

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 9 (1918)
Heft: 7

Artikel: Die Korrosion durch Erdströme elektrischer Bahnen : erster Bericht der gemeinsamen Kommission des Schweizerischen Gas- und Wasserfachmänner-Vereins, des Verbandes Schweizerischer Sekundärbahnen und des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins für die ...
Autor: [s.n.]
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059607>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.05.2025

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

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

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

Generalsekretariat

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

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

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.,
Hirschengraben 80/82 Zürich 1 Telephon Hottingen 36.40

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

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

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

Secrétariat général

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

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

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A.
Hirschengraben 80/82 Zurich 1 Téléphone Hottingen 36.40

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

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

IX. Jahrgang
IX^e Année

Bulletin No. 7

Juli
juillet 1918

Die Korrosion durch Erdströme elektrischer Bahnen.

Erster Bericht

der gemeinsamen Kommission des Schweizerischen Gas- und Wasserfachmänner-Vereins, des Verbandes Schweizerischer Sekundärbahnen und des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins für die Frage der Korrosion.

Bearbeitet vom Generalsekretariat des S. E. V.

Einleitung.

Seit mehr als einem Jahrzehnt sind in unserem Lande da und dort Klagen laut geworden über Korrosionen von Gas- und Wasserleitungen, auch etwa von Kabelmänteln, deren Ursache dem Betriebe elektrischer Bahnen zugeschrieben wurde. Besonders in zwei Städten wurden schon früh zahlreiche Schäden gemeldet, die dort seinerzeit zu eingehenden und umfassenden Untersuchungen führten. Auch seither berichten andere schweizerische Wasserwerke und Gaswerke wiederholt von derartigen Schäden. Der *Schweizerische Verein von Gas- und Wasserfachmännern* hat daher durch seine besondere Erdstromkommission unter seinen Mitgliedern eine Umfrage veranstaltet, um ein Bild über den Umfang tatsächlich konstaterter Korrosionserscheinungen zu gewinnen. Die Zusammenfassung der Ergebnisse zeigt, dass im Verhältnis zu der grossen Zahl elektrischer Strassenbahnen in der Schweiz die sicher als solche ermittelten Korrosionserscheinungen durch Bahnströme im ganzen keinen grossen Umfang angenommen haben. Erhebliche Defekte sind nur in einigen grösseren Städten mit dichtem Gleichstrom-Tramverkehr aufgetreten; einzelne der Schäden sind allerdings bedeutend. Die grössere Zahl davon datiert indessen aus den ersten Jahren der betreffenden Strassenbahnbetriebe, aus Zeiten, zu denen die Bedeutung und die Verhältnisse der vagabundierenden Ströme noch nicht voll erkannt und daher wenige oder unzureichende Vorkehrungen dagegen getroffen waren.

Andererseits geht aus den Berichten hervor, dass anscheinend auch heute in einigen unserer städtischen Strassenbahnbetriebe in dieser Beziehung noch nicht alles gemacht

wurde, was getan werden sollte. Im Wunsche, die Frage gründlich, aber möglichst einfach und zweckmässig zu lösen, kamen der *Gas- und Wasserfachmänner-Verein* und der *Verband Schweizerischer Sekundärbahnen* überein, hinsichtlich der Korrosionsfrage im allgemeinen und der erforderlichen Schutzvorkehrungen im besonderen womöglich eine freiwillige Verständigung zu erzielen und diese durch sachliche Feststellung der tatsächlichen Verhältnisse, Vereinbarung beidseitig anerkannter Massnahmen, Aufstellung von Vorschriften und eventuell Schaffung einer eigenen Kontrollinstanz zu bekräftigen.

Auf Einladung der beiden Verbände stellte sich dann, gewissermassen als neutrale Instanz, der *Schweizerische Elektrotechnische Verein* zur gemeinsamen Lösung der Aufgabe zur Verfügung. Die Arbeit wurde einer gemeinsamen Kommission aus Vertretern der drei Verbände überwiesen¹⁾, welche das Generalsekretariat des S. E. V. mit der Durchführung der Studien und Untersuchungen betraute.

Das von der Kommission verfolgte Programm kann wie folgt gekennzeichnet werden:

1. Aufstellung eines abklärenden Berichtes über den heutigen allgemeinen Stand der Korrosionsfrage und der Schutzvorkehrungen in theoretischer und praktischer Beziehung.
2. Zusammenstellung und Auswertung der Betriebserfahrungen, im besonderen in der Schweiz, und Feststellung der sich hieraus ergebenden allgemeinen Folgerungen über notwendige Massnahmen.
3. Messungen in einigen typischen schweizerischen Strassenbahnnetzen zur Ergänzung der bereits vorliegenden Prüfungsergebnisse, nähere Untersuchung charakteristischer Einzelfälle und Bestimmung der darnach erforderlichen Schutzvorkehrungen.
4. Aufstellung von Leitsätzen oder Vorschriften über Bau und Unterhalt der Anlagen zum Zwecke der Verhütung von Korrosionserscheinungen.
5. Organisation einer ständigen Kontrollinstanz, welche die regelmässige Kontrolle der entsprechenden Betriebsmassnahmen durchzuführen hätte.

Die aus den Arbeiten der Kommission erwachsenden Kosten werden von den drei Verbänden getragen.

Der nachfolgende erste Bericht der Kommission umfasst die vom Generalsekretariat der Kommission vorgelegte und von ihr durchberatene Erledigung des ersten Programmpunktes, d. h. den Bericht über den *Stand der Frage der Korrosion an Rohren und Kabeln durch Erdströme elektrischer Bahnen*. Er gliedert sich in zwei Teile. Der erste, mehr theoretische Teil behandelt die Entstehung der korrodierenden Ströme und ihre Grundgesetze; im zweiten Teil wird über die Art und Grösse der praktisch auftretenden Korrosionserscheinungen und ihrer Ursachen berichtet.

Die weiteren Programmpunkte sind von der Kommission zum Teil ebenfalls bereits erledigt, zum Teil stehen sie in Bearbeitung; soweit ihr Gegenstand allgemeineres Interesse beansprucht, wird später hierüber in gleicher Weise wie vorliegend berichtet werden.

I. Entstehung der korrodierenden Ströme und ihre Grundgesetze.

A. Wesen der Korrosion durch Elektrolyse und Begriff der Gefährdung.

Unter den Zerstörungserscheinungen an im Erdboden verlegten Metallteilen wie Röhren, Kabel u. s. w. beschäftigen uns im vorliegenden Bericht vor allem die elektrolytischen Korrosionswirkungen der Streuströme in der Erde. Die Leitfähigkeit des feuchten Erdbodens für den elektrischen Strom ist in der Hauptsache auf seinen Gehalt an Säuren und Salzen zurückzuführen, es treten daher bei Stromleitung hier wie in jedem Elektrolyten die Er-

¹⁾ Der Kommission gehören an: vom Schweizerischen Elektrotechnischen Verein: Prof. J. Landry, Ing. A. Filliol, Generalsekretär Prof. Dr. Wyssling; vom Schweizerischen Gas- und Wasserfachmänner-Verein: Direktor H. Peter-Zürich, Direktor C. Panchaud-Vevey; vom Sekundärbahnen-Verband: Direktor F. Largiadèr-Zürich und Direktor Ch. Rochat-Genève.

scheinungen der Elektrolyse auf. Wir setzen die heutigen Anschauungen über die sich hiebei abspielenden Vorgänge als bekannt voraus und erinnern nur daran, dass an der *Stromeintrittsstelle*¹⁾, der *Anode*, die im Elektrolyt (Erdboden) wandernden negativen Ionen, die an den Säurerest des Salzes gebunden sind, neutralisiert werden, wobei der Säurerest mit dem Elektrolyt oder wenn eine Reaktion mit dem Anodenmetall möglich ist, mit diesem in chemische Verbindung tritt, während an der *Stromaustrittsstelle*, der *Kathode*,

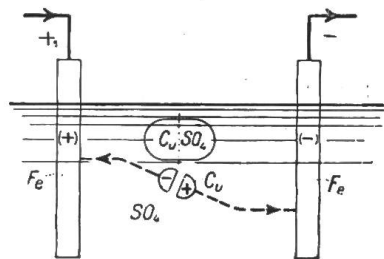


Fig. 1.

das positiv geladene Metall frei wird. Enthält, um ein einfaches Beispiel zu wählen, die Erde Kupfersulfat beigemischt, so wird bei Stromdurchgang der Säurerest (SO_4)⁻ zur Anode wandern und das Metall (Cu)⁺ zur Kathode. Besteht die Anode beispielsweise aus blankem Eisen, so wird durch Einwirkung des bei der Stromeintrittsstelle in die Erde freierwerdenden Säurerestes das Metall zu Eisensulfat (FeSO_4) verwandelt. Diesen chemischen Angriff, d. h. die Auflösung des als Elektrode dienenden Metalls bezeichnen wir mit *Korrosion*. Das Kathodenmetall bleibt chemisch unverändert, abgesehen von der Ablagerung des aus dem Elektrolyt

ausgeschiedenen Metalls. Wir erkennen als charakteristisches Merkmal, dass *von den Elektroden immer die Stromeintrittsstelle in die Erde gefährdet, d. h. der Korrosion ausgesetzt ist*.

Nach Faraday's Gesetz sind die an den beiden Elektroden abgeschiedenen Mengen (Säurerest bzw. Metall) proportional den von den Elektroden in den Elektrolyt (Erde) eingeleiteten bzw. aus diesem weggeführten elektrischen Mengen. Geht daher durch die Stromeintrittsstelle während t Sekunden die Stromstärke i , so ist die Menge des freierwerdenden Säurerests und dementsprechend die Masse des zur Salzbildung aufgelösten Anodenmetalls

$$M = \alpha \cdot i \cdot t$$

Der Faktor α wird als das *elektrochemische Äquivalent* des Metalls bezeichnet; sein Wert ist bekanntlich proportional dem Atomgewicht und umgekehrt proportional der Valenz.

