt werden kann. Bei geöffnetem Schalter sei die Spannung $e_1 = J_R W_R$. Bei geschlossenem Schalter werde die Spannung e_2 und der Strom i gemessen. Es ist dann

$$e_2 = (J_R - i) W_R.$$

¹⁾ E. T. Z. 1901, S. 1038.

²⁾ Street Railway Journal 1898, p. 775.

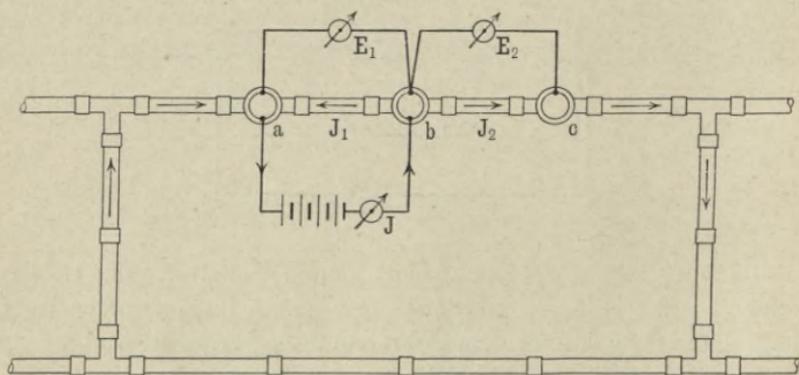
Es folgt, falls sich während der Messungen der Rohrstrom J_R außerhalb der Meßstrecke nicht geändert hat,

$$J_R = i \frac{e_1}{e_1 - e_2}.$$

Um den Einfluß etwaiger Polarisationspotenziale in den Rohrenmuffen auszuschließen, sind noch nach Betriebsschluss Kontrollmessungen vorzunehmen.

Nach Lubberger ¹⁾ fließen außer den vagabundierenden Strömen noch konstante Ströme auch außerhalb der Betriebszeit durch die Rohre, die durch Polarisation oder durch galvanische Wirkung der verschiedenen Metalle an den Muffen veranlaßt sein können. Im Betriebe lagern sich die durch die Bahn veranlaßten Ströme über jene konstanten Ströme. Um sich hierüber ein Urteil zu bilden und so die Gefährdung von Rohren bestimmen zu können, empfiehlt Lubberger Spannungsmessungen zwischen zwei Hydranten vor und während des Betriebes. Um den Rohrstrom hieraus bestimmen zu können, wird der Rohrwiderstand außer Betrieb bestimmt. Lubberger benutzt hierbei eine Anordnung Fig. 27, indem er an die Rohre zwischen den Hy-

Fig. 27.



dranten a und b eine Batterie anlegt. Der Batteriestrom J verzweigt sich. Ein Teil J_1 geht von b nach a unmittelbar auf dem kürzesten Wege, ein anderer Teil J_2 geht von b über den Hy-

¹⁾ Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung 1901, S. 508 und 723.

dranten c und das Rohrnetz zurück zu a . Sind die entsprechenden Rohrwiderstände für die Längeneinheit W_1 und W_2 , die Rohrlängen L_1 und L_2 , so ist $J_1 W_1 L_1 = E_1$ und $J_2 W_2 L_2 = E_2$, außerdem ist $J = J_1 + J_2$. Wird angenommen, daß der Rohrwiderstand der Länge L proportional, also $W_1 = W_2$ der Widerstand für die Längeneinheit für beide Strecken gleich ist, so ist:

$$W_1 = \frac{E_2 L_1 + E_1 L_2}{J L_1 L_2}.$$

(In ähnlicher Weise, indem der Mefsstrom nur über kurze Rohrstücke geschickt wurde, bestimmte auch Larsen die Rohrwiderstände.) Ist die Entfernung der Hydranten a und b bzw. b und c und auch der Rohrwiderstand nicht groß, so daß keine nennenswerten Stromentweichungen in die Erde vorkommen, so dürfte der Rohrwiderstand sich nach obiger Gleichung bestimmen lassen. Ist der Rohrwiderstand bekannt, so lassen sich während des Betriebes durch Beobachtung der Spannungen zwischen a und b oder b und c auch die Rohrströme bestimmen. Bei den Anschlüssen an den Hydranten ist nach Lubberger zu beachten, daß das Gewinde der Schlauchkuppelung gegen den eisernen Hydrantenkörper infolge der Abdichtung, die aus Gummi und Leder besteht, isoliert ist. Es ist daher nicht statthaft, die Anschlußdrähte unmittelbar an die Gewinde der Schlauchkuppelung anzuklemmen.

Lubberger maß die Rohrwiderstände auch nach der Schaltung Fig. 26 und fand hierbei etwas abweichende Werte. Er fand z. B. bei der Messung nach Schaltung Fig. 27 für 1 m verlegtes Rohr 0,007 und 0,0021 Ohm, nach der Schaltung Fig. 26 für die gleichen Rohre 0,004 und 0,0012 Ohm. Entsprechend würden sich im Betriebe bei Messung nach Schaltung Fig. 26 zu kleine Rohrströme ergeben. Lubberger ermittelt so die Rohrströme vor und während des Betriebes. Er fand den Rohrstrom während des Betriebes durchschnittlich viermal so groß, in dem einen Falle 16 mal so groß als den Ruhestrom (d. i. der Rohrstrom vor dem Betriebe). Der Unterschied beider Ströme giebt nach Lubberger ein Maß für die Gefährdung der Rohre.

Abwehrmittel.

Um die Gefahr elektrolytischer Zerstörungen zu vermindern oder zu beseitigen, werden Anordnungen getroffen, die die Erdströme selbst vermindern, ihren Eintritt in die Rohre erschweren und den Austritt aus den Rohren möglichst gefahrlos für die Rohre machen. Vollkommen vermieden werden die Erdströme nur, wenn unisolierte Schienen nicht als Rückleitung verwandt werden, z. B. bei Akkumulatorenbahnen oder bei Bahnen mit Doppelleitungen, die isoliert entweder unterirdisch in Schlitzkanälen oder oberirdisch geführt werden. Aus wirtschaftlichen, betriebstechnischen und zum Teil aus ästhetischen Gründen verbieten sich häufig derartige Anlagen.

In den Formeln für die Gröfse des Erdstromes oder des Rohrstromes befinden sich im Zähler Widerstand des Geleises, Länge der freitragenden Strecke, Stromdichte in den Schienen, im Nenner Übergangswiderstand von Schienen oder Rohr zur Erde und Ausbreitungswiderstand in der Erde, ferner Rohrwiderstand. Dementsprechend gehen die Schutzmafsregeln im allgemeinen darauf hinaus, die Zählergröfsen möglichst klein, die Nennergröfsen möglichst grofs zu halten.

Um kleine Geleiswiderstände zu erhalten, werden möglichst grofse Schienenprofile gewählt, und es werden die Schienen an den Stöfsen zuverlässig gut leitend verbunden. Um eine ununterbrochene Leitfähigkeit der Geleise zu sichern, werden Querverbindungen zwischen den Schienen eines Geleises und bei zweigeleisigen Bahnen zwischen den Geleisen in bestimmten Abständen angebracht. Nach den Leitsätzen des V. D. E. erhalten die zwei Schienen eines Geleises an jedem zehnten Stofse eine Querverbindung; bei Doppelgeleisen erhalten die zwei Geleise an jedem zwanzigsten Stofse eine Querverbindung. Die Leitfähigkeit der Schienen durch parallel gelegte Kupferleitungen zu verstärken, hätte nur Zweck, wenn die Kupferleitung einen sehr hohen Querschnitt besitzt. Nimmt man für die Schienen einschliesslich der Stofsverbindungen eine mittlere Leitfähigkeit nur gleich 4 an, so mufs der Kupferquerschnitt etwa $\frac{1}{14}$ des Querschnittes der Schienen sein, um den Geleiswiderstand und daher auch die Erdströme auf die Hälfte zu vermindern. Bei einem

Querschnitte von 6464 qmm für eine Schiene würde hiernach bei einer zweigeleisigen Bahn ein Kupferquerschnitt von rund 1800 qmm erforderlich sein. Es sind daher unverhältnismäßig hohe, nicht mehr wirtschaftliche Kupferquerschnitte erforderlich, um eine nennenswerte Wirkung zu erzielen. Es ist daher meist vorteilhafter, möglichst große Schienenprofile zu wählen und die Zuverlässigkeit der Stofsverbindungen zeitweise zu kontrollieren. Um die Gesamtleitungsfähigkeit eines Netzes zu erhöhen und größere Spannungen an den Kreuzungsstellen zu verhüten, sind an sämtlichen Weichen und Kreuzungspunkten die Schienen durch besondere Verbindungen in gut leitenden Zusammenhang zu bringen. Über die Art der Stofsverbindung erübrigt es sich bei der reichhaltigen Litteratur, die hierüber vorhanden ist, Näheres auszuführen.

