

Ueber die Verwendbarkeit eiserner Fahrleitungen für Wechselstrombahnen

Autor(en): **Kummer, W.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **69/70 (1917)**

Heft 25

PDF erstellt am: **20.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-33989>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

INHALT: Ueber die Verwendbarkeit eiserner Fahrleitungen für Wechselstrombahnen. — Wettbewerb für ein Pfarrhaus in Davos. — Vom Geist der Gotik. — Geologische und hydrologische Beobachtungen über den Mont d'Or-Tunnel und dessen anschließende Gebiete. — Die Geschichte des Transformators. — Miscellanea: Untersuchungen über den Lichtbogen unter Druck. Schweizerischer Bundesrat. Härten von

Aluminiumbronze. Ausbau der Wasserkräfte auf Neu-Seeland. Die Friedhofkunst-Ausstellung. Ueber die Vermeidung von Schwitzwasser in Gebäuden. Ein Héroult-Elektrostahlöfen für 20 t Einsatz. — Nekrologie: O. Bloch. — Preisausschreiben des Vereins deutscher Eisenbahn-Verwaltungen. — Korrespondenz. — Literatur. — Vereinsnachrichten: G. e. P.: Stellenvermittlung.

Band 70. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet. Nr. 25.

Ueber die Verwendbarkeit eiserner Fahrleitungen für Wechselstrombahnen.

Von Prof. Dr. W. Kummer, Ingenieur, Zürich.

Nachdem bekannt geworden ist, dass bei der bevorstehenden Einrichtung des elektrischen Betriebs auf wichtigeren Bahnstrecken des schweizerischen Eisenbahnnetzes möglicherweise eiserne Fahrleitungen zur Verwendung kommen dürften¹⁾, erscheint es angezeigt, auf die besondern Verhältnisse hinzuweisen, die in manchen Fällen die Verwendung solcher Leitungen erheblich erschweren. Seit 1900 besteht bereits eine grössere Zahl von Veröffentlichungen über Rechnungen und Erfahrungen an eisernen Leitungen im Dienste der allgemeinen Kraftübertragung mit Wechselstrom; jedoch gibt es, soweit uns bekannt ist, noch keine Literatur über Rechnungen und Erfahrungen an eisernen Fahrdrähten für Wechselstrombahnen. Es soll deshalb versucht werden, auf Grund der Erfahrungen an eisernen Freileitungen der gewöhnlichen Wechselstrom-Übertragung die Verwendbarkeit eiserner Fahrleitungen für Wechselstrombahnen zu prüfen. Der Schwerpunkt einer solchen Betrachtung liegt offenbar in der Prüfung der Verhältnisse des effektiven und des induktiven Spannungsabfalls in solchen Leitungen.

Der Bahnbetrieb mittels einphasigem und dreiphasigem Wechselstrom hat allerdings ähnliche Verhältnisse bereits in der elektrischen Schienenrückleitung kennen gelehrt. Es besteht aber die Gefahr, dass gerade die bisherigen, verhältnismässig günstigen Erfahrungen mit der Schienenrückleitung zu einer Unterschätzung der Schwierigkeiten bei eisernen Fahrleitungen führen dürften. Eine einfache Extrapolation ist deswegen unstatthaft, weil einerseits die in der Schienenrückleitung benutzte Stromdichte rund 20 mal kleiner ist, als sie jedenfalls in den Fahrdrähten mindestens vorhanden sein wird, und weil andererseits die allenfalls zu erwartenden Betriebschwierigkeiten eiserner Fahrdrähte gerade bei solchen Stromdichten auftreten werden, wie sie im praktischen Betrieb nicht vermieden werden können. Dabei handelt es sich besonders um den effektiven Widerstand R eiserner Leitungen, der den Ohmschen oder Gleichstrom-Widerstand R_0 recht erheblich übertrifft, wie an Hand des