Das Gewicht der korrodierten Elektrodenmasse bildet aber noch kein eindeutiges Mass für die Gefährdung. Wir nehmen an, dass der im Erdboden fließende elektrische Strom aus dem als *Anode* wirkenden Metall (z. B. Rohr) über die Fläche F austrete. Die Korrosionserscheinung wird sich dann über das Bereich der Oberfläche F erstrecken. Das Volumen der korrodierten Metallmasse ergibt sich nach Faraday's Gesetz, wenn γ das spezifische Gewicht der letzteren bedeutet, zu

$$V = \frac{\alpha \cdot i \cdot t}{\gamma}$$

Als *Grad der Gefährdung durch Korrosion* eines im Erdboden sich befindlichen Metallteils (z. B. Rohrleitung) bezeichnet *Besig*²⁾ die *zerstörte Schichtdicke*. Dieses Mass ist offenbar überall da am Platz, wo durch die Korrosion hauptsächlich die mechanische Festigkeit des Metallteils gefährdet ist. Es ist einleuchtend, dass bei ein und derselben korrodierten Metallmasse $M = \alpha \cdot i \cdot t$ deren Ausbreitung über ein grosses Korrosionsbereich und dementsprechend geringer Schichtdicke die Festigkeit weniger gefährdet, als im Fall kleinen Korrosionsbereichs und grosser Schichtdicke. Bezeichnet man mit δ die mittlere zerstörte Schichtdicke im Bereich F der Korrosion, so wird:

$$\delta = \frac{V}{F} = \frac{\alpha \cdot i \cdot t}{F \cdot \gamma} = \frac{\alpha \cdot j \cdot t}{\gamma}$$

wenn j die spezifische, auf die Flächeneinheit bezogene Stromstärke (*Stromdichte*) bedeutet.

¹⁾ Wir beziehen im Nachfolgenden die Bezeichnungen Stromeintritt- bzw. Stromaustrittsstelle immer auf die *Erde* als Stromleiter.

²⁾ Erdströme und Rohrleitungen, von F. Besig. Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung No. 3 und ff. 1913.

Die Gefährdung eines im Erdboden als Anode wirkenden Metallteils im Sinne obiger Definition ist also nicht durch die gesamte Stromstärke i bedingt, die in den Erdboden eintritt, sondern durch den Betrag der spezifischen, d. h. pro Flächeneinheit aus der Anode austretenden Stromstärke j .

Diese Ueberlegung hat für die Erscheinungen der Korrosion an Rohrleitungen und Kabeln durch Erdströme elektrischer Bahnen besondere Bedeutung, weil fast in allen praktischen Fällen das Korrosionsbereich, in welchem der Strom in die Erde übertritt, keine über das Bereich konstante spezifische Stromstärke aufweist, die Gefährdung der Metallteile daher in diesem Bereich an einer bestimmten Stelle einen höchsten Wert aufweisen wird, der durch die maximale spezifische Stromdichte gekennzeichnet ist. Für die gegebenen Verhältnisse eines der Korrosion ausgesetzten Metallteils hängt weiter die Gefährdung gemäss dem Faradayschen Gesetz von der Natur des verwendeten Metalls ab. Siehe hierüber die Zusammenstellung auf Seite 146.

B. Entstehung der korrodierenden Ströme.

Die Ausbildung praktisch gefährlicher Erdströme bezüglich der Korrosionserscheinungen steht in den meisten Fällen mit der Erdung von Teilen elektrischer Starkstromanlagen im Zusammenhang; sei es, dass eine elektrische Kraftübertragungsanlage die Erde betriebsmässig oder im Störfall als Stromleiter benützt; sei es, dass nicht isolierte, metallische Stromleiter in der Erde liegen. Dies ist besonders bei allen elektrischen Bahnen der Fall, bei denen die Schienen als Stromleiter dienen. Hier bildet die Erde einen Nebenschluss und nimmt daher als solcher je nach dem Grade ihrer Leitfähigkeit an der Stromleitung teil. Metallische

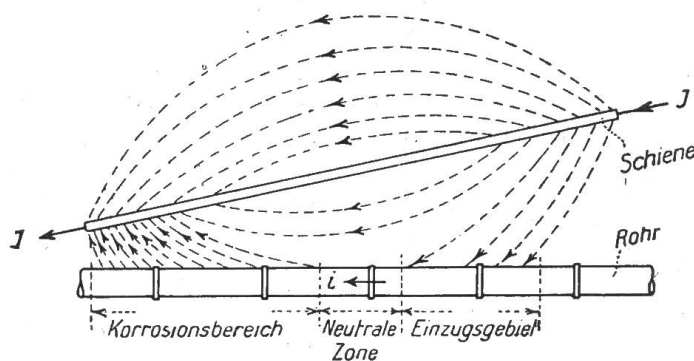


Fig. 2.

Massen (Rohrleitungen, Kabel mit Metallhülle usw.), die im Bereich des Erdstromes liegen, werden gleicherweise als Nebenschluss zur Erde als Leiter einen Teil des Erdstroms über eine gewisse Strecke führen, welche von der relativen Lage der metallischen Masse zum Erdstrom und von deren Leitfähigkeit abhängt. Der fremde metallische Leiter wird hierbei notwendigerweise an der Austrittsstelle des Erdstroms aus dem Boden als Kathode, an der Eintrittsstelle als Anode wirken, in welchem Bereich er der Korrosion ausgesetzt ist. Fig. 2 illustriert die in einem solchen Fall sich etwa einstellende Verteilung des Erdstroms. Das Bereich des kathodischen Verhaltens der Metallmasse bezeichnen wir als das *Einzugsgebiet* der Erdströme, das Bereich der wieder in den Erdboden eintretenden Ströme, wo die Metallmasse anodisch wirkt, als ihr *Korrosionsbereich*. Das dazwischen liegende Teilstück sei *neutrale Zone* genannt.

Das Mass der Ausbildung des Erdstroms in der Erde als Nebenschluss zum Betriebsstrom-Leiter und der Anteil des fremden metallischen Leiters an dessen Stromführung hängen offenbar vom gegenseitigen Verhältnis der Leitfähigkeiten ab. Die hier geltenden Beziehungen sind, soweit sie für die Korrosionserscheinungen Bedeutung haben, für die Verhältnisse elektrischer Bahnen nachfolgend zusammengestellt.

Es kann sich hiebei nur um *Bahnen mit Gleichstrombetrieb* handeln. Die Ausbildung der Erdströme, wie z. B. in Fig. 2 angedeutet, ist natürlich auch bei *Wechselstrom* zu erwarten, nur scheint bei dem raschen Wechsel der Polarität für gebräuchliche industrielle Periodenzahlen die beschriebene Wirkung der Elektrolyse effektiv nicht in die Erscheinung zu treten. Wie die Versuche von Burton Mc. Collum und G. H. Ahlborn¹⁾ zeigen, lässt

¹⁾ Proceedings of A. J. E. E. 1916, Seite 371.

schon eine Periodenzahl von 5 pro min. praktisch keine Korrosionserscheinungen mehr hervorbringen. Ob periodisch wechselnde Erdströme theoretisch überhaupt keine elektrolytische Wirkung zur Folge haben, ist damit nicht gesagt; die Frage hat wissenschaftlich noch keine eindeutige Antwort gefunden.

C. Die Ausbildung des Erdstroms in einem zur Fahrschiene parallelen Rohrstrang oder Kabelmantel.

Die nachfolgenden Betrachtungen haben nicht zum Zweck, Formeln für die Berechnung der Gefährdung aufzustellen, die etwa für die zahlenmässige Beurteilung der praktischen Verhältnisse zu verwenden wären. Die tatsächlich auftretenden Erscheinungen sind meist durch so viele der Rechnung nicht zugängliche Faktoren bedingt, dass deren Vorausbestimmung nicht mehr möglich ist. Die zahlenmässige Ermittlung der Korrosionsmöglichkeit an der gegebenen Anlage bleibt daher immer dem Versuch vorbehalten. Hingegen ist es erwünscht, an einigen vereinfachenden Beispielen die theoretischen Grundlagen herauszuschälen, auf denen sich die *Schutzmassnahmen* zur Verminderung der Korrosionserscheinung aufbauen.

1. Die einseitig gespeiste Fahrstrecke beim einfachen Pendelbetrieb.

Die Strecke von der Länge l werde von einem Wagen, der den Strom J an die Schienen abgibt, im einfachen Pendelbetrieb befahren. Im betrachteten Zeitpunkt befinde sich der Wagen in C. Der Speisepunkt A sei mit der negativen Schiene im Kraftwerk verbunden, sein Potential sei unverändert auf dem Wert P_a .

Der Potentialverlauf in den Schienen bis zum Punkt C ist in Fig. 3 durch die aufsteigende Gerade gegeben, von C an bleibt das Schienenpotential konstant bis zum Streckenende B. Der Schienenstrom von C nach A findet in der Erde einen Nebenschluss, wobei auch längs der

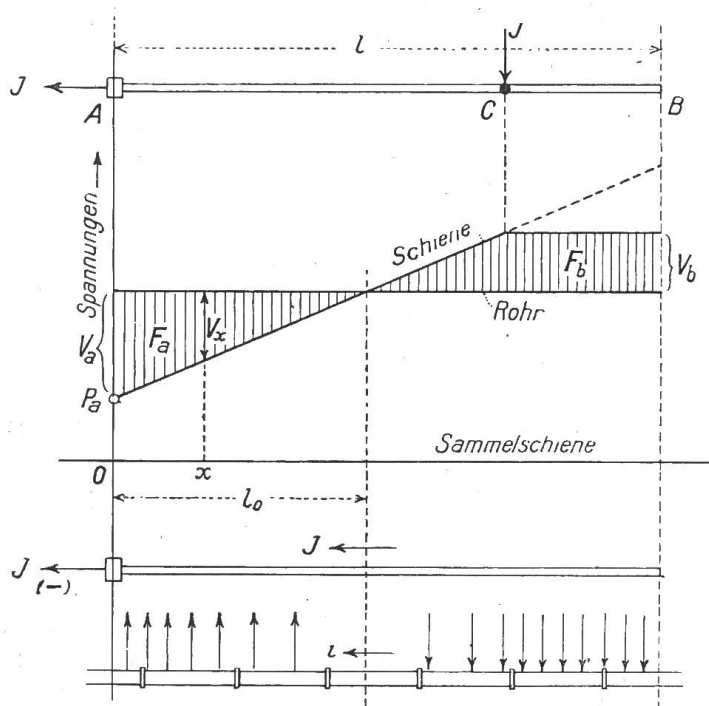


Fig. 3.