Ist der Geleiswiderstand möglichst klein zu halten, so ist der Rohrwiderstand nach Möglichkeit zu vergrößern. Bei Wahl des Rohrmaterials auf die Leitfähigkeit Rücksicht zu nehmen, ist ebenso wie beim Geleismaterial nicht immer angängig, da andere Faktoren für die Wahl des Materials entscheidend sind. Gufseisen hat größeren spezifischen Widerstand als Schmiedeeisen, und ist daher bezüglich des Rohrwiderstandes günstiger als Schmiedeeisen, das, wie erwähnt, auch stärker elektrolytisch beeinflusst wird. Einen großen Widerstand können Rohrleitungen mit der Zeit annehmen, da an den Stofsverbindungen große Widerstände auftreten können, wodurch die Rohre einen gewissen Selbstschutz erhalten. Dieser Schutz kann noch erhöht werden, wenn isolierende Stücke in die Rohrleitungen eingesetzt werden. Hierdurch wird nicht bloß das Auftreten von Erdströmen vermindert, da der Ausbreitungswiderstand (w_e) hierdurch vergrößert wird, sondern es wird auch noch der Teilbetrag der Erdströme, die ins Rohr eindringen, verkleinert. Durch solche isolierende Zwischenstücke kann auch verhindert werden, daß gefährliche Potentiale aus größerer Entfernung durch Rohrleitungen in die Nähe der Geleise gebracht werden. In den Leitsätzen des V. D. E. ist auch die Erhöhung des Widerstandes an den Rohrverbindungsstellen durch Einfügen von isolierenden Zwischenstücken als ein wesentliches Mittel zum Schutz der Rohre empfohlen.

Durch Isolierung der Schienen und Rohre wird einer-

seits der Austritt des Stromes aus den Schienen, anderseits der Eintritt in die Rohre erschwert. Bei Bahnen mit eigenem Bahnkörper wird man meist eine hinreichend gute Isolierung erzielen können, so daß die Entwicklung schädlicher Erdströme nicht zu befürchten ist. Der Geltungsbereich der Leitsätze des V. D. E. erstreckt sich daher auch nicht auf solche Bahnen, bei denen durch Anwendung sehr gut entwässerter, daher schlecht leitender oder geradezu isolierender Unterbettung (z. B. Holzschwellen auf grobem Kies, Asphalteinbettung u. s. w.) eine erhebliche Erdstrombildung verhindert wird.

Wird bei derartigen Bahnen demnach die Erde nicht mit zur Fortleitung des Stromes benutzt, so können, namentlich wenn es sich um weite Überlandbahnstrecken handelt, größere Spannungsverluste in den Geleisen auftreten. An den Wegübergängen ist in der Regel der Übergangswiderstand auf einer kurzen Strecke bedeutend vermindert. Es können daher in vereinzelt Fällen in kurzen Abständen zwischen Geleisen und umgebender Erde größere Spannungen auftreten, die besonders Tieren gefährlich werden können. Durch gute Erdung der Geleise an den Wegübergängen könnte zwar dem Übelstande abgeholfen werden, es würden hierbei aber starke Erdströme entstehen, die durch Schienenisolierung zu vermeiden wären. Eine Abtrennung der Schienenstücke an den Wegübergängen läßt sich in den meisten Fällen nicht durchführen.

Kallmann schlägt für solche Fälle an den Wegübergängen die „halbe Erdung“ der Geleise vor, wie sie an eisernen Masten zur Verhütung von gefährlichen Spannungen in der Erde auf kurzer Entfernung vorgenommen wird, damit im Falle der Berührung der Oberleitung oder Hochspannungsleitung mit dem Mast der Spannungsabfall in der Erde sich auf eine größere Strecke verteilt und so für Menschen und Tiere gefahrlos wird. Für diese halbe Erdung empfiehlt Kallmann ein Kupferseil in einigen großen Windungen spiralförmig ziemlich flach, nur etwa $\frac{1}{2}$ bis 1 m tief, in der Erde auszubreiten. Ein so verlegtes, mit dem Geleise verbundenes Seil giebt die gewünschte unvollkommene Erdung, bei der der Übergangswiderstand groß genug ist, um die Entwicklung größerer Beträge von Erdströmen zu verhindern, anderseits aber eine ungefährliche Spannungsverteilung in der Erde herbeizuführen.

Bei Strassenbahnen ohne eigenen Bahnkörper läßt sich die Isolierung der Geleise nicht vollkommen durchführen. Man muß aber auch hier bestrebt sein, die Schienen möglichst zu isolieren, wobei kaum zu befürchten sein wird, daß an einzelnen Stellen in der Nähe der Geleise in der Erde eine für Menschen und Tiere gefährliche Spannungsverteilung auftritt.

Eine gute Isolierung der Rohre läßt sich wegen der Kosten nicht immer streng ausführen. Nach v. Gaisberg¹⁾ haben in der üblichen Weise geteerte Rohre der Stromwirkung besser standgehalten als Rohre mit Pechummantelung, obgleich letztere unter gewöhnlichen Verhältnissen sich als wesentlich dauerhafter erwiesen haben. Im allgemeinen wird man jedoch wohl annehmen können, daß die Schutzmittel, die gegen das Rosten der Rohre angewandt werden, auch entsprechenden Schutz gegen die Korrosionsschäden bieten. Hierbei ist die Beschaffenheit der Isoliermasse und die Art des Aufbringens der Isolierschicht wichtig. Die Isoliermasse darf keine schädlichen Stoffe, wie z. B. Ammoniak oder Säuren, enthalten, und muß in heißem Zustande auf das sorgfältig gereinigte Rohr aufgetragen werden. Janke²⁾ empfiehlt, auf den ersten Anstrich noch einen zweiten Anstrich im warmen Zustande aufzutragen. Ehe dieser Anstrich erhärtet ist, ist das Rohr spiralig mit Jutestreifen von etwa 200 mm Breite zu bewickeln. Auf diese Jutebandage, die fest auf dem Teer klebt, werden noch zwei warme Teeranstriche aufgetragen. Dies giebt einen etwa 5 mm dicken festen, sicher haftenden Überzug.

Der Ausbreitungswiderstand in der Erde und demnach auch der Übergangswiderstand vom Geleis zur Rohrleitung verringert sich mit der Annäherung der Geleise an die Rohre. Es ist daher die Gesamtanordnung so zu treffen, daß die Schienen den Rohren nicht zu nahe kommen, da andernfalls eine große Stromdichte an den Rohren auftreten kann. Es gilt dies besonders für die Gefahrbezirke, also für die Bezirke in der Nähe des Speisepunktes, in denen eine große Feldstärke an den Rohren gefährlich werden kann.

¹⁾ E. T. Z. 1903, S. 492.

²⁾ Vgl. Verhandlungen des Vereins zur Förderung des Gewerbetreibenden. Bericht vom 4. Januar 1904.

Nach den Leitsätzen des V. D. E. sind die Speisepunkte der Geleise, an denen auch die grösste Stromdichte in den Schienen herrscht, möglichst entfernt von den zu schützenden Rohren, insbesondere von Kreuzungsstellen und an das Geleis heranreichenden Rohrausläufern anzulegen. Ist eine grössere Annäherung der Geleise an die Rohre nicht zu umgehen, so ist eine isolierende Zwischenschicht zu verwenden, falls sich die gefährdeten Rohrstücke nicht durch isolierende Zwischenstücke vom Rohrnetze isolieren lassen.