Verhältnisses:

$$k = \frac{R}{R_0} \quad (1)$$
 aus den in Abbildung 1 veranschaulichten Kurven der die bei 50 Perioden die Werte k für massive Eisendrähte verschiedener Dicke darstellt, ist aus einer Reihe analoger Versuchsergebnisse herausgenommen, die vom „Verband Deutscher Elektrotechniker“ 1914 und 1915²⁾ mit Rücksicht auf die seit Juli 1914 gesteigerte Anwendung eiserner Freileitungen bekannt ge-

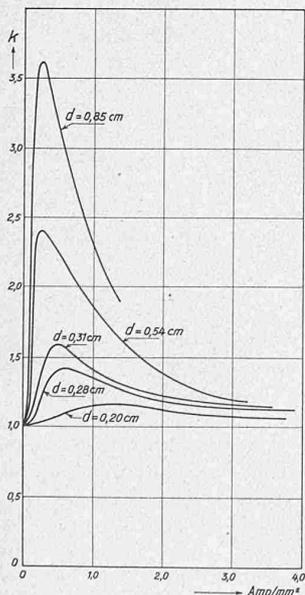


Abb. 1. Verhältnis k des Wechselstrom-Widerstandes zum Gleichstrom-Widerstand für massive Eisendrähte bei 50 Per (Versuche an Schleifen von 60 m Länge 92 m Breite, nach ETZ 1905, Seite 45).

sichtlich ist. Diese Abbildung, ist aus einer Reihe analoger Versuchsergebnisse herausgenommen, die vom „Verband Deutscher Elektrotechniker“ 1914 und 1915²⁾ mit Rücksicht auf die seit Juli 1914 gesteigerte Anwendung eiserner Freileitungen bekannt ge-

¹⁾ Vergl. die Notiz auf S. 259 dieses Bandes (1. Dez. 1917). *Red.*
²⁾ E. T. Z. 1914, Seite 1109, und 1915, Seite 44.

geben wurden, und die, soweit massive Leiter in Betracht kommen, durchaus übereinstimmende Ergebnisse zeitigen. Es mag daran erinnert werden, dass die Widerstandsdifferenz $R - R_0$ in der Hauptsache durch die sogenannte Stromverdrängung oder Hautwirkung (Skinneffekt), bzw. durch die ungleichmässige Stromverteilung in von Wechselströmen durchflossenen Leitern verursacht ist, und bei magnetisierbaren, also besonders bei eisernen Leitern, die erheblichen Zahlenwerte bedingt, die aus Abbildung 1 hervorgehen; ein kleinerer Anteil der Widerstandsdifferenz $R - R_0$ eiserner Leiter ist auf Verluste durch Ummagnetisierung (Hysteresis-Verluste) zurückzuführen. Indem wir die Maxima der Kurven in Abbildung 1 herausgreifen und die bezüglichen Werte k_{max} über den zugehörigen Drahtdicken d auftragen, erhalten wir Abbildung 2, die den linearen Zusammenhang von k_{max} und d zum Ausdruck bringt, den wir auch durch viele andere Kurvenbilder nach Art von Abbildung 1 bestätigt finden. Der aus Abbildung 2 hervorgehende lineare Zusammenhang von k_{max} und d gilt auch für beliebige k und d bei gleichen magnetischen Zuständen in den Drähten und ist mit der Berechnung der Hautwirkung a priori, die zuerst durch Lord Kelvin gegeben wurde, angenähert im Einklang. An Stelle der strengen Lösung, die in Reihen oder in Bessel'schen Funktionen dargestellt werden müsste, benutzen wir die nachstehend mitgeteilten Näherungsformeln zur praktischen Verwertung. Wird die magnetische Permeabilität des Eisens mit μ , die Periodenzahl des Wechselstroms mit ν , der spezifische Widerstand des Eisens (in CGS-Einheiten) mit ρ bezeichnet, so gilt als charakteristisch die Grösse:

$$x = \frac{\pi \cdot d}{2} \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot \nu}{\rho}} \quad (2)$$