Strecke CB Streuströme in die Erde übertreten, wenn diese auch im betrachteten Zeitpunkt keinen Betriebsstrom führt. Um die folgenden Rechnungen nicht zu komplizieren, sei ausdrücklich vorausgesetzt, dass der in die Erde abirrende Teil des Schienenstroms verschwindend klein sei im Verhältnis zu J . Dem Einfluss der Stromverluste in der Schiene auf den Spannungsabfall wird also keine Rechnung getragen. Die Berücksichtigung der tatsächlichen Verhältnisse würde allerdings zu einigen interessanten Beziehungen führen, über die wir uns eventuell einen Nachtrag zum Berichte vorbehalten. Tatsächlich hat die Stromabirrung zur Folge, dass das Potential nicht linear verläuft; die Abweichung bringt jedoch keine wesentlichen Änderungen des Verlaufs der Potentialunterschiede hervor und die Vernachlässigung in der Rechnung ist durch die grössere Uebersichtlichkeit des Ergebnisses gerechtfertigt.

Der parallele Rohrstrang nimmt seinerseits an der Leitung des Erdstroms teil, indem er gemäss der Anschauung in Fig. 2 über ein gewisses Gebiet Streuströme aufnimmt (Einzugsgebiet), um sie in der Nähe des negativen Speisepunktes wieder an die Erde bzw. an die Schiene abzugeben (Korrosionsbereich). Wir setzen voraus, dass in diesem der ganze gesammelte Rohrstrom i wieder vollständig abgegeben werde, dass also das Rohr über die Endpunkte A und B hinaus keinen Rohrstrom führe. Dann muss das Schienenpotential im Einzugsgebiet notwendigerweise stets grösser sein, als

das Rohrpotential und umgekehrt das Rohrpotential im Korrosionsbereich grösser als dasjenige der Schiene. In der neutralen Zone wird das Potentialgefälle zwischen beiden Leitern Null sein. Setzen wir voraus, dass der Spannungsabfall, den der Rohrstrom i im Rohr erfährt, verschwindend klein sei im Verhältnis zu den betrachteten Potentialdifferenzen, so ist das Rohrpotential konstant über die ganze Länge l und gleich dem Wert, den das Schienenpotential im neutralen Punkt aufweist. In Fig. 3 tritt dieser im betrachteten Zeitpunkt (Wagen in C) im Abstand l_0 von A auf. Auf diese Weise steht der Erdboden zwischen Schienen und Rohrleitung unter einem längs der Strecke veränderlichen Spannungsgefälle v_x als jeweilige Differenz des Schienen- und Rohrpotentials. Wir betrachten v_x als direkte Ursache des im Raum zwischen Schiene und Rohr fliessenden Erdstroms, der pro Flächeneinheit der Elektrode, am Rohr gemessen, den Betrag j_x aufweise. Im Querschnitt wird sich theoretisch etwa die in Fig. 4 angedeutete Stromverteilung einstellen. Der Erdstrom trete am Rohr über die mittlere Breite Δ ein bzw. aus. Die vom Erdstrom belegte Oberfläche des Rohrs wird praktisch einen gewissen Bruchteil des Rohrumfangs umfassen, der vom Abstand zwischen Schiene und Rohr und der Leitfähigkeit des Erdbodens an der Rohroberfläche abhängt. Die hier geltenden exakten Beziehungen sind nebensächlich, wir wollen nur festhalten, dass Δ jedenfalls um so grösser ausfällt, je grösser der Rohrumfang ist. Der längs der Strecke als konstant vorausgesetzte totale Widerstand auf dem Wege des Erdstroms zwischen Schiene und Rohr sei pro Längeneinheit der Strecke mit r_e bezeichnet, so dass der Widerstand über die Länge l den Wert $\frac{r_e}{l}$ erreiche. r_e setzt

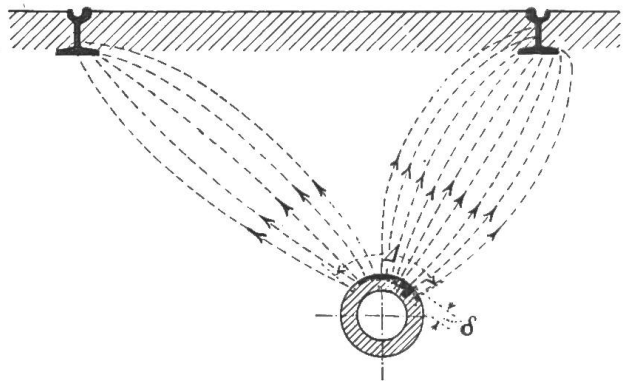


Fig. 4.

sich in diesem Fall zusammen aus dem Uebergangswiderstand zwischen Elektrode und Erdboden, dem eigentlichen Erdwiderstand über den Weg der in Fig. 4 angedeuteten Strömung und dem der Ueberwindung der GegenEMK der Zelle (Rohr-Schiene) äquivalenten Widerstand. Wenn wir im Nachfolgenden den Erdstrom j_x durch das ohmsche Gesetz mit dem totalen Widerstand r_e verknüpfen, so ist das offenbar nur näherungsweise richtig. Mit dieser Annahme wird unter den gemachten weiteren Voraussetzungen die spezifische Erdstromstärke, d. h. der Strom pro Flächeneinheit am Rohr zu

$$j_x = \frac{v_x}{\Delta \cdot r_e}$$

Die für die Gefährdung der Rohrleitung im Korrosionsbereich massgebende spezifische Erdstromstärke ist daher (näherungsweise) an jenem Ort am grössten, wo die Potentialdifferenz v_x den grössten Wert erreicht; sie ist dieser direkt proportional.

Die Lösung der Aufgabe kann sich daher darauf beschränken, die Veränderlichkeit des jeweiligen Höchstwerts der spezifischen Erdstromstärke für verschiedene Wagenstellungen zu suchen, um gemäss dem Ausdruck für die Gefährdung: $\delta = \frac{\alpha \cdot j \cdot t}{\gamma}$ diese in ihrem

maximalen Betrag über eine bestimmte Zeitdauer des Betriebs zu ermitteln. Diese Rechnungen werden dadurch sehr vereinfacht, dass für jede Wagenstellung der im Einzugsgebiet gesammelte totale Rohrstrom proportional dem in diesem Gebiet liegenden Flächenstück ist, das durch die Linien des Rohr- und Schienenpotentials gebildet wird (F_b in Fig. 3) und umgekehrt der im Korrosionsbereich abgegebene Erdstrom im entsprechenden Flächenstück F_a (Fig. 3) sein Mass findet. Die Beziehung ergibt sich aus folgender Ueberlegung: Der neutrale Punkt liege für irgend eine Wagenstellung im Abstand l_0 von A. Dann ist der totale Rohrstrom

$$\text{im Einzugsgebiet: } i_e = \Delta \int_{l_0}^l \frac{v_x}{\Delta \cdot r_e} \cdot dx; \quad \text{im Korrosionsbereich: } i_k = \Delta \int_0^{l_0} \frac{v_x}{\Delta \cdot r_e} \cdot dx$$

Diese Integrale sind, wie man sieht, F_a bzw. F_b proportional. Da nach unserer Voraussetzung das Rohr über die Punkte A und B hinaus keinen Strom mehr führt, folgt aus obigem $i_e = i_k$, daher auch $F_a = F_b$ für jede Wagenstellung. Allgemein ergibt sich hieraus auch, dass der Rohrstrom in irgend einem Abstand x proportional dem Flächenstück ist, das die entsprechende Ordinate mit den sich kreuzenden Potentiallinien des Rohrs bzw. der Schiene bildet. Wir müssen demnach für jede Wagenstellung den neutralen Punkt suchen, der diese Flächengleichheit ergibt. Die gesuchte Stellung lässt unter der Voraussetzung des geradlinigen Verlaufs des Rohrpotentials die maximale Stromdichte ohne weiteres herauslesen.

Die Betrachtung von Fig. 3 zeigt, dass für jede Wagenstellung die maximale Erdstromstärke im Einzugsgebiet im Endpunkt B auftritt, bzw. für das Korrosionsbereich im Speisepunkt A. Durch Anwendung obigenannter Ueberlegungen gelangt man zu folgenden Beziehungen. Der Wagen befinde sich im betrachteten Zeitpunkt im Abstand x (in Fig. 3 nicht eingezeichnet) vom Speisepunkt. Dann wird gemäss Fig. 3

$$F_a = \frac{v_a \cdot l_0}{2} \quad F_b = v_b \left(\frac{x - l_0}{2} + l - x \right)$$

Ferner ist
$$l_0 = \frac{v_a}{J \cdot r_s} \quad v_b = J \cdot r_s \cdot l - v_a$$

wenn r_s den Schienenwiderstand pro Längeneinheit bedeutet, und es folgt aus der Bedingung der Flächengleichheit $F_a = F_b$:

$$v_a = J \cdot r_s \cdot x \left(1 - \frac{x}{2l} \right) \quad v_b = J \cdot r_s \cdot \frac{x^2}{2l}$$

Bezeichnet $j_{a(x)}$, bzw. $j_{b(x)}$ die spezifische Erdstromstärke in den Endpunkten der Strecke für die Wagenstellung x , so schreibt sich diese nach den obigen Beziehungen:

$$j_{a(x)} = \frac{J \cdot r_s}{A \cdot r_e} \cdot x \left(1 - \frac{x}{2l} \right) \quad j_{b(x)} = \frac{J \cdot r_s}{A \cdot r_e} \cdot \frac{x^2}{2l}$$

Der Verlauf ist in Fig. 5 graphisch angedeutet. Hieraus folgt, dass für jede Wagenstellung zwischen A und B der spezifische Wert des Erdstromes im Einzugsgebiet kleiner ist, als im Korrosionsbereich, mit Ausnahme der Endstellung des Wagens in B, wo beide Ströme den Betrag erreichen:

$$j_{a(l)} = j_{b(l)} = \frac{J \cdot r_s \cdot l}{2 A \cdot r_e}$$

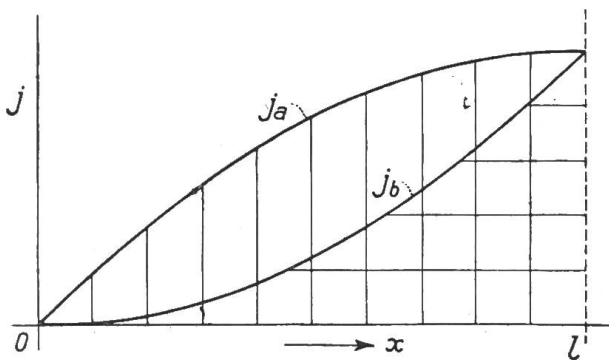


Fig. 5.