Gefährdet sind die Rohre an den Stromaustrittsstellen. Es ist daher die Erdung der Rohre für die gefährdeten Bezirke vorgeschlagen worden. Bei guter Erdung treten die in die Rohre eingetretenen Ströme hauptsächlich an den geerdeten Stellen durch die Erdungsleitungen in die Erdplatten, und aus diesen in die Erde. Die Korrosionen würden in diesem Falle von den Rohren auf die Erdplatten übertragen. Für die Erdung könnten auch alte aufser Dienst gestellte Rohre verwandt werden. Diese Erdung schützt nun die Rohrleitungen nur, soweit sie metallisch gut leitend verbunden sind, setzt demnach gut leitende Verbindung an den Stofsstellen voraus. Die Rohrströme werden durch die Anordnung verstärkt. Wird bei der Anordnung noch für gut leitende Verbindung an den Stofsstellen der Rohre gesorgt, so werden auch die gesamten Erdströme vermehrt und dadurch die nicht geerdeten Metallmassen stärker gefährdet. Nach Versuchen in Boston¹⁾ soll die Erdung die Potentialverteilung in der Erde wenig ändern. Wenn ohne Erdung eine grössere Spannung zwischen Rohr und umgebender Erde vorhanden ist, die Rohre also sehr gefährdet sind, wird durch gute Erdung diese Spannung auf Null gebracht, wodurch die Spannungsverteilung geändert wird, was unter Umständen Gefahren für Rohre in anderen Bezirken hervorbringen kann. Es kann daher die Erdung der Rohre, abgesehen von örtlichen Schwierigkeiten, nur in vereinzelt Fällen von Vorteil sein.

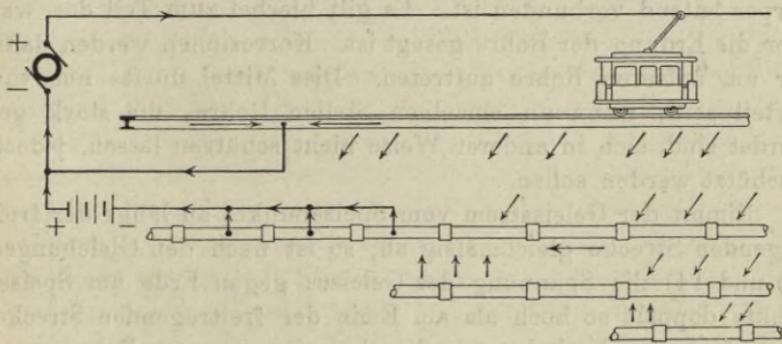
Der gleiche Zweck, nämlich die in die Rohre eingedrungenen Ströme auf metallisch leitendem Wege, also ungefährlich abzuführen, wird verfolgt bei Verbindung der Rohre mit den Schienen oder dem negativen Pole des Generators in den

¹⁾ Bell-Rasch, Stromverteilung für elektr. Bahnen 1898, S. 40.

Gefahrbezirken. Eine derartige Anordnung wirkt bedeutend stärker¹⁾ als die Erdung der Rohre, da bei der direkten Verbindung der Rohre mit den Schienen oder mit dem negativen Pole der Maschine der Widerstand zwischen Rohr und Schiene beliebig klein gemacht werden kann. Der Schutz erstreckt sich auf die Rohrleitung nur so weit, als die Rohre unter sich gut leitend verbunden sind. Durch die Anordnung werden die Erdströme durch Verbesserung der Überleitungsfähigkeit sehr stark vermehrt, wodurch benachbarte, nicht geschützte Metallteile in der Erde um so stärker gefährdet werden. Es müssen daher sämtliche in den Gefahrbezirken in der Erde vorhandene Metallmassen durch Verbindungen mit den Schienen geschützt werden. Da sich dies in vielen Fällen nicht vollständig erreichen lässt, ist die Verbindung von Rohr und Schienen nicht empfehlenswert. Die Nachteile sind meist gröfser als die Vorteile. Nach den Leitsätzen des V. D. E. dürfen Geleise mit Rohren nicht metallisch verbunden sein.

Ähnliches gilt auch von der Verwendung von Saugdynamos für die Rohrströme²⁾. Wird eine Dynamo oder Batterie zwischen Geleis und Rohr oder zwischen negativen Pol des Generators und Rohr (Fig. 28) geschaltet, so erhält das Rohr

Fig. 28.



niedrigeres Potential als die benachbarte Erde oder die Geleise. Es treten daher aus dem Rohre keine Ströme in die Erde aus. Die Rohrleitung wird so, soweit sie gut leitende metallische Ver-

¹⁾ Vgl. Krohn, E. T. Z. 1901, S. 269.

²⁾ Vgl. Teichmüller, E. T. Z. 1901, S. 436.

bindung hat, geschützt. Es werden aber auch bei dieser Anordnung die Erdströme vermehrt und alle mit den geschützten Rohren nicht gut leitend verbundenen Metallmassen stärker gefährdet. Je größer die Spannung der Batterie oder der Saugdynamo ist, um so mehr Ströme werden auch aus den Schienen in die Rohre gesaugt, um so größer ist die Stromdichte in der Erde. Auch wenn durch geeignete Schenkelbewicklung der Saugdynamos die Saugspannung der Geleisbelastung angepaßt wird, dürfte die Anordnung nur in ausnahmsweisen Fällen zu empfehlen sein.

Es wurde auch vorgeschlagen, die Erdströme abzufangen, ehe sie in die Rohre eindringen können, z. B. durch metallische Leiter, die in der Nähe der Geleise verlegt sind. Durch derartige Leitungen wird der Ausbreitungswiderstand in der Erde vermindert, daher werden die Erdströme vermehrt, von denen ein großer Teil trotz der verlegten Schutzleitungen in die Rohre gelangt. Diese Anordnung bietet daher keinen ausreichenden Schutz. Die Rohre können auch geschützt werden, indem man sie mit einem weiteren Rohre umgiebt. Nach einem Vorschlage von Petri¹⁾ sollen die zu schützenden Metallteile ganz oder teilweise mantelförmig von einem Schutzrohre oder einer Schutzplatte umgeben sein, die mit dem zu schützenden Körper leitend verbunden ist. Es gilt hierbei zum Teil das, was über die Erdung der Rohre gesagt ist. Korrosionen werden dann nur am äußeren Rohre auftreten. Dies Mittel dürfte nur von Vorteil sein, wenn an einzelnen Stellen Rohre, die stark gefährdet sind, sich in anderer Weise nicht schützen lassen, jedoch geschützt werden sollen.

Nimmt der Geleisstrom vom Speisepunkte an längs der freitragenden Strecke gleichmäßig ab, so ist nach den Gleichungen 13) und 14) die Spannung des Geleises gegen Erde am Speisepunkte doppelt so hoch als am Ende der freitragenden Strecke. Dementsprechend sind auch die Spannungen von Rohr gegen Erde in der Nähe des Speisepunktes am höchsten und es ist die Stromdichte an den gefährdeten Stellen, an den Austrittsstellen des Rohres am stärksten. Es wurde daher auch vorgeschlagen, die Polarität zu ändern und die Geleise mit dem positiven

¹⁾ D. R. P. Nr. 126 496.

Pole des Generators zu verbinden. Die höchste auftretende Frefsdichte an den Rohren wird dann auf etwa die Hälfte herabgesetzt. Die Gefährdung der Rohre erstreckt sich jedoch auf ein größeres Gebiet. Die Stärke der gesamten auftretenden Erdströme (Gleichung 16) und der im Rohre fließenden Korrosionsströme (Gleichung 18) ist unabhängig von der Stromrichtung. Die Korrosionsströme und demnach die Korrosionen selbst werden daher durch Umkehr der Stromrichtung nicht vermindert. Sind in der Nähe des Speisepunktes einzelne besonders gefährdete Stellen, die man als Fehlerstellen bezeichnen könnte und an denen eine starke Frefsdichte an den Rohren auftritt, so können durch Änderung der Polarität diese Korrosionsstellen beseitigt werden, ohne daß aber die gesamten Korrosionsströme vermindert werden. Die Stromrichtung ist daher in Bezug auf die elektrolytischen Vorgänge im allgemeinen ohne Belang.

Die allgemein übliche Verbindung der Schienen mit dem negativen Pole des Generators wurde gewählt, weil erfahrungsgemäß die Isolation der negativen Zuleitung sich auf die Dauer nicht so hält, wie die der positiven Zuleitung.