Bei Freileitungen wird für diese Charakteristik im Gebiete der praktisch vorkommenden Drahtdicken und Periodenzahlen stets gelten:

$$x > \sqrt{2}$$

Dann kann die von J. Zenneck¹⁾ mitgeteilte Näherungsformel:

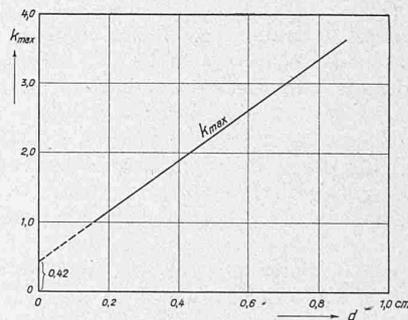


Abb. 2. Darstellung der Werte k_{max} aus Abb. 1 über der Drahtdicke d .

$$k = \frac{1}{4} + x \quad (3)$$

an Stelle der strengen Lösung mittels Bessel'scher Funktionen benutzt werden. Schreibt man diese Näherungsformel explicite aus, so lautet sie

$$k = \frac{1}{4} + \frac{\pi \cdot d}{2} \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot \nu}{\rho}}$$

sie lässt den linearen Zusammenhang von k mit d erkennen, wie wir ihn schon in Abbildung 2 für die Maxima der Werte k der Kurven der Abbildung 1 feststellten. Für Abbildung 2 lautet die Gleichung der Geraden, wie sie allgemein durch Formel (3) gegeben ist, numerisch:

$$k_{max} = 0,42 + 3,7 \cdot d$$

Statt der Zahl 0,25 in Gleichung (3) haben wir hier die Zahl 0,42, die jene namentlich wegen des Hysteresiseffektes übertrifft, da durch Gleichung (3) natürlich nur der reine Skinneffekt ausgedrückt wird. Mit Hilfe der Beziehung:

$$3,7 \cdot d = \frac{\pi \cdot d}{2} \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot \nu}{\rho}}$$

¹⁾ Ann. d. Phys., Bd. 11, Seite 1135 (1903).

lässt sich die Permeabilität μ bestimmen; bei Annahme eines spez. Widerstandes $\varrho = 13000$, in *CGS*-Einheiten, finden wir einen Wert:

$$\mu = \sim 1450.$$

Die Grössen k und μ sind jede für sich auch abhängig von der Periodenzahl ν , da diese den Charakter der Stromverdrängung erheblich beeinflusst. Da bei den, unsern Abbildungen zu Grunde liegenden Versuchen ν konstant blieb, so liefern diese keinen Beitrag zur Kenntnis des Zusammenhangs von k und μ mit ν . Aus andern bekannt gewordenen Versuchsdaten kann man aber ersehen, dass k mit steigendem ν wächst, während μ mit steigendem ν abnimmt. Blicke μ von ν unbeeinflusst, dann würde gemäss der Formel:

$$k = \frac{1}{4} + \frac{\pi \cdot d}{2} \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot \nu}{\varrho}}$$

die Grösse k linear mit $\sqrt{\nu}$ variieren. Wegen des schon erwähnten Zusammenhangs zwischen μ und ν wird aber der Zusammenhang von k mit ν komplizierter. Auf Grund des uns vorliegenden Zahlenmaterials glauben wir, dass für den praktischen Zweck der Berechnung des effektiven Spannungsabfalls in Bahn-Fahrdrähten bei den dabei vorkommenden Periodenzahlen, Formen und Ausmassen der Fahrdrabt-Querschnitte ein Zusammenhang:

$$k_{\max} = 0,5 + d \cdot \sqrt[3]{\nu} \quad \dots \quad (4)$$

brauchbar ist, wenn d den Durchmesser des dem Fahrdrabt-Querschnitte flächengleichen Kreises in *cm* darstellt.