Von massgebender Bedeutung ist aber der Wert der Gefährdung $\delta = \frac{\alpha \cdot j \cdot t}{\gamma}$. Wir bestimmen diesen für die Zeit T , die der Wagen braucht, um die Strecke l mit der Geschwindigkeit u zurückzulegen, so dass

$l = uT$. Unter Anwendung obiger Formeln wird alsdann:

$$\delta_a = \frac{J \cdot r_s \cdot \alpha \cdot u}{A \cdot r_e \cdot \gamma} \cdot \int_0^T \left(t - \frac{t^2}{2T} \right) dt = \left(\frac{\alpha}{\gamma} \right) \cdot \frac{T \cdot J \cdot r_s \cdot l}{3 A \cdot r_e}$$

$$\delta_b = \frac{J \cdot r_s \cdot \alpha \cdot u}{\Delta \cdot r_e \cdot \gamma} \cdot \int_0^T \frac{t^2}{2T} \cdot dt = \left(\frac{\alpha}{\gamma} \right) \cdot \frac{T \cdot J \cdot r_s \cdot l}{6 \Delta \cdot r_e}$$

Die Ausdrücke gewinnen durch die Einführung des maximalen Spannungsabfalls des Betriebsstroms in der Schiene $p_{\max} = J \cdot r_s \cdot l$ allgemeinere Bedeutung. Sie schreiben sich demnach:

$$\delta_a = \left(\frac{\alpha}{\gamma} \right) \frac{p_{\max} \cdot T}{3 \cdot \Delta \cdot r_e}, \quad \delta_b = \left(\frac{\alpha}{\gamma} \right) \frac{p_{\max} \cdot T}{6 \cdot \Delta \cdot r_e}$$

Bevor wir die gewonnenen Beziehungen diskutieren, sollen noch zur Gegenüberstellung die Verhältnisse anderer Betriebsanordnungen abgeleitet werden.

2. Die beidseitig gespeiste Strecke beim einfachen Pendelbetrieb.

Wir machen die gleichen Voraussetzungen wie im vorangegangenen Fall. Durch die beiden Speisepunkte A und B, die beide an der negativen Schiene liegen mögen, wird das Korrosionsbereich in zwei Teile geteilt; es entstehen so 2 neutrale Punkte, die sich mit der Bewegung des Wagens verschieben. Diese sind auch hier für die gegebene Stellung nach dem Prinzip der Flächengleichheit zu ermitteln. Setzen wir die Potentiale P_a und P_b für

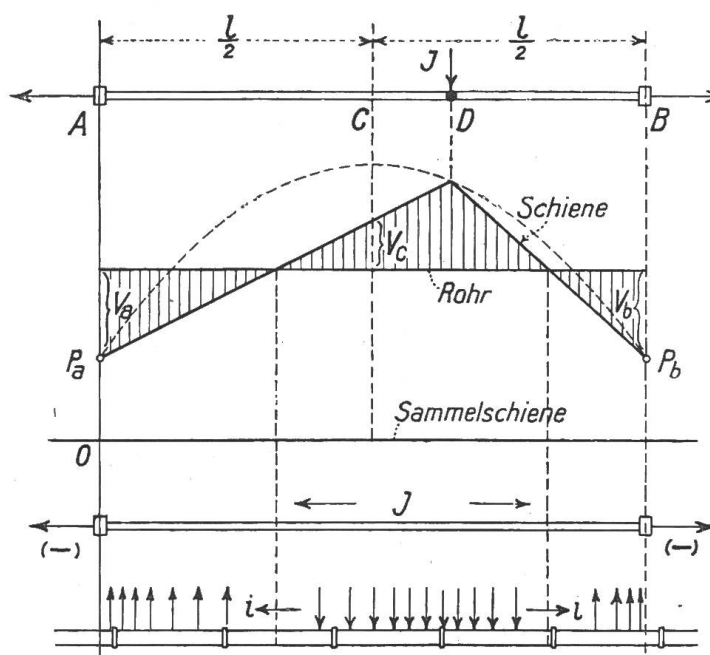


Fig. 6.

jede Wagenstellung als gleich und konstant voraus, so bewegt sich der Punkt D grössten Spannungsabfalls in der Schiene auf einer Parabel, welche die Veränderlichkeit der neutralen Punkte bestimmt. Dies ergibt sich aus folgender Betrachtung. Es bezeichne J_a bzw. J_b den Schienenstrom am Speisepunkt A bzw. B. Dann wird für die Wagenstellung x der Schienenspannungsabfall im Punkt D

$$p = J_a \cdot r_s \cdot x = J_b \cdot r_s (l - x)$$

Da für alle Stellungen $J_a + J_b = J$ folgt durch Auswertung obiger Beziehung

$$p = J \cdot r_s \cdot \frac{x(l-x)}{l}$$

Fig. 6 zeigt, dass der uns interessierende Maximalwert der Potentialdifferenz zwischen Schiene und Rohr in den beiden Korrosionsbe-

reichen immer in den Speisepunkten A und B auftritt; nach unserer Voraussetzung über die Gleichheit der Potentiale in diesen Punkten muss daher für jede Wagenstellung $v_a = v_b$ sein.

Nun ist hierbei immer die Rechteckfläche $v_a \cdot l$ gleich der Dreieckfläche $\frac{l \cdot p}{2}$, woraus folgt, dass die Potentiale $v_a = v_b$ für jede Wagenstellung gleich der Hälfte des Spannungsabfalls in der Schiene sind.

Mit dem Ausdruck für die Erdstromdichte $j_x = \frac{v_x}{\Delta \cdot r_e}$ wird daher $j_{a(x)} = j_{b(x)} = \frac{J \cdot r_s (l-x) \cdot x}{2l \cdot \Delta \cdot r_e}$

Der maximale spezifische Erdstrom im Einzugsgebiet liegt im Punkte x , die entsprechende Potentialdifferenz $v_{(x)}$ ist gemäss obigem ebenfalls gleich der Hälfte des Spannungsabfalls in der Schiene; aber der Ort dieses jeweiligen Maximums verschiebt sich mit x , sodass ein gegebener Punkt der Rohrleitung die maximale Erdstromdichte im Einzugsgebiet nur vorübergehend zu erleiden hat. Hierbei erfährt offenbar der Punkt C im Abstand $\frac{1}{2}$ über die ganze Zeit T , die der Wagen zum Durchlaufen der Strecke braucht, die grösste Gefährdung, was sich ohne weiteres aus der Fig. 6 folgern lässt. Die Rechnung führt für die Potentialdifferenz $v_{c(x)}$ in diesem Punkt zum Ausdruck

$$v_{c(x)} = \frac{J \cdot r_s \cdot x^2}{2l} \quad \text{und dementsprechend:} \quad j_{c(x)} = \frac{J \cdot r_s \cdot x^2}{2l \cdot \Delta \cdot r_e}$$

Wir haben auch für diesen Fall den Verlauf der Erdstromdichten in Fig. 7 aufgezeichnet. Wenn, wie vorausgesetzt, der negative Pol an der Schiene liegt, so ist für jede Wagenstellung mit Ausnahme von $x = \frac{1}{2}l$ die Erdstromdichte im Einzugsgebiet stets kleiner als in den beiden Korrosionsbereichen. Der maximale Wert für $x = \frac{1}{2}l$ erreicht den Betrag

$$j_a\left(\frac{1}{2}\right) = j_b\left(\frac{1}{2}\right) = j_c\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{J \cdot r_s \cdot l}{8 \cdot \Delta \cdot r_e}$$

Den Ausdruck der Gefährdung erhält man wieder durch Ermittlung der Flächenstücke, die die Kurven der Erdstromdichte einschliessen. Die Rechnung führt zu

$$\delta_a = \delta_b = \left(\frac{\alpha}{\gamma}\right) \frac{T \cdot J \cdot r_s \cdot l}{12 \cdot \Delta \cdot r_e}, \quad \delta_c = \left(\frac{\alpha}{\gamma}\right) \frac{T \cdot J \cdot r_s \cdot l}{24 \cdot \Delta \cdot r_e}$$

Wir führen wieder den maximalen Spannungsabfall ein, den der Betriebsstrom in den Schienen erfährt. Dieser ermittelt sich zu $p_{\max} = \frac{J \cdot r_s \cdot l}{4}$, wodurch sich die Gefährdung schreibt

$$\delta_a = \delta_b = \left(\frac{\alpha}{\gamma}\right) \frac{T \cdot p_{\max}}{3 \cdot \Delta \cdot r_e}, \quad \delta_c = \left(\frac{\alpha}{\gamma}\right) \frac{T \cdot p_{\max}}{6 \cdot \Delta \cdot r_e}$$

Die einseitig gespeiste Strecke mit einfachem Pendelbetrieb verhält sich daher unter sonst gleichen Bedingungen bezüglich der Korrosionsgefährdung gleich wie die beidseitig gespeiste Strecke, wenn die Belastungen in den beiden Fällen den gleichen Maximalwert des Spannungsabfalls in den Schienen hervorrufen. Das gleiche ist für die mehrfach gespeiste Strecke zu sagen, weil sich diese immer in die zwei betrachteten Fälle aufteilen lässt.