Bietet eine einfache Umkehrung der Polarität im allgemeinen wenig Vorteile, so kann eine periodische Umkehrung der Stromrichtung großen Nutzen bringen. Nach den eingehenden Versuchen von Larsen¹⁾ wird bei täglich einmaliger Umkehrung der Stromrichtung die elektrolytische Wirkung auf den vierten Teil, durch stündliche Stromumkehrung auf ungefähr den dreißigsten Teil vermindert. Es tritt demnach durch Änderung der Stromrichtung eine teilweise Rückbildung der elektrolytisch zersetzten Teile ein, die um so größer ist, je öfter die Stromrichtung gewechselt wird. Auch die Art des elektrolytischen Angriffs ist nach Larsen günstiger bei periodisch wechselnder Stromrichtung als bei dauernd gleich gerichtetem Strome. Während bei letzterem sich tiefe Löcher im Metall zeigten, verteilte sich bei periodischer Stromumkehrung der verbleibende geringere Angriff der Rohre gleichmäßiger über das Rohr. Es ist daher mit Rücksicht auf die elektrolytischen Vorgänge die periodische Umkehr der Stromrichtung in Strafsenbahnbetrieben stets zu empfehlen, wo die Stromumkehr

¹⁾ E. T. Z. 1902, S. 868.

keine technischen Schwierigkeiten bereitet. Selbstverständlich müßte in solchen Fällen dafür gesorgt werden, daß bei Änderung der Stromrichtung z. B. die Polarität für den Anschluß von Bogenlampen nicht geändert wird.

Schon die stündliche Umkehrung des Stromes vermindert die Korrosionen ganz beträchtlich. Bei Verwendung von Wechselstrom, auch solchem von niedriger Periodenzahl, kann die Korrosionsgefahr als vollständig beseitigt gelten. Die Straßenschiensetzen allerdings dem Wechselstrom einen größeren Widerstand entgegen als dem Gleichstrom, und zwar um so mehr, je höher die Frequenz ist. Unter sonst gleichen Verhältnissen sind daher die aus den Schienen austretenden Ströme bei Wechselstrombetrieb stärker als bei Gleichstrombetrieb, doch ist dies ohne Einfluß auf die Korrosionen. Sind für Straßenbahnbetrieb geeignete Wechselstrommotoren geschaffen, so daß die Straßenbahnen in den Städten mit Wechselstrom betrieben werden können, so dürfte damit die Korrosionsgefahr beseitigt sein.

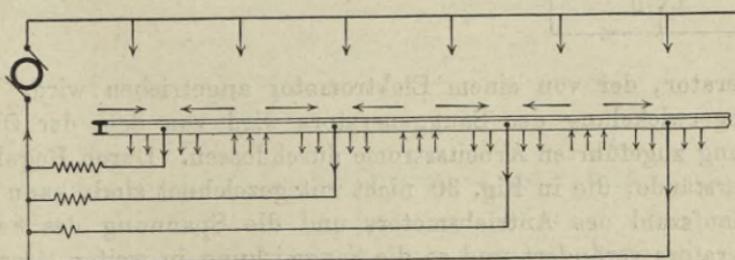
Um die Strombelastung in den Schienen zu vermindern, sind zum Teil Bahnen nach dem Dreileitersysteme ausgeführt worden, bei dem die Geleise den neutralen Mittelleiter bilden. Bei eingleisigen Bahnen wird die Oberleitung in Teilstrecken¹⁾ zerlegt, die voneinander isoliert bleiben und abwechselnd vom Plus- und Minuspol des Generators aus gespeist werden. Bei zweigleisigen Bahnen bilden die beiden Fahrdrähte die Außenleiter des Dreileitersystems. Die beiden Geleise müssen in geringen Abständen durch Querverbindungen gut leitend miteinander verbunden sein, um einen guten Ausgleich der Schienenströme zu erzielen. Eine gute Stromentlastung der Schienen tritt hierbei ein, wenn auf beiden Geleisen gleichviel Wagen in annähernd gleichen Entfernungen vom Schienenspeisepunkte verkehren, wobei der Ausgleich der Geleistrome auf kurzen Entfernungen erfolgen kann. Selbst wenn auf kurzen Strecken größere Stromdichten in den Schienen auftreten, werden doch größere Spannungen in den Schienen vermieden, so daß auch die Entwicklung von Erdströmen vermindert wird. Je nach dem Stande

¹⁾ Vgl. Schiemann, Bau und Betrieb elektrischer Bahnen, 1900, S. 268.

der Wagen ändert sich zum Teil die Richtung der Geleisströme, demnach auch die Richtung der Erdströme, wodurch die Korrosionsgefahr noch wesentlich verringert wird. Die Spannung der Oberleitungen gegen Erde wird bei dem Dreileitersysteme nicht erhöht. Die Spannung der Oberleitungen gegeneinander wird verdoppelt, wodurch die Isolierung erschwert wird.

Die Größe der Erdströme nimmt mit dem Quadrate der Länge der freitragenden Strecke zu. Die Verminderung dieser Länge ist daher von großer Bedeutung. Sie wird verringert, indem die Geleise in Abständen gespeist werden. Um die Schienenspeisung für die verschiedenen Speisepunkte wirksam zu machen, genügt es nicht, in einfacher Weise die Speisepunkte mit der Centrale durch Kupferleitungen zu verbinden. Es müssen vielmehr die Speiseleitungen so gewählt werden, daß die Spannungsverluste von der Generatorklemme bis zu den Speisepunkten nahezu gleich sind. Dies wird erreicht, indem in die Leitungen für die nahen Speisepunkte Widerstände eingeschaltet werden (Fig. 29). Die Leitung zum entferntesten Speisepunkte

Fig. 29.

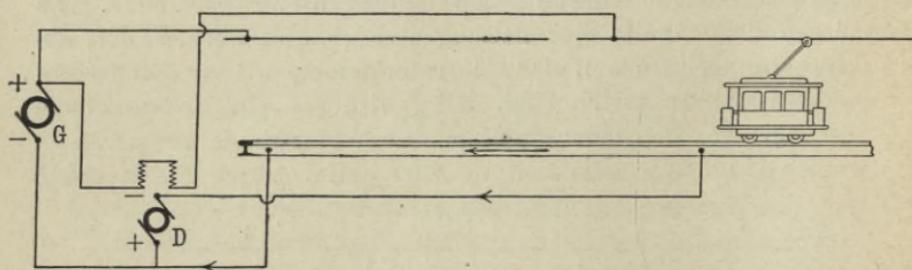


erhält hierbei keinen Widerstand. Sind die Widerstände richtig gewählt, sind also die Spannungsverluste richtig ausgeglichen, so ist zwischen den Speisepunkten keine oder nur geringe Spannung vorhanden. Als freitragende Strecke ist in diesem Falle die halbe Entfernung der Speisepunkte zu rechnen. Durch die Anordnung mehrerer Speisepunkte wird die Länge der freitragenden Strecke verringert und die Schienen werden entlastet. Erfolgt die Schienenspeisung durch Kabel mit Prüfdrähten, so können letztere zur Kontrolle der Spannungen zwischen den einzelnen Speisepunkten benutzt werden. Die Speisung der Oberleitung kann ganz unabhängig von der Anzahl und der Verteilung der

Schienenspeisepunkte erfolgen. Diese Art der Schienenspeisung hat sich als sehr wirksam zur Verminderung der Erdströme erwiesen und hat infolge ihrer Einfachheit weite Verbreitung gefunden. Die Anordnung hat nur die Nachteile, daß in den Widerständen viel Energie nutzlos vernichtet wird und daß bei den dauernd wechselnden Belastungen in den einzelnen gespeisten Bezirken die Schienenspeisung sich nicht selbstthätig nach der Belastung regelt.

Die letzteren Nachteile vermeidet die Kappsche Anordnung der Schienenspeisung¹⁾. Diese ist aus Fig. 30 ersichtlich. *G* ist der Generator des Kraftwerkes, *D* ein Saug-

Fig. 30.