Als Gegenstück zu dem betrachteten einfachen Fall eines Bahnbetriebs mit einem einzigen Wagen soll der kontinuierliche Betrieb auf zwei nahen parallelen Schienensträngen mit sehr vielen Wagen untersucht werden, nämlich

3. Die einseitig gespeiste gleichmässig belastete Strecke.

Es mögen die gleichen Voraussetzungen wie oben gelten. Bezüglich des Betriebs setzen

wir fest, die Wagen folgen sich in gleichen relativ kurzen Abständen. Dann kann die Spannungsverteilung längs der Strecke als von der Stellung eines einzelnen Wagens unabhängig angesehen werden und die Potentialdifferenz in einem gegebenen Abstand x

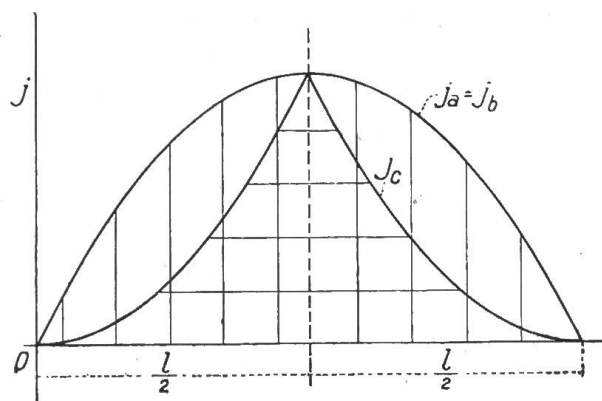


Fig. 7.

zwischen Rohr und Schiene bzw. der dort auftretende spezifische Erdstrom ist über die Zeit T , die ein Wagen braucht, um von A nach B zu gelangen, konstant. Der Strom, der pro Längeneinheit von der Wagenreihe in die Schienen tritt betrage J_1 , so dass das Speisekabel den Strom $J = J_1 \cdot l$ zu führen hat. Wenn wir wieder voraussetzen, dass die aus der Schiene austretenden Streuströme vernachlässigbar klein sind im Verhältnis zum Schienenstrom, so steigt dieser alsdann in unserem Fall linear mit der Entfernung vom ungespeisten Schienenende an. Im Abstand x vom Speisepunkt erreicht er den Wert

$$J_x = \frac{J}{l} \cdot (l - x)$$

Die Steigerung des Spannungsanstieges in diesem Abstand über die Strecke dx kann somit angesetzt werden zu $dp = \frac{J}{l} (l - x) \cdot dx \cdot r_s$, woraus sich für den Verlauf der Spannungsabfall in der Schiene der Ausdruck ableitet

$$p = \frac{J}{l} \cdot r_s \left(lx - \frac{x^2}{2} \right)$$

Das ist die Gleichung der Parabel mit dem maximalen Wert

$$p_{\max} = \frac{J \cdot r_s \cdot l}{2}$$

der am freien Streckenende B erreicht ist. Aus den Eigenschaften der Parabel folgt bei Flächengleichheit $F_a = F_b$, dass die maximale Potentialdifferenz v_a zwischen Rohr und Schiene im Korrosionsbereich doppelt so gross ist, wie der Maximalwert v_b im Einzugsgebiet, nämlich:

$$v_a = \frac{2}{3} p_{\max} \quad v_b = \frac{1}{3} p_{\max}$$

Dementsprechend:

$$j_a = \frac{2 p_{\max}}{3 \Delta \cdot r_e} \quad j_b = \frac{p_{\max}}{3 \Delta \cdot r_e}$$

Diese Werte sind, wie oben gesagt über die Zeit T konstant, so dass sich die Ausdrücke für die Gefährdung sehr einfach ermitteln zu:

$$\delta_a = \left(\frac{\alpha}{\gamma} \right) \frac{2 T \cdot p_{\max}}{3 \Delta \cdot r_e} \quad \delta_b = \left(\frac{\alpha}{\gamma} \right) \frac{T \cdot p_{\max}}{3 \Delta \cdot r_e}$$

4. Die beidseitig gespeiste, gleichmässig belastete Strecke.

Die Behandlung dieses Falls erfordert nach dem vorangegangenen keine weitere Rechnung. In Verfolgung von Fig. 8 ist ersichtlich, dass das Maximum des Spannungsabfalls in den Schienen auf die Mitte der Strecke entfällt, die mit C bezeichnet sei, der Verlauf der Spannung folgt ebenfalls einer Parabel mit dem Scheitel in C. Es werden an den Streckenenden A und B zwei Korrosionsbereiche auftreten, die das Einzugsgebiet einschliessen. Bedeutet $p_{\max}$ den Höchstwert des Spannungsabfalls, so wird auch hier sein:

$$v_a = v_b = \frac{2}{3} p_{\max} \quad v_c = \frac{1}{3} p_{\max}$$

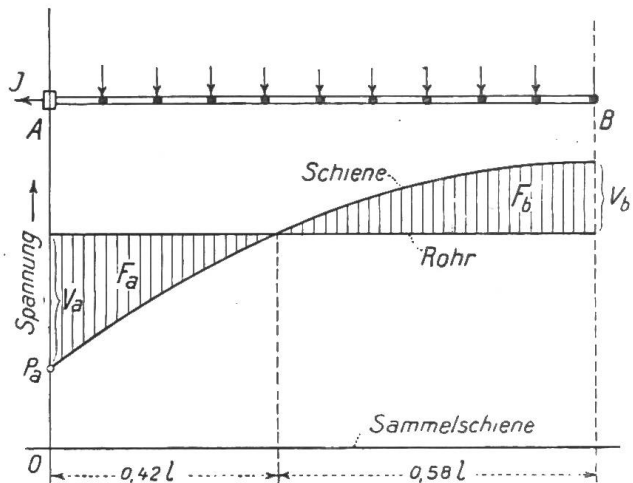


Fig. 8.

und dementsprechend:

$$\delta_a = \delta_b = \left(\frac{\alpha}{\gamma}\right) \frac{2 T \cdot p_{\max}}{3 \Delta \cdot r_e} \quad \delta_c = \left(\frac{\alpha}{\gamma}\right) \frac{T \cdot p_{\max}}{3 \Delta \cdot r_e}$$

Es ist auch im Fall der gleichmässig belasteten Strecke gleichgültig, ob diese ein- oder beidseitig gespeist sei, wenn nur unter sonst gleichen Umständen der gleiche Wert des maximalen Spannungsabfalls in der Schiene beibehalten wird. Auch die mehrfach gespeiste Strecke wird sich gleich verhalten, weil diese immer in die zwei betrachteten Fälle zerlegt werden kann.

Das formale Ergebnis für die Fälle 2 und 4 gegenüber 1 und 3 darf nicht zum Irrtum verleiten, dass die Beifügung eines (zweiten) Speisepunkts „am Ende“ einer Schienestrecke zu einer vorhandenen ersten „am Anfang“ der Strecke die Korrosionsgefährdung in der Schiene *nicht* ändere: Denn diese zweite Speisung setzt eben den in den Formeln gleich vorausgesetzten maximalen Spannungsabfall $p_{\max}$ je auf die Hälfte herunter. Siehe darüber weiter die Tabelle auf Seite 147.

D. Die massgebenden Faktoren für die Korrosionsgefährdung an parallel zum Bahngeleise verlegten Rohren und Kabeln.

Wir stellen vorerst die im vorigen Abschnitt gewonnenen Ausdrücke zusammen, um den Einfluss der Belastungsart der Strecke auf die Formulierung des Ausdrucks für die Gefährdung zu ersehen. Wenn wir die Voraussetzung bestehen lassen, dass der oder die Speisepunkte mit der negativen Schiene des Kraftwerks in Verbindung stehen, so ergibt sich folgendes Bild:

Gefährdung im		Korrosionsbereich (Gefährdung am Rohr)	Einzugsgebiet (Gefährdung an der Schiene)
Ein- oder mehrfach gespeiste Strecke	einfacher Pendelbetrieb mit 1 Wagen	$\delta = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{\alpha}{\gamma}\right) \frac{T \cdot p_{\max}}{\Delta \cdot r_e}$	$\delta = \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{\alpha}{\gamma}\right) \frac{T \cdot p_{\max}}{\Delta \cdot r_e}$
	gleichmässig belastete Strecke mit sehr vielen Wagen	$\delta = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\alpha}{\gamma}\right) \frac{T \cdot p_{\max}}{\Delta \cdot r_e}$	$\delta = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{\alpha}{\gamma}\right) \frac{T \cdot p_{\max}}{\Delta \cdot r_e}$

Die beiden betrachteten Belastungsarten der Strecke, 1 Wagen im einfachen Pendelbetrieb und sehr viele (theoretisch unendlich viele) sich folgende Wagen auf der Strecke, stellen die beiden extremen Fälle aller möglichen Betriebsarten dar. Die Korrosionsgefährdung über die Betriebsdauer T ist naturgemäss im ersten Fall kleiner, nämlich die Hälfte des Werts, der bei der höchstmöglichen Ausnützung der Strecke entsteht. Wir dürfen annehmen, dass alle praktisch vorkommenden Betriebsverhältnisse, auf die unsere Voraussetzungen Anwendung finden, sich innerhalb dieser Grenzen bewegen. *Nehmen wir an, dass in allen diesen Fällen die Belastungen der Strecke den gleichen maximalen, etwa den höchst zulässigen, Schienenspannungsabfall hervorrufen, so ergibt sich, dass sich diese theoretischen Werte der Gefährdung nur noch durch einen Faktor von einander unterscheiden, der von der Belastungsart abhängt, dass also der Einfluss der einzelnen massgebenden Grössen auf die Korrosion sowohl von der Belastungsart der Strecke, wie von der Zahl der Speisepunkte (wozu die Bemerkung am Schluss des vorigen Kapitels C zu beachten ist) in seinem Grade nicht verändert wird.*

Der gewonnene Ausdruck für die Gefährdung

$$\delta = k \cdot \left(\frac{\alpha}{\gamma}\right) \frac{T \cdot p_{\max}}{\Delta \cdot r_e}$$

kann daher unter Beibehalt der gemachten Voraussetzungen als allgemein gültig angesehen werden. Er erlaubt somit den Einfluss von Anlage und Betrieb auf die Korrosionserscheinung herauszulesen.