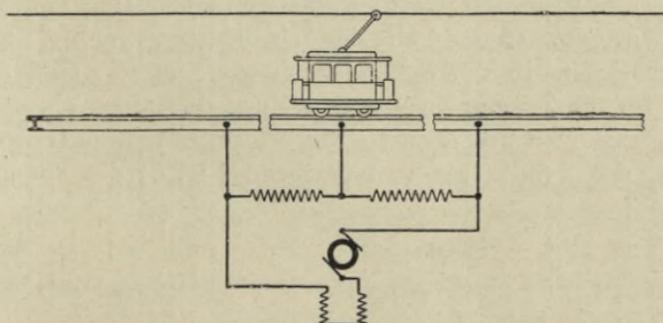
generator, der von einem Elektromotor angetrieben wird. Die Erregerwicklung des Sauggenerators wird von dem der Oberleitung zugeführten Arbeitsstrom durchflossen. Durch Regulierwiderstände, die in Fig. 30 nicht mit gezeichnet sind, kann die Umlaufzahl des Antriebsmotors und die Spannung des Sauggenerators verändert und so die Saugwirkung in weiten Grenzen geregelt werden. In Bristol wurden durch eine derartige Anordnung die Spannungsverluste in den Schienen, die ohne die Einrichtung die unzulässige Höhe von etwa 10 Volt erreicht hätten, auf ungefähr $2\frac{1}{2}$ Volt heruntergedrückt. Die Anordnung wirkt, einmal für gegebene Verhältnisse richtig eingestellt, bei allen Belastungen selbstthätig, da die Saugspannung, geringe Sättigung des Sauggenerators vorausgesetzt, sich der Belastung entsprechend ändert. Bei Verwendung eines Sauggenerators für

¹⁾ D. R.-P. Nr. 88 275. E. T. Z. 1896, S. 43. Rasch, E. T. Z. 1896, S. 34. Teichmüller, E. T. Z. 1900, S. 436. Krohn, E. T. Z. 1901, S. 269.

ausgedehntere Bezirke mit mehreren Fahrdrachtspeisepunkten wird die Erregerwicklung so eingerichtet, daß sie von dem gemeinsamen Strome mehrerer Fahrdrachtspeiseleitungen durchflossen werden kann. Werden in mehrere Schienenspeiseleitungen Sauggeneratoren eingeschaltet, so hat man es durch Regelung der Saugwirkung in den einzelnen Leitungen in der Hand, die Spannungen zwischen den einzelnen Speisepunkten beliebig klein zu halten. In Glasgow sind in den verschiedenen Unterstationen über ein Dutzend Kappscher Sauggeneratoren¹⁾ für je 1000 Amp. aufgestellt, durch die die Spannungsunterschiede zwischen den verschiedenen Schienenspeisepunkten unter 1 Volt gehalten werden können.

In einzelnen Fällen, z. B. wenn es sich um eine wenig verzweigte Bahn von ziemlicher Länge, etwa um eine Überlandbahn handelt, liegt nicht die Notwendigkeit vor, die Spannungen in den Schienen so klein zu halten, wie bei verzweigten Stadtnetzen. Gisbert Kapp hat auch für derartige Bahnen eine Anordnung²⁾ angegeben, um große Spannungen in den Schienen zu vermeiden und so die Erdströme zu vermindern. Die Anordnung ist aus Fig. 31 zu ersehen. Die elektrisch leitende Ver-

Fig. 31.



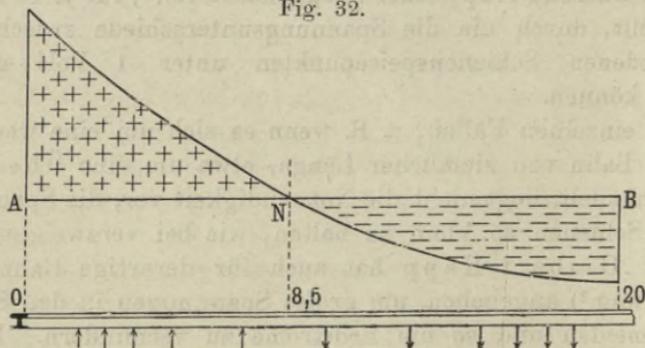
bindung der Schienen wird an zwei nicht weit voneinander entfernten Stellen auf der Strecke unterbrochen. Die elektrisch getrennten Geleise werden durch eine Reihenschlussmaschine überbrückt. Dieser Generator, der von einem Elektromotor an-

¹⁾ E. T. Z. 1902, S. 19.

²⁾ E. T. Z. 1902, S. 19. D. R.-P. Nr. 125 762. Ziehl, E. T. Z. 1902, S. 145.

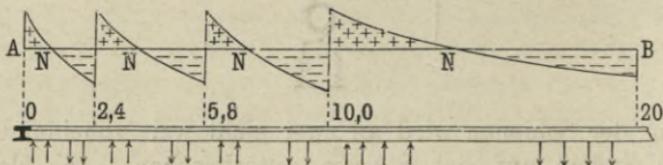
getrieben wird, erzeugt eine Zusatzspannung, die den Spannungsverlust der Geleise ausgleicht. Um zu verhindern, daß das zwischenliegende Schienenstück vollkommen von dem übrigen Geleise isoliert ist, so daß ein auf ihm zufällig stehen bleibender Wagen nicht anfahren könnte, kann durch zwischengeschaltete eventuell abschaltbare Widerstände dafür gesorgt werden, daß der Wagen in dem Zwischenstücke anfahren kann. Diese Anordnung kann wiederholt in Abständen in die Geleise eingebaut

Fig. 32.



werden. Die Generatoren können in kleinen Häuschen in der Nähe des Geleises aufgestellt werden und bedürfen keiner ständigen Wartung. In der Nähe der Schienenspeisepunkte, an denen die Stromdichte in den Schienen am größten ist, sind die Abstände für die Zusatzgeneratoren kleiner zu wählen als am Ende der freitragenden Strecke. In Fig. 32 sind für eine freitragende Strecke AB von 20 km (entsprechend Fig. 6) die Spannungen

Fig. 33.



der Erde gegen die Geleise dargestellt, wenn keine Zusatzgeneratoren eingeschaltet sind. In der Nähe des Speisepunktes A ist die Erde gegenüber den Geleisen positiv (Gefahrbezirk), in der Nähe des Endpunktes B der freitragenden Strecke negativ (Schutzbezirk). Die schraffierte Fläche über NA stellt die Gefährdung

kontinuierlich leitend verbundener Rohrleitungen dar. Werden in Entfernung von 2,4, von 5,8 und 10,0 km als Vorspann Kappsche Zusatzgeneratoren eingeschaltet, so ändern sich die Spannungen der Erde gegen die Geleise entsprechend Fig. 33. Statt des einen größeren Gefahrgebietes entstehen vier kleinere Gefahrgebiete von geringerer Ausdehnung und geringeren Spannungen der Erde gegen die Geleise. Die Erdströme werden daher verringert und die Korrosionsgefahr ist vermindert.

Sonstige Störungen der vagabundierenden Ströme.

Im vorstehenden wurde nur die Korrosionsgefahr der vagabundierenden Ströme eingehend behandelt, da gegenüber dieser Gefährdung die sonstigen Störungen zurücktreten. Die in die Rohrleitungen eindringenden Ströme erfordern auch eine schärfere Kontrolle, da die Folgen nicht unmittelbar zu Tage treten, sondern sich erst nach längerer Zeit bemerkbar machen. Die Störungen, die die vagabundierenden Ströme an physikalischen Apparaten¹⁾, an Signalapparaten, im Telephon- und Telegraphenbetriebe verursachen, machen sich hingegen sofort unangenehm bemerkbar.

Durch die vagabundierenden Ströme werden magnetische Felder erzeugt, die die Komponenten des Erdmagnetismus verändern. Die Erdströme können sich weithin verzweigen und daher Störungen noch in großen Entfernungen hervorrufen. Werden absichtlich starke Erdströme erzeugt, so können diese Ströme bis zu Entfernungen von mehreren Kilometern wahrgenommen werden²⁾. Vagabundierende Ströme der elektrischen Bahn konnte Strecker³⁾ auf rund 3 km wahrnehmen, während er unter Verwendung unterbrochenen Stromes bei künstlich auf einer Länge von 3 km erzeugten Erdströmen von 14 und 19 Amp. verzweigte Ströme bis rund 17 km Entfernung noch nachweisen konnte. Die magnetischen Störungen hören mit Betriebsschluss der Bahnen nicht sofort auf. Die Magnetnadel kommt nach Einstellung des

¹⁾ Eingehenderes über die Störungen der physikalischen Institute in den Verhandlungen des Elektrotechnischen Vereins E. T. Z. 1895, S. 417 und 443.

²⁾ Vgl. Rathenau, Telegraphie ohne metallische Leitung E. T. Z. 1894, S. 616.

³⁾ E. T. Z. 1896, S. 106.

Betriebes erst allmählich in ihre anfängliche Ruhelage zurück¹⁾, vermutlich infolge des allmählichen Verschwindens des Magnetismus der magnetisierten Eisenteile und infolge der Polarisationsströme.