1. Der Einfluss von Rohr- und Schienenanlage auf die Korrosionsgefährdung.

Die Verhältnisse des Rohrmaterials sind durch den Faktor α ausgedrückt. Die Gefährdung am Rohr ist diesem Wert proportional, wie dies schon auf Seite 137 zum Ausdruck gekommen ist.

Nachfolgende Zusammenstellung zeigt das Verhalten einiger hier hauptsächlich interessierenden Materialien. Die Zahlen sind auf Grund einer konstanten Erdstromdichte von $j = 0,001 \text{ A pro } 100 \text{ cm}^2$ über die Dauer eines Jahres berechnet und geben die hierbei resultierende Dicke der korrodierten Schicht in mm an.

Metall	$\delta \text{ mm}$	Metall	$\delta \text{ mm}$
Aluminium	0,114	Nickel	0,107
Kupfer	0,232 (0,166) ¹⁾	Blei	0,295
Eisen	0,115 (0,077) ¹⁾	Zink	0,155

Diese theoretisch berechneten Werte erlauben i. allg. keine zahlenmässigen Schlüsse bezüglich des Grads der Gefährdung für praktische Verhältnisse, weil bei der oft wechselnden Beschaffenheit der Oberfläche der im Erdboden liegenden Metallteile der geschilderte Vorgang der Elektrolyse durch sekundäre elektrochemische Erscheinungen gestört werden kann. Hierüber wird im II. Teil (siehe nächstes Heft) ausführlich berichtet. Bezüglich der praktisch konstatierten Erdstromdichten und der hieraus resultierten Gefährdungen sei auf die dortigen Ausführungen verwiesen. Die Gegenüberstellung der obigen Zahlen lässt aber immerhin erkennen, dass *sich Kupfer und Blei relativ ungünstig verhalten*. Der Verlegung ungeschützter Drähte und Rohre aus Blei und Kupfer ist demnach in diesem Sinne besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

Der Rohrdurchmesser tritt in der Grösse Δ auf. Wir bezeichnen damit nach Fig. 4 die mittlere auf dem Rohrumfang gemessene Breite der vom Erdstrom belegten Oberfläche des Rohrs. Wie schon auf Seite 140 hingewiesen, muss Δ unter sonst gleichen Verhältnissen logischerweise mit dem Rohrdurchmesser anwachsen. Daraus ist der Schluss zu ziehen, dass *die Gefährdung unter sonst gleichen Bedingungen für Rohre oder Kabel kleinen Durchmessers grösser ist, als für grosse Rohre oder Kabel*.

Der Erdwiderstand r_e , den die Erdströme pro Längeneinheit der Strecke auf dem Weg zwischen Rohr und Schiene erfahren, verringert bei seinem Anwachsen die Gefährdung. Der Widerstand r_e setzt sich in der Hauptsache aus dem Uebergangswiderstand von der Schiene bzw. Rohrleitung zur Erde und dem eigentlichen Erdwiderstand zusammen. Die Vergrösserung der ersteren verlangt möglichst *gut isolierende, d. h. trockene Schienenbettung*. Im gleichen Sinne ist auch versucht worden, an der gefährdeten Rohrleitung durch Verwendung isolierender Verkleidungen den Uebergangswiderstand zu erhöhen. Hierüber ist im II. Teil berichtet.

Der eigentliche Erdwiderstand hängt von der Leitfähigkeit der Erde im Erdstrombereich und der Distanz zwischen Schiene und Rohrleitung ab. Von einer bestimmten Entfernung des Rohrs von der Geleisanlage an wird daher praktisch keine gefährliche Beeinflussung des Rohrs mehr zu erwarten sein. Andererseits ist die Gefährdung bei sehr geringem Abstand offenbar umso erheblicher. Die *in unmittelbarer Nähe der Schienenanlagen verlegten Stickleitungen* für Haus- und Kandelaberanschlüsse in städtischen Strassen sind daher der Korrosion *am meisten ausgesetzt*.

Der Rohrwiderstand ist in den vorangegangenen Betrachtungen als im Vergleich zum Erdwiderstand vernachlässigbar klein vorausgesetzt worden. Es ist hier die Stelle, seinen tatsächlichen Einfluss auf die Korrosionsgefährdung zu untersuchen. Seine Einführung in die abgeleiteten Formeln würde keine besondere Schwierigkeiten aufweisen, hätte aber

¹⁾ Für Verbindungen, in denen das Metall mit der kleineren Valenz auftritt.

eine bedeutende Komplizierung des Resultats zur Folge. Auch ohne Rechnung ist ersichtlich, dass bei Anwesenheit des Rohrwiderstandes das Rohrpotential von der horizontalen Geraden in den Figuren 3, 6 und 8 in eine in entgegengesetzter Richtung des Rohrstroms ansteigende Linie übergehen würde, entsprechend dem veränderlichen Potentialgefälle im Rohr. Dadurch werden die gleichen Flächenstücke F_a und F_b und damit die Maximalwerte der Erdstromdichte verkleinert und zwar umso mehr, je grösser der Spannungsabfall im Rohr bzw. sein Widerstand ist. Für unendlich grossen Rohrwiderstand fällt schliesslich die Kurve der Potentialverteilung für das Rohr mit derjenigen der Schiene zusammen, so dass zwischen den Elektroden keine Potentialdifferenz und kein Erdstrom mehr auftritt. Wir schliessen daraus, dass die *Gefährdung durch Vergrösserung des Rohrwiderstandes verkleinert* werden kann.

Der Spannungsabfall in den Schienen. Der Ausdruck für die *Gefährdung* ergibt deren direkte *Proportionalität mit dem maximalen Spannungsabfall in den Schienen*, wie auch die Schiene belastet und welches auch Zahl und Lage der Speisepunkte sein mag. Man hat darin das nächstliegende und am besten zu handhabende Mittel zur Beschränkung der Korrosion. Da das Schienenprofil meist durch andere Faktoren bedingt ist, muss zur Beschränkung des Schienenwiderstandes das Hauptgewicht auf die *sorgfältige Ausführung gut leitender Schienenverbindungen* gelegt werden. Für gegebene Betriebsverhältnisse (Betriebsspannung, Wagen-Leistung, Streckenlänge) ermöglicht die *Unterteilung der Strecke durch mehrere Speisepunkte* die wirkungsvollste Verminderung des Spannungsabfalls. Setzt man dessen Höchstwert für die einseitig gespeiste Strecke gleich 100%, so reduziert sich der Betrag durch Zufügen weiterer gleichmässig über die Strecke verteilter Speisepunkte gleichen Potentials wie folgt:

Relativer Spannungsabfall und seine Reduktion mit der Unterteilung der Strecke.

Belastungsart der gespeisten selbständigen Strecke	Zahl und Ort der Speisepunkte				
	1 am Ende	1 in der Mitte	2 an beiden Enden	3 an den Enden u. in der Mitte	4 gleich- mässig verteilt, 2 a.d. Enden
Einfacher Pendelbetrieb (1 Wagen-Verkehr)	100	50	25	12,5	8,35
Doppelter Pendelbetrieb (2 Wagen-Verkehr)	100	50	50	12,5	16,6 ¹⁾
Gleichmässig belastete Strecke durch sehr viele Wagen	100	25	25	6,25	2,8

Nach unserer Formel wird mit dem Spannungsabfall auch die Korrosionsgefährdung im gleichen Mass verhindert. Bemerkenswert ist die aus der Tabelle ersichtliche Tatsache, dass eine bereits mit mehr als zwei Speisepunkten ausgerüstete Strecke durch die Vermehrung der letzteren keine bedeutende Verkleinerung des Spannungsabfalls mehr erfährt. Geht man z. B. bei der gleichmässig belasteten Strecke von 2 auf 3 Speisepunkte, so verringert sich der Spannungsabfall auf den 8^{ten} Teil; ist dieser Wert noch zu hoch, so vermag ein weiterer Speisepunkt diesen nur noch auf die Hälfte zu reduzieren. Ergeben sich beim Entwurf einer Anlage in solchem Fall im Hinblick auf die Korrosionsgefährdung immer noch unzulässig hohe Werte des Spannungsabfalls, so muss bei Beibehaltung der übrigen Betriebs-

¹⁾ Die Vergrösserung des Spannungsabfalls durch Einführung des vierten Kabels scheint paradox; durch eine andere Anordnung der vier Kabel, bei der diese nicht in gleichen Abständen angeschlossen werden, lässt sich ein günstigeres Resultat erzielen; die vorteilhafteste Anordnung führt hiebei zu 8,35%.

fährdung bei positiven Schienenspeisepunkten kleiner, (theoretisch nur die Hälfte) als im Fall negativer Speisepunkte. Daraus darf aber nicht der Schluss gezogen werden, dass in allen praktischen Betriebsverhältnissen die Verbindung der Schienen mit dem positiven Dynamopol Vorteile biete. Die obige Feststellung hätte nur allgemeine Gültigkeit, wenn alle Strecken eines Bahnnetzes gleiche Belastungsart und Zugsfrequenz aufweisen würden. Schliessen aber an befahrene Strecken solche kleinerer Ausnützung oder unbefahrene Geleise an, die im Bereich des Rohrleitungsnetzes liegen,

so treten gegenüber den betrachteten Verhältnissen Verschiebungen des Einzugsgebietes und des Korrosionsbereichs auf, die näher zu untersuchen sind.