Um die Beeinflussung magnetometrischer Messungen festzustellen, machte Edler²⁾ auf Veranlassung von v. Bezold³⁾ mit hochempfindlichen Apparaten von Eschenhagen an der Spandauer elektrischen Bahn eingehende Messungen bis zur Entfernung von 7,48 km. Die Störungen der Horizontalkraft des Erdmagnetismus seitlich von der Bahn waren hiernach annähernd umgekehrt proportional der Entfernung von der Bahn. Die Störungen der vertikalen Komponente nahmen mit der Entfernung viel rascher ab. Die Störungen innerhalb des Beobachtungsbezirktes waren noch so, daß genaueste maßgebende magnetometrische Messungen nicht mehr vorgenommen werden konnten. Es stellte daher v. Bezold die Forderung auf, daß für magnetische Observatorien, in denen grundlegende Messungen dauernd angestellt werden müssen, innerhalb eines Schutzkreises von 15 km Entfernung sich keine elektrischen Gleichstrombahnen mit Schienenrückleitung befinden sollen.

Bahnen mit oberirdisch geführter Hin- und Rückleitung geben nur geringe Fernwirkung, so daß Störungen in Entfernung über 1 km nicht mehr bemerkbar sind.

Für die physikalisch-technische Reichsanstalt hatte Präsident Prof. Dr. Kohlrausch die Forderung gestellt, daß die Störungen der Instrumente $\frac{1}{10}$ Bogenminute nicht überschreiten sollten.

Für physikalische Institute, in denen nicht dauernd exakte grundlegende magnetometrische Versuche vorgenommen werden und in denen mit geschützten Apparaten gearbeitet werden kann, können die Entfernungen bedeutend verringert werden.

Dies ist ganz besonders dann der Fall, wenn geschützte Instrumente verwandt werden können. Bei Galvanometern nach d'Arsonval mit feststehenden permanenten Magneten wird für die Richtkraft nicht der Erdmagnetismus benutzt. Diese Instrumente sind daher gegen äußere magnetische Störungen un-

¹⁾ Strecker, E. T. Z. 1895, S. 424.

²⁾ E. T. Z. 1900, S. 193.

³⁾ Vgl. E. T. Z. 1900, S. 160.

empfindlich. Sie können daher sogar unmittelbar auf der Strecke in großer Nähe elektrischer Bahnen aufgestellt werden, um sie z. B. bei der Isolationsprüfung von Kabeln zu benutzen. Auch Galvanometer, bei denen die Richtkraft des Erdmagnetismus benutzt wird, können gegen die Störungen vagabundierender Ströme geschützt werden. Bei den Panzergalvanometern von du Bois und Rubens¹⁾ wird durch Panzerung eine magnetische Schirmwirkung erzielt. Ungepanzerte astatiche Galvanometer können durch passend in der Nähe des oberen Magneten angeordnete Eisenbündel geschützt werden.

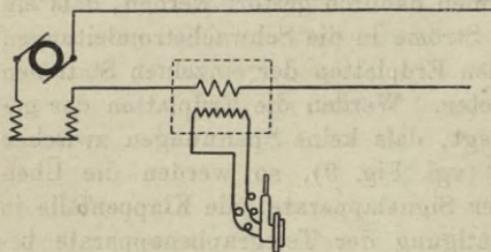
Telephon-, Telegraphen- und Signalanlagen mit Stromrückleitung durch die Erde können dadurch gestört werden, daß ein Teil der vagabundierenden Ströme in die Schwachstromleitungen eindringt, falls zwischen den Erdplatten der einzelnen Stationen größere Spannungen auftreten. Werden die Erdplatten der getrennten Stationen so verlegt, daß keine Spannungen zwischen den Erdplatten auftreten (vgl. Fig. 9), so werden die Übelstände, das Ansprechen der Signalapparate, die Klappenfälle in Telephonämtern, die Bethätigung der Telegraphenapparate beseitigt. In vielen Fällen ist dies nicht möglich. Es müssen dann für Hin- und Rückleitung besondere Drähte verwendet werden.

Telephone sind bekanntlich hochempfindliche Stromanzeiger für Wechselstrom. Das Eindringen auch geringer Bahnströme in die Telephone macht sich daher unangenehm bemerkbar. Es ist nicht der Gleichstrom, der die Telephone stört, obwohl dieser in Bahnbetrieben dauernd schwankt, es sind vielmehr die Strompulsationen von geringer Stärke, aber hoher Frequenz, die im Gleichstrom enthalten sind. Diese Strompulsationen rühren von dem wechselnden Kurzschluß einzelner Wicklungsabteilungen durch die Bürsten am Kommutator des Generators und der Motoren, ferner von dem wechselnden magnetischen Widerstande des umlaufenden Nutenankers, von Vibrationen der Bürsten, Bürstenfeuer u. s. w. her. Der Arbeitsstrom ist demnach kein vollkommen reiner Gleichstrom. Er kann zerlegt werden in einen reinen Gleichstrom und einen sich darüber lagernden Wechselstrom. Nur der letztere bringt Telephonstörungen hervor. Je nach der Konstruktion der Generatoren und Motoren sind die

¹⁾ Zeitschrift für Instrumentenkunde 1900, S. 65.

Strompulsationen und dementsprechend die durch sie veranlafsten Telephongeräusche verschieden stark. Durch die Selbstinduktion der Leitungen werden die Pulsationen geschwächt, durch deren Kapazität verstärkt. Serienmotoren geben wegen der drosselnden Wirkung der Erregerwicklung weniger Störungen als Nebenschlussmotoren. Die durch den Generator oder Motor veranlafsten Strompulsationen kann man am Generator oder Motor bezw. im Straßenbahnwagen unmittelbar nachweisen, wenn in die Zuleitung zum Motor ein kleiner Stromtransformator (Fig. 34) mit wenig primären Windungen (starken Drahtes) und vielen

Fig. 34.



sekundären Windungen (schwachen Drahtes) eingeschaltet wird. An die Klemmen der sekundären Wickelung wird ein Telephon angeschlossen. Das Telephon spricht dann auf die Strompulsationen an.

Den Stromtransformator

kann man sich in einfacher Weise herstellen, indem man um ein Bündel von einseitig isolierten Eisenblechen oder dünnem Eisendraht eine gröfsere Anzahl Windungen isolierten dünnen Drahtes und hiervon gut isoliert noch wenige Windungen starken isolierten Drahtes wickelt.

Bei Verwendung von Pufferbatterien in der Centrale werden die von den Generatoren verursachten Strompulsationen zum grofsen Teil von der Batterie aufgenommen und so für die nach aufsen geführten Ströme unschädlich gemacht. Es sucht die Pufferbatterie aber auch die Strompulsationen, die von den Motoren auf der Strecke verursacht werden, aufzunehmen. Die Pufferbatterien verstärken demnach die von den Motoren veranlafsten Pulsationen. Ähnliches trifft auch für Akkumulatorenbahnen zu, bei denen die Zellen während der Fahrt von der Oberleitung aus geladen werden. Die Batterie eines Wagens nimmt die Pulsationen der Motoren dieses Wagens auf, verstärkt aber die im Stromkreise aufserhalb des Wagens vorhandenen Pulsationen. Besitzt jeder Wagen eine parallel zu den Motoren geschaltete Batterie, so werden alle von den Motoren selbst ver-

anlaßten Strompulsationen nach außen unschädlich gemacht. Es treten in solchem Falle im Arbeitsstrom in den Außenleitungen nur Pulsationen auf, die von unsicherem Kontakt an den Rädern oder am Stromabgeber, und den dadurch veranlaßten Ausgleichsströmen zwischen den Batterien herrühren. Diese Pulsationen können unter Umständen in den Telephonen unangenehmer sich bemerkbar machen als Strompulsationen, die von den Motoren herrühren.

Die Strompulsationen stören die Telephone nicht allein dadurch, daß Teile des Arbeitsstromes durch die Erdplatten direkt in die Telephonleitungen gelangen, es kommen vielmehr noch die Induktions- und die Kapazitätswirkungen zwischen Arbeitsleitung und Telephonleitung in Betracht. Die letzteren Wirkungen werden vielfach stärker sein als die der Erdströme, da von den geringen Erdströmen, die in Telephonleitungen eindringen, wieder nur ein geringer Betrag, nämlich nur der über den Gleichstrom gelagerte Wechselstrom störend wirkt. Es kommt jedoch der Umstand hinzu, daß die Geleise dem Wechselstrom einen viel größeren Widerstand entgegensetzen als dem Gleichstrom. Es entweicht daher aus den Geleisen in die Erde ein höherer Prozentsatz des Wechselstromes als des Gleichstromes. Es sind daher die Erdströme prozentual wechselstromreicher als die Ströme in den Arbeitsleitungen.

Sind die Telephonleitungen durch die Bahnströme gestört, so hört man in den an die gestörten Leitungen angeschlossenen Telephonen deutlich, ob die störenden Straßsenbahnwagen anfahren, fahren oder halten. Sind im wesentlichen die direkt durch die Erdplatten in die Telephonleitungen eindringenden Ströme an den Störungen schuld, so können die Störungen durch Verlegen der Erdplatten beseitigt werden. Das Eindringen der Erdströme in die Telephonleitungen wird verringert oder ganz verhindert, wenn die örtlichen Verhältnisse es gestatten, die Erdplatten in neutralen Bezirken oder in solchen Bezirken zu verlegen, daß zwischen Erdplatten keine Spannung auftritt. Dieses Mittel ist bei dem fortwährend schwankenden Betriebe aber nicht unbedingt zuverlässig. Besser bewährt hat es sich, die Strompulsationen durch Drosselpulen von geeigneten Abmessungen abzuschwächen. Diese Drosselpulen sind ähnlich den Transformatoren hergestellt, indem um einen geblättern Eisenkern von

passenden Abmessungen eine grössere Anzahl von Drahtwindungen gewickelt wird. Es genügt aber nicht, nur an der Centrale in die Speiseleitung eine Drosselspule einzuschalten, da ein Teil der Wechselströme nur zwischen den einzelnen Motoren auf der Strecke verläuft, ohne bis zur Centrale zu gelangen. Es ist daher günstiger, jeden Wagen mit einer Drosselspule auszurüsten, oder auf der Strecke in geeigneten Abständen Drosselspulen in die Arbeitsleitungen einzuschalten. Ein Nachteil der Drosselspulen ist der dauernde Energieverbrauch und bei Einbau in die Wagen deren stärkere Belastung. Werden noch Flüssigkeitskondensatoren, z. B. Aluminiumkondensatoren, parallel zu den Motoren in den Wagen angeschlossen, so kommt man mit verhältnismässig kleinen Drosselspulen aus. Vollständig beseitigt werden die Telephonstörungen, wenn für die Leitungen metallische Hin- und Rückleitung, nötigenfalls verdrillt, gewählt werden.

Bei Wechselstrombahnen, bei denen Wechselströme von sehr niedriger Frequenz gewählt sind, treten keine Telephonstörungen auf, wenn die Kurvenform rein sinusförmig ist, also keine höheren harmonischen auftreten. Da letztere aber praktisch wohl stets vorhanden sind, so stören auch Wechselströme von niedriger Frequenz die Telephonleitungen, wenn die Erde zur Stromrückleitung verwandt wird.

Schluss.

Werden die von der Erde nicht isolierten Schienen zur Stromrückleitung benutzt, so ist es nicht möglich, Stromentweichungen in die Erde völlig zu vermeiden. Sind, wie dies in der Regel der Fall ist, auch die Rohre ohne vollkommene Isolierung in der Erde verlegt, so ist auch das Eindringen von Strömen in die Rohre nicht zu vermeiden. Vermieden werden schädliche Ströme nur, wenn Hin- und Rückleitung isoliert geführt werden, wenn z. B. innerhalb der Städte von unterirdisch in Schlitzkanälen isoliert verlegten Leitungen und in Aufsenstrecken von isolierten Doppelleitungen der Strom abgenommen wird. Ist die vollkommen isolierte Leitungsführung nicht durchführbar, so können in den Städten mit verzweigten Rohrnetzen Vorkehrungen getroffen werden, um die Erdströme auf ein ungefährliches Maass zu bringen.

Die anfänglich von einzelnen Seiten gehegten Befürchtungen, daß bei der Rückleitung des Stromes durch die Schienen durch elektrolytische Zersetzungen von Gas- und Wasserrohren große materielle Schäden eintreten würden, haben sich glücklicherweise nicht erfüllt. Eine Umfrage bei den Besitzern von elektrischen Bahnen und von städtischen Gas- und Wasserwerken¹⁾, die im Jahre 1899 vom Elektrotechnischen Verein mit Unterstützung des Vereins Deutscher Straßen- und Kleinbahnverwaltungen gehalten wurde, ergab, daß von rund 90 deutschen Städten, die elektrische Bahnen besaßen, nur in zwei oder drei Fällen Zerstörungen in der Erde infolge vagabundierender Ströme bekannt wurden. Diese Korrosionen traten an Stellen auf, wo die Stromdichte sehr groß war. Es war möglich, durch Anordnung der erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen auch in diesen Fällen die Korrosionsgefahr zu beseitigen²⁾. Ob und welche Abwehrmittel in den einzelnen Fällen anzuwenden sind, muß nach eingehender Untersuchung der örtlichen Verhältnisse von sachkundiger Seite entschieden werden, um den Interessen der Bahnbesitzer und Rohrbesitzer bezw. dem Elektrotechniker und dem Gas- und Wasserfachmann gerecht zu werden. Beide müssen hierbei Hand in Hand gehen, um in objektiver Prüfung die bestmöglichen Abwehrmittel anzuwenden, da beiden Mittel zur Verfügung stehen, die Korrosionsgefahr zu vermindern oder zu beseitigen.

¹⁾ West, E. T. Z. 1900, S. 706.

²⁾ Vgl. v. Gaisberg, Rohrzerstörung beim Ausbau des Hamburger Netzes und dagegen getroffene Maßnahmen, E. T. Z. 1903, S. 492.



Zusammenstellung der verwendeten Bezeichnungen.

- W W_S W_R Widerstände von Schienen und Rohren pro Längeneinheit.
- w Übergangswiderstände und Erdwiderstände pro Längeneinheit.
- w_u Übergangswiderstand von Schienen zum benachbarten Erdboden ohne Ausbreitungswiderstand.
- w_e Ausbreitungswiderstand in der Erde.
- L Länge der freitragenden Strecke (oder halbe Entfernung der Schienenspeisepunkte).
- l Veränderlicher Teil der freitragenden Strecke vom Speisepunkte aus gemessen.
- x Veränderlicher Teil der freitragenden Strecke von deren Endpunkte aus gemessen.
- d Entfernung des neutralen Punktes vom Endpunkte der freitragenden Strecke.
- δ Senkrechter Abstand vom Geleise.
- E Spannungen in den Geleisen oder Rohren.
- E_l Spannungsverlust auf der Strecke l .
- E_x Spannungsverlust auf der Strecke x .
- e Spannungen von Geleis oder Rohr gegen Erde.
- e_l e_x Spannungen von Geleis oder Rohr gegen Erde in der Entfernung l vom Speisepunkte oder x vom Endpunkte der freitragenden Strecke.
- J Strom in den Schienen und Rohren.
- i i_0 i_l i_x Erdstrom, am Speisepunkte, in Entfernung l , in Entfernung x .
- V v Potentialwerte in Geleisen, Rohren und Erde.

Abkürzungen.

- V. D. E. Verband Deutscher Elektrotechniker.
 E. T. Z. Elektrotechnische Zeitschrift.
 D. R. - P. Deutsches Reichspatent.

REGISTER.

A.

- Abwehrmittel 62.
- Äquipotentialkurven 27.
- Akkumulatorenbahnen (Telephonstörungen) 78.
- Annäherung der Geleise an Rohrleitungen 65.
- Apparat zum Prüfen der Stofsverbindungen 57.
- Ausbreitungswiderstand 3, 23.
- Ausläufer der Geleise 11.

B.

- Bodenbeschaffenheit (Einfluß auf Korrosionen) 41.

C.

- Chemische Beschaffenheit des Erdbodens 41.

D.

- Differentialmethode zur Bestimmung der Stromentweichung 49.
- Differentialmethode zum Prüfen der Stofsverbindungen 57.
- Doppelleitungen 80.
- Dreileiterbahnen 70.
- Drosselspulen in Arbeitsleitungen 79.

E.

- Elektrolyse 39.
- Elektromotorische Kräfte in den Muffen 45.
- Entfernung des neutralen Punktes 16.
- Erden der Geleise 11.
- Erden der Rohre 66.
- Erdmagnetismus 75.
- Erdpotential 26.
- Erdströme 2.
- Erdströme nach Betriebsschluß 44.
- Erdstromdichte an den Schienen 20.
- Erdstromindikator 40.
- Erdübergangswiderstand 22.