Der Einfluss unbefahrener Stumpfgeleise. An das ungespeiste Ende einer gleichmässig belasteten Strecke schliesse ein unbefahrenes Stumpfgeleise von der Länge l_1 an. Die parallel verlegte Rohrleitung erstrecke sich auch über l_1 . Wir suchen die Gefährdung im Korrosionsbereich. Der Schienenpeisepunkt sei negativ.

Das unbefahrene Geleise, das in B an die Strecke anschliesst hält sich auf dem Potential dieses Punktes und wirkt daher wie eine über B hinaus verlängerte Elektrode. Dadurch wird das Einzugsgebiet vergrössert, was eine vergrösserte Stromabgabe im Korrosionsbereich zur Folge hat. Die für die Höchstwerte der Erdstromdichte massgebenden Potentialdifferenzen v_a , v_b und v_c lassen sich wieder nach dem Flächengesetz $F_a = F_b + F_c$ berechnen. Dabei stellt sich folgende Beziehung heraus:

$$\delta_a = \left(\frac{\alpha}{\gamma} \right) \frac{T \cdot p_{\max}}{3 \mathcal{A} \cdot r_e} \left(2 + \frac{l_1}{1 + l_1} \right) \quad \delta_b = \delta_c = \left(\frac{\alpha}{\gamma} \right) \frac{T \cdot p_{\max}}{3 \mathcal{A} \cdot r_e} \left(1 - \frac{l_1}{1 + l_1} \right)$$

Die Gefährdung im Korrosionsbereich nimmt daher mit wachsender Länge des Stumpfgeleises zu, im entsprechenden Mass verringert sich der Wert im Einzugsgebiet. Die folgende Zusammenstellung zeigt den zahlenmässigen Einfluss des Verhältnisses $\frac{l_1}{1}$ auf den Wert von δ , ausgehend vom früher betrachteten Fall, für den $l_1 = 0$ ist.

Veränderung von $\frac{l_1}{1}$	0.25	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
Prozentuelle Veränderung der Gefährdung δ	$\delta_a \%$							
	+ 10	+ 16.5	+ 21	+ 25	+ 30	+ 33	+ 36	+ 37.5
	$\delta_b \%$							
	— 20	— 33	— 42	— 50	— 60	— 66	— 72	— 75

Nun ist schon für die befahrene Strecke allein δ_b am ungespeisten Ende nur die Hälfte der Gefährdung in A, sodass tatsächlich der absolute Unterschied der durch den Anschluss des unbefahrenen Stücks entsteht noch grösser ist. Beträgt z. B. das Stumpfgeleise l_1 die halbe Länge der Strecke l , so erreicht δ_b nur $\frac{2}{7}$ des Betrags von δ_a . Man würde in solchem Fall den Schienenpeisepunkt mit noch grösserem Vorteil an den positiven Pol legen. Aus der Figur 9 ist ohne Rechnung zu sehen, dass mit der Verschiebung in den Stromdichten zugleich eine Vergrösserung des totalen Rohrstroms Hand in Hand geht. Eine einfache Erklärung folgt aus der Tatsache, dass die Verlängerung der Schiene über das Ende B hinaus einer Vergrösserung der Elektrode im Einzugsgebiet gleichkommt.

Aus den Betrachtungen ist allgemein zu schliessen:

Der Anschluss einer schwach oder gar nicht befahrenen offenen Strecke (Stumpfgeleise) an das ungespeiste Ende einer befahrenen Linie vermindert die Erdstromdichte an diesem Ende und vergrössert sie am Schienenpeisepunkt. Diese Verschiebung kommt einer Verminderung der Korrosionsgefährdung am Rohr gleich, wenn der Schienenpeisepunkt am positiven Pol liegt. In jedem Fall wird der totale Rohrstrom vergrössert.

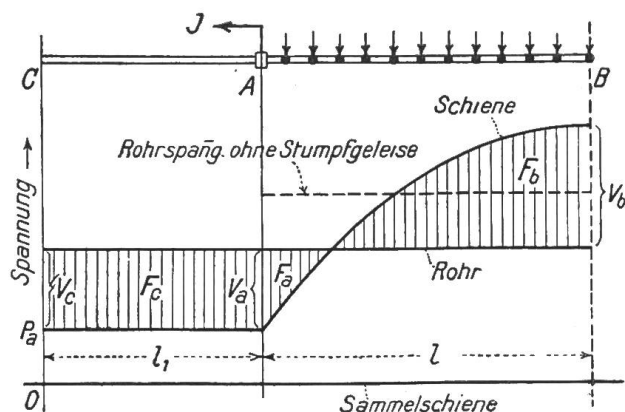


Fig. 10.

Häufiger kommt der umgekehrte Fall vor, wo die schwach befahrene Strecke an den Schienenspeisepunkt der betrachteten Linie anschliesst. Wir machen auch hier die oben genannten vereinfachenden Voraussetzungen.

Die Verhältnisse liegen hier gerade umgekehrt, die Ausdehnung des Korrosionsbereichs erfordert grössere Erdstromdichten im Einzugsgebiet. Die maximalen Werte finden sich durch Anwendung der Gleichung: $F_c + F_a = F_b$ woraus sich ableitet:

$$\delta_a = \delta_c = \left(\frac{\alpha}{\gamma} \right) \frac{T \cdot p_{\max}}{3 \Delta \cdot r_e} \left(2 - \frac{2l_1}{1+l_1} \right) \quad \delta_b = \left(\frac{\alpha}{\gamma} \right) \frac{T \cdot p_{\max}}{3 \Delta \cdot r_e} \left(1 + \frac{2l_1}{1+l_1} \right)$$

Der Vergleich mit den oben genannten Formeln zeigt, dass der Einfluss des Stumpfgeleises in diesem Fall ausgeprägter ist. Im übrigen hat wieder der Anschluss des Stumpfgeleises einen vergrösserten Rohrstrom zur Folge. Wir erhalten einen zahlenmässigen Ueberblick durch Einführung der Verhältnisse $\frac{l_1}{l}$.

Veränderung von $\frac{l_1}{l}$		0.25	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
Prozentuelle Veränderung der Gefährdung δ	δ_a ‰	— 20	— 33	— 43	— 50	— 60	— 66	— 72	— 75
	δ_b ‰	+ 50	+ 66	+ 86	+ 100	+ 120	+ 132	+ 144	+ 150

Für $l_1 = 0,5 l$ ist δ_b bereits 1,25 mal grösser als δ_a , während an der befahrenen Strecke allein δ_b nach früherem nur die Hälfte des Wertes von δ_a erreicht. Hätte man daher diesem gemäss vorgezogen, den positiven Pol mit den Schienen zu verbinden, so wäre durch den Anschluss der unbefahrenen Strecke von 0,5 l der gewonnene Vorteil bereits mehr als aufgehoben. Allgemein kann gesagt werden: *Der Anschluss einer schwach oder gar nicht befahrenen offenen Strecke an den Schienenspeisepunkt einer befahrenen Linie vermindert die Erdstromdichte an dieser Stelle und vergrössert sie am freien Streckenende. Diese Verschiebung kommt einer Verminderung der Korrosionsgefährdung am Rohr gleich, wenn der Speisepunkt am negativen Pol liegt. In jedem Fall wird der totale Rohrstrom vergrössert.*

Die Beispiele zeigen, dass keine allgemeinen Regeln über die günstigere Polarität der Schienen aufzustellen sind. Hingegen kann mit Hilfe solcher Ueberlegungen an der gegebenen Anlage, wenn auch meist nicht zahlenmässig, untersucht werden, welche Polarität an der meist gefährdeten Stelle der Anlage eine Verminderung der Korrosionsgefährdung ermöglicht.

Diese Betrachtungen führen zu den bekannten Massnahmen, durch *Anordnung von Erdplatten an den negativen Speisepunkten der Schienen* eine Verminderung der Erdstromdichte am Rohr zu erzielen. Die Wirkung ist ähnlich derjenigen eines unbefahrenen Stumpfgeleises, d. h. beide Anordnungen haben eine Vergrösserung der Elektrode zur Folge. Wenn damit auch, wie gezeigt wurde, tatsächlich eine Verminderung der Gefährdung im betreffenden Korrosionsbereich eintritt, muss zugleich eine Vergrösserung des Rohrstroms in Kauf genommen werden, wodurch bei verzweigten Rohrnetzen die Gefährdung an anderen Stellen des letzteren erhöht werden kann. Hierüber ist im folgenden Abschnitt E ein Beispiel angeführt.

Der Einfluss ungleichen Spannungsabfalls in den Schienen-Speisekabeln. Die gemachte Voraussetzung gleichen Potentials der Speisepunkte trifft im praktischen Betrieb oft nicht zu. Die dadurch entstehende Verschiebung in der Potentialkurve der Schiene ist von Einfluss auf die Korrosionsgefährdung. Wir untersuchen kurz den Fall der beidseitig gespeisten Strecke mit gleichmässiger Belastung. Am Streckenende B weise der Speisepunkt in Folge *höheren totalen Widerstandes* des entsprechenden *Kabels* ein um Δp

höheres Potential auf, als der Speisepunkt A. In Fig. 11 bedeutet hiebei die oberste Horizontale das Rohrpotential bei *ungleichem*, die unmittelbar darunter liegende Horizontale das Rohrpotential bei gleichem Potential der Schienenspeisepunkte A und B.