F.

- Freitragende Strecke 4.
- Frefsdichte 40.

G.

- Galvanometerstörungen 76.
- Gefahrbezirke 10.
- Geleismessungen 46.
- Geleiswiderstand 21.
- Gufseisen (elektrolyt. Angriff) 41.

H.

- Hydranten (Anschluß bei Messungen an Rohren) 61.

I.

Indikatoren für Erdströme 40.
Isolierung der Geleise und Rohre 63.

K.

Kabelfehler 37.
Kabelgefährdung 45.
Kallmanns Methode zum Messen
der Stromentweichung 49.
Kappscher Sauggenerator 72.
Kappscher Zusatzgenerator 73.
Kompensationsanordnung bei Gal-
vanometern 77.
Konstante Rohrströme 60.
Kontinuität der Rohrleitungen 33.
Korrosionen an Geleisen 45.
Korrosionen an Rohren 40.
Korrosionsströme 32.

L.

Länge der freitragenden Strecke 4.
Leitende Verbindungen an Kreuz-
ungen und Weichen 63.
Leitungen parallel zu den Geleisen
62.
Leitungsfähigkeit der Erde 23.
Leitungsfähigkeit der Rohre 24.
Leitungsfähigkeit der Schienen 21.

M.

Magnetische Störungen 75.
Magnetometrische Messungen 76.
Messungen an Geleisen und Rohren
47.
Muffenwiderstände an Rohrleitun-
gen 24.

N.

Nebenschlußmotoren (Telephonstö-
rungen) 78.
Neutraler Punkt 5.
Neutrale Zone 10.
Normalerde 26.

O.

Oberleitung (Polarität) 69.
Observatorien (Störungen) 76.

P.

Panzer galvanometer 77.
Parabel für Spannungsverlust in
den Geleisen 15.
Periodische Umkehr der Stromrich-
tung 69.
Physikalische Institute 76.
Polarisation 44.
Potentialverteilung in der Erde 25.
Pufferbatterien (Einfluß auf Strom-
pulsationen) 78.

Q.

Querverbindungen der Geleise 62.

R.

Rohrströme 35.
Rohrwiderstand 23.

S.

Sauggenerator für Schienenstrom
72.
Saugvorrichtungen für Rohrströme
67.
Schienenprofil 63.
Schienenspeisung 71.
Schienenstofsverbindungen 57.
Schienenstrom 16.
Schmiedeeisen (Korrosionen) 42.
Schutzanstrich für Rohre 65.
Schutzbezirke 10.
Schutzschicht 39.
Serienmotoren (Telephonstörungen)
78.
Signalapparate (Störungen) 77.
Spannung zwischen Geleis und Erde
17.
Spannung zwischen Geleis und Rohr
47.

Spannungsverlust in den Geleisen
10.
Spannungsverteilung in der Erde
25.
Stofsverbindungen 57.
Stromentweichung 1.
Strompulsationen 77.
Stromtransformator (Nachweis von
Strompulsationen) 78.
Stromverteilung in der Erde 25.

T.

Telegraphenapparate (Störungen)
77.
Telephonstörungen 77.

U.

Übergangswiderstand 3, 22.
Überlandbahnen 64, 73.
Umkehr der Stromrichtung 69.
Ungefährdete Bezirke 31.

V.

Verbindung der Rohre mit den Ge-
leisen 66.
Verlauf der Erdströme 20.
Verminderung der Erdströme 8.
Verstärkungsleitungen 62.

W.

Wechselstrombahnen 70, 80.
Wegübergänge bei Bahnen mit
eigenem Bahnkörper 64.
Widerstände in Schienenspeiselei-
tungen 71.
Widerstandsvermehrung der Rohr-
leitungen 63.
Widerstandsverminderung der Ge-
leise 62.

Z.

Zersetzungsmenge 39.
Zusatzgenerator 73.

Verlag von Friedrich Vieweg & Sohn in Braunschweig.

Prüfungen in elektrischen Zentralen mit Dampfmaschinen- und Gasmotoren-Betrieb.

Von Dr. phil. **E. W. Lehmann-Richter**,

Konsultierender Diplom-Ingenieur für elektrische Licht- und Kraft-Anlagen
in Frankfurt am Main.

Mit 91 eingedruckten Abbildungen. gr. 8. Preis geh. 8 *M.*, geb. 9 *M.*

Abriss der Festigkeitslehre für den Maschinenbau.

Von Professor Dr. Dr.-ing. **F. Reuleaux**,

Geh. Regierungsrat.

Mit 75 eingedruckten Abbildungen. gr. 8. Preis geh. 4 *M.*, geb. 4,80 *M.*

Leerlauf- und Kurzschluss-Versuch in Theorie und Praxis

von **J. L. la Cour**,

Privatdozent an der Großherzoglichen Technischen Hochschule Fridericiana zu Karlsruhe.

Mit 72 eingedruckten Abbildungen. gr. 8. Preis geh. 3,50 *M.*

Dr. J. Frick's

Physikalische Technik

oder Anleitung zu Experimentalvorträgen sowie zur Selbsterstellung
einfacher Demonstrationsapparate

Siebente vollkommen umgearbeitete und stark vermehrte Auflage

von **Dr. Otto Lehmann**,

Professor der Physik an der technischen Hochschule in Karlsruhe.

In zwei Bänden. Lex.-Form. geh.

Erster Band. Erste Abteilung. Mit 2003 in den Text eingedruckten
Abbildungen und einem Bildnis des Verfassers. Preis 16 *M.*, geb. 18 *M.*

Die Telegraphie ohne Draht.

Von **Augusto Righi**, und **Bernhard Dessau**,

o. Professor an der Universität Bologna. Privatdozent an der Universität Bologna.

Mit 258 in den Text eingedruckten Abbildungen. gr. 8. Preis geh. 12 *M.*
geb. in Leinwand 13 *M.*

Verlag von Friedrich Vieweg & Sohn in Braunschweig.

Lehrbuch der Elektrotechnik

mit besonderer Berücksichtigung der
elektrischen Anlagen auf Schiffen.

Herausgegeben von

Dr. Johs. J. C. Müller,

Oberlehrer am Technikum der freien Hansestadt Bremen.

Mit 519 Abbildungen. gr. 8. Preis geh. 6,40 *M.*, geb. in Lnwd. 7 *M.*

Theoretische Grundlagen der Starkstromtechnik.

Von **Charles Proteus Steinmetz.**

Autorisierte deutsche Ausgabe. Übersetzt von **J. Hefty**, Ingenieur.

Mit 143 Abbildungen. gr. 8. Preis geh. 9 *M.*, geb. 10 *M.*

Die Lehre von der Elektrizität

von **Gustav Wiedemann.**

Zweite umgearbeitete und vermehrte Auflage in fünf Bänden.

Zugleich als vierte Auflage der Lehre vom Galvanismus und
Elektromagnetismus.

Erster Band. Mit 298 Holzstichen und 2 Tafeln. gr. 8. Preis geh. 26 *M.*,

geb. 28 *M.* — **Zweiter Band.** Mit 163 Holzstichen und 1 Tafel. gr. 8.

Preis geh. 28 *M.*, geb. 30 *M.* — **Dritter Band.** Mit 320 Holzstichen.

gr. 8. Preis geh. 28 *M.*, geb. 30 *M.* — **Vierter Band.** Mit 269 Holzstichen.

gr. 8. Preis geh. 32 *M.*, geb. 34 *M.*

(Fünfter Band — Schluss des Werkes — in Vorbereitung.)

Die internationalen absoluten Maße

insbesondere die

electrischen Maße

für Studierende der Electrotechnik in Theorie und Anwendung dargestellt und durch Beispiele erläutert von

Dr. A. von Waltenhofen,

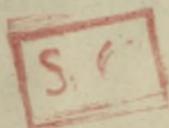
K. K. Hofrath und emerit. Professor an der Universität in Innsbruck und an den
technischen Hochschulen in Prag und Wien etc.

Dritte zugleich als Einleitung in die Electrotechnik bearbeitete Auflage.

Mit 42 eingedruckten Figuren. gr. 8. Preis geh. 8 *M.*, geb. 9 *M.*

3600

S-96



WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA
Biblioteka Politechniki Krakowskiej



II-351675

L.

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000294738