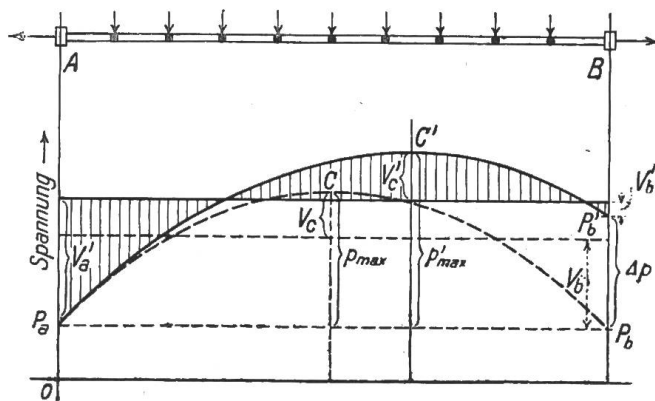


Fig. 11.

Der der neuen Verteilung des Schienenspotentials entsprechende maximale Spannungsabfall $p'_{\max}$ (siehe Fig. 11) steht in folgender Beziehung zum Wert $p_{\max}$ bei gleichem Potential der Speisepunkte:

$$p'_{\max} = \frac{p_{\max}^2}{p_{\max} - \frac{\Delta p}{4}}$$

Da hierin alle Grössen vom Potential p_a aus gemessen sind, gilt der Ausdruck gleicherweise auch für den Fall, wo der Wert des ersteren durch Verringerung des Widerstandes des

Kabels in A um den Betrag Δp verkleinert wird. In jedem Fall erfährt dadurch der neue maximale Spannungsabfall eine Vergrößerung und damit nach Fig. 11 auch der Höchstwert der Erdstromdichte in A und C. Wie die Figur zeigt, liegen hierbei die beiden Korrosionsbereiche nicht mehr symmetrisch zur Mitte der Strecke. Durch die Höherlegung des Parabelastes in B wird die Erdstromdichte in diesem Punkte verkleinert, so dass $\delta'_b < \delta_b$, wobei allerdings die Gefährdung in A entsprechend vergrößert wurde. Diese Unsymmetrie kann u. U. erwünscht sein, wenn bei negativen Speisepunkten z. B. in A keine, dafür in B besondere Korrosionsgefahr vorliegt. Durch Erhöhung des Potentials des Speisepunktes B kann so das Korrosionsbereich von der gefährlichen Seite auf das ungefährliche Streckenende verschoben werden. Liegen die Schienenspeisepunkte am positiven Maschinenpol, so fällt dieser Vorteil dahin, indem jede Unsymmetrie eine Erhöhung der Potentialdifferenz v_c d. h. eine Vergrößerung der Korrosionsgefährdung zur Folge hat. Diese Ueberlegungen führen zum Schluss, dass jede Verschiebung in der Spannungsgleichheit der Schienenspeisepunkte einer befahrenen Strecke eine Vergrößerung der Korrosionsgefährdung am Rohr nach sich zieht, wenn erstere am positiven Maschinenpol liegen. Der Spannungsunterschied negativer Schienenspeisepunkte hat eine Verschiebung der Korrosionsgefährdung vom Streckenende höheren Potentials zu jenem niedrigen Potential zur Folge. In jedem Fall wird der totale Rohrstrom vergrößert.

Die Spannungsgleichheit der Speisepunkte ist allgemein zur möglichsten Verringerung des Rohrstroms anzustreben, doch muss in gegebenem Fall untersucht werden, ob nicht durch eine Verschiebung der Spannungen ein besonderes gefährliches Korrosionsbereich entlastet werden könne, insofern die damit geschaffene Unsymmetrie in der Spannungsverteilung der Schiene keine nachteiligen Folgen an anderem Ort erzeugt.

E. Die Korrosionserscheinungen an Rohren und Kabeln, die das Bahngeleise kreuzen.

Bis jetzt ist der vereinfachte Fall betrachtet worden, wo das gefährdete Rohr oder Kabel den Schienen parallel verlegt ist und weiter nicht in ein anderes Schienenbereich fällt. Die erste Voraussetzung trifft für eine grosse Zahl von Hauptrohrsträngen zu, die z. B. im Fall städtischer Strassenbahnanlagen mit deren Hauptlinien denselben Strassenzügen folgen. Die quer zum Hauptrohr abzweigenden Verbindungs- und Anschlussrohre weisen aber erfahrungsgemäss ebenso häufige Korrosionserscheinungen auf an Stellen, die dem Geleise als Kreuzungspunkt am nächsten liegen. Ohne die Mannigfaltigkeit dieser Verhältnisse näher verfolgen zu können, sei im Folgenden auf einige charakteristische Fälle und die dabei massgebenden Faktoren für die Gefährdung hingewiesen.

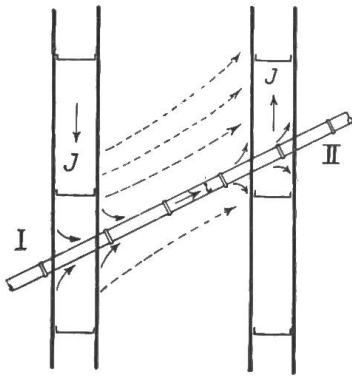


Fig. 12.

Angenommen ein Rohrstrang kreuze zwei Geleise eines Bahnnetzes in den Punkten I und II. Er möge vor- und nachher kein Erdstromgebiet berühren. In Fig. 12 ist angenommen, das eine Schienenpaar weise im Kreuzungspunkt I ein höheres Potential auf, als das Geleise im Punkt II. An dem dadurch entstehenden Erdstrom nimmt die Rohrleitung als Nebenschluss teil mit dem Einzugsgebiet in I und dem Korrosionsbereich in II. Die Grösse des spezifischen Erdstroms folgt qualitativ auch hier den früher abgeleiteten Beziehungen (Abhängigkeit von Spannungsgefälle, Erdwiderstand und Rohrdurchmesser), für die Gefährdung ist aber weiterhin noch die Veränderlichkeit der Spannungsdifferenz I II im betrachteten Zeitabschnitt von Einfluss. Diese hängt von den Betriebsverhältnissen auf den beiden Bahnstrecken

ab und wird daher praktisch eine ausserordentliche Mannigfaltigkeit aufweisen. Zum Beispiel:

Die beiden Strecken sind gleichmässig belastet und beidseitig gespeist. Die Kreuzungspunkte I und II liegen in ungefähr gleichen Abständen vom Speisepunkt. Dann werden diese ungefähr gleiches Potential aufweisen und die Potentialdifferenz I-II bzw. zwischen Rohr und Schiene muss sehr gering ausfallen. Sind aber die Potentiale der Speisepunkte infolge verschiedenen Widerstandes der Kabel oder mit Absicht (siehe vorigen Abschnitt) ungleich, so fliesst ein dauernder Erdstrom in der Rohrleitung mit Korrosionserscheinungen am gefährdeten Ende. Das gleiche kann eintreten, wenn die Potentiale der Speisepunkte wohl gleich, die Kreuzungspunkte aber in wesentlich verschiedenen Abständen von letzteren liegen.

Die naheliegendste Schutzvorkehrung von seiten des Bahnbetriebes liegt für beide Fälle wiederum in der Anpassung der Speisepunktspannungen zur Einstellung einer möglichst kleinen Spannungsdifferenz zwischen den fraglichen Kreuzungspunkten.

Bei einfachem Pendelbetrieb jeder Strecke oder beim Kreisbetrieb über beide Strecken mit wenigen Wagen ist der Fall periodischen Wechsels der Richtung des Spannungsgefälles zwischen den Kreuzungspunkten möglich. Hierbei kann die Gefährdung trotz relativ hoher Erdstromdichten praktisch Null werden. Wir verweisen hierüber auf das auf Seite 138 Gesagte.

Eine andere und vielleicht häufigere *Korrosionsgefährdung bei Kreuzung von Rohr und Schiene* tritt an Abzweigrohren von Hauptleitungen auf, die parallel zu Schienen verlegt sind. Fig. 13 illustriert den Fall. Steht infolge der Betriebsverhältnisse das Schienenpotential dort, wo die Rohrabzweigung das zweite Geleise kreuzt, vorübergehend oder dauernd tiefer als am ersten Geleise im Korrosionsbereich, so strömt u. U. ein beträchtlicher Teil

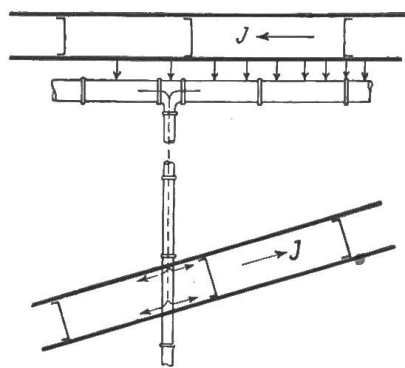


Fig. 13.

des gesammelten Rohrstroms i durch die Abzweigleitung nach dem von der Abzweigung gekreuzten Geleise. Da das im Kreuzungspunkt entstehende Korrosionsbereich von verhältnismässig kleiner Ausdehnung ist (auf der Hauptleitung dehnt es sich auf die halbe Streckenlänge aus), so müssen bedeutend grössere Erdstromdichten und damit eine entsprechend grössere Gefährdung auftreten. Bei gegebener Spannungsdifferenz ist der Erdstrom im Abzweigrohr um so grösser, je weiter sich das Einzugsgebiet des Hauptrohrs ausdehnt. Es können daher bei grossen Rohrnetzen in solchen Abzweigungen, die Schienen kreuzen, ganz bedeutende Erdströme zur Ausgleichung kommen. Aus diesem Grunde ist darnach zu trachten, die Ausbildung der Erdstromstärke im Hauptrohr an jedem Ort nach Möglich-

keit zu beschränken, auch wenn auf der betreffenden Strecke das Bestehen eines grösseren Rohrstroms keine besondere Gefährdung zur Folge haben sollte. Schutzvorkehrungen, wie Erdplatten an Rohren und Schienen, leitende Verbindungen zwischen Rohr und Schiene u. a. m., die eine Verminderung der Erdstromdichte in irgend einem einzelnen Korrosionsbereich anstreben, sind daher für verzweigte Rohrnetze, als die Gefährdung der Rohranlage als solche erhöhend, nicht zu empfehlen.

(Fortsetzung im nächsten Heft.)