Nun muss aber auch der Wert μ bei verschiedenen Periodenzahlen bekannt sein, um zur Berechnung des induktiven Spannungsabfalls in die üblichen Induktionskoeffizienten eingesetzt zu werden, wobei dann aber andere Werte von μ benutzt werden müssen, als diejenigen, die sich, wie oben gezeigt, aus k ableiten lassen. Es gelten nämlich die in üblicher Weise definierten Induktionskoeffizienten nur für gleichmässige Stromverteilung in elektrischen Leitern und müssen bei streng analytischer Vorausberechnung mittels Bessel'scher Funktionen erst korrigiert werden, um auch für den Fall ungleichmässiger Stromverteilung benutzbar zu bleiben. Durch Zenneck sind auch hier wieder Näherungsformeln anstelle der strengen und komplizierten Formeln für diese Korrekturen angegeben worden. Wir verzichten auf deren Wiedergabe, weil die bezügliche analytische Berechnung, übrigens auf Grund derselben Grösse x , die für die analytische Berechnung von k in Frage kommt, weniger zuverlässig ist, als die leicht mögliche direkte Benutzung von bezüglichen Versuchsergebnissen. Solche Versuche sind namentlich durch *L. Lichtenstein* bekannt gegeben worden¹⁾; er hat an kreisrunden Eisenstangen durch Kurzschluss-Versuche bei verschiedenen Periodenzahlen die Spannungskomponenten direkt bestimmt und auf Grund der in üblicher Weise definierten Induktionskoeffizienten die Werte von μ derart angegeben, dass sie nicht ihrem physikalischen Werte nach, sondern koeffizienten-gemäss, d. h. *einschliesslich* der für die Berücksichtigung der Hautwirkung erforderlichen Korrekturen festgelegt sind. Allerdings sind die verwendeten Eisenstangen, für die bei denselben Versuchen gleichzeitig übrigens auch die Grössen k ermittelt wurden, von wesentlich grösserem Querschnitt, als ein solcher für Fahrdrähte in Frage kommt; es haben die bezüglichen Versuche für Fahrdrähte daher nur qualitatives Interesse, sie dienen eben ihrem Urheber als Vorversuche für die Ermittlung der Spannungsverteilung und der Verluste in den *Schienen* der Bahngeleise, auf deren Resultate wir ebenfalls noch zu sprechen kommen werden.

Nach verschiedenen bekannt gewordenen Einzelerfahrungen über den Spannungsabfall in Freileitungen von Wechselstromanlagen darf man für die bei Bahnen in Betracht kommenden Periodenzahlen, sowie Formen und Ausmassen eiserner Fahrdrähte für diese zur Ermittlung der Induktionskoeffizienten mit Werten der Permeabilität rechnen, die in Abhängigkeit von ν der Formel:

$$\mu = 2,0 \cdot (100 - \nu) \quad \dots \quad (5)$$

¹⁾ E. T. Z. 1907, Seite 620 und Seite 646.

entsprechen. Damit ist alles Erfahrungsmaterial zusammengestellt, das für die Verwendung eiserner Drähte als Bahnfahrdrähte benötigt wird und auf Grund der Formeln (1) (4) und (5) zur praktischen Berechnung des effektiven und des induktiven Spannungsabfalls verwertbar ist.

Ueber den Spannungsabfall in den, zur sogenannten Stromröhre benutzten *Bahngeleisen* kann das seit langem bereit liegende Erfahrungsmaterial weiter verwertet werden, zu dem besonders die schon erwähnte Arbeit von Lichtenstein wertvolle Unterlagen geliefert hat; entsprechend den viel kleineren Stromdichtewerten in den Schienen weichen diese Unterlagen von den oben gegebenen Unterlagen erheblich ab. Das ist auch aus der analytischen Berechnung der Verhältnisse der Stromverdrängung zu erwarten. Ersetzen wir nämlich den Schienenquerschnitt des gewöhnlichen Profils durch einen Kreisquerschnitt mit einem äquivalenten Durchmesser d , so könnte vielleicht der charakteristischen Grösse:

$$x = \frac{\pi \cdot d}{2} \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot \nu}{\varrho}}$$

wegen des beträchtlich verminderten Wertes von μ , sowie allenfalls auch mit Rücksicht auf besonders hohe Werte von ϱ ein Betrag:

$$x < 1$$

entsprechen, für den nach einer der von Zenneck gegebenen Näherungsformeln:

$$k = 1 + \frac{x^4}{3} \quad \dots \quad (6)$$

zu setzen wäre. Damit würde der Zusammenhang zwischen k und d wesentlich anderer Art sein, als er für die Fahrdrähte festzustellen war. Leider mangelt es an Veröffentlichungen über Verluste durch Skineneffekt bei Schienen mit sehr stark abweichenden Querschnitten¹⁾. Die erwähnten Versuche von Lichtenstein betreffen, soweit sie für eigentliche Geleise-Schienen angestellt wurden, nur den einen, bei der Berliner Schnellbahnstrecke „Marienfelde-Zossen“ verwendeten Typus mit einem Querschnitt $q = 56,1 \text{ cm}^2$ der einzelnen Schiene. Anlässlich der Ausarbeitung unmittelbar praktisch verwertbarer Formeln zur Bestimmung des Spannungsabfalls bei Einphasen- und Dreiphasen-Bahnen mit kupfernen Fahrdrähten hat *G. Huldshiner*²⁾ aus den Versuchen Lichtensteins hinsichtlich des *effektiven*, in Ohm pro *km* anzugebenden Schienenwiderstandes R im Vergleich zum entsprechenden Gleichstromwiderstand R_0 auf einen Zusammenhang:

$$R = R_0 + \frac{\nu \cdot q}{1,4 \cdot 10^4}$$

geschlossen. Berücksichtigt man, dass für R_0 ein Ausdruck:

$$R_0 = \frac{\varrho_e}{q} \cdot 10^{-4}$$

zulässig ist, wenn der, ebenfalls in *CGS*-Einheiten ausgedrückte Widerstandsanteil der Schienenverbindungen pro *cm* Schienenlänge, in ϱ_e hineingenommen wird, dann folgt:

$$k = 1 + \frac{1}{R_0} \cdot \frac{\nu \cdot q}{1,4 \cdot 10^4} = 1 + \frac{\nu \cdot q^2}{\varrho_e} \cdot \frac{1}{1,4}$$

Nach dieser Schreibweise wäre im Sinne der Formel (6) die Grösse k in einen linearen Zusammenhang mit q^2 bzw. mit d^4 gebracht. Nun muss aber Formel (6), die nur für $x < 1$ gültig ist, Werte von k liefern, die dem Werte x sehr nahe liegen. Das ist aber nach den Versuchen von Lichtenstein bei Schienen nicht der Fall und es ist die bezügliche Formel von Huldshiner daher unbefriedigend. Es erlangt k auch in den Schienen tatsächlich ansehnliche Werte, und wird x dabei wohl nur ausnahms-

¹⁾ Die 1911 auf Seite 529 und auf Seite 538 des «Bulletin de la Société Internationale des Electriciens» veröffentlichten Messungen von *C. Villiers* und von *P. Boucherot* an Schienen mit 65 und 42 und 13 *cm*² Querschnitt scheinen uns nicht verwendbar zu sein, weil sie einerseits an zu kurzen Stücken (von nur 2,9, bzw. 2,5 *m* Länge) vorgenommen wurden und weil andererseits Messungen mit Gleichstrom für die beiden kleineren Querschnitte überhaupt nicht ausgeführt wurden. — Die neuesten Messungen von *A. E. Kennelly* sind uns bislang in der Originalveröffentlichung in Bd. 182 des «Journal of the Franklin Institute» nicht zugänglich geworden und konnten hier deshalb nicht berücksichtigt werden.

²⁾ E. T. Z. 1910, Seite 1206.

weise in der Gegend von 1 liegen. Andererseits wird x unzweifelhaft kleiner sein, als für Fahrdrähte, für die $x > \sqrt{2}$ gesetzt werden darf, und für die der Zusammenhang nach der analytischen Formel (3) sich im Grossen und Ganzen als zutreffend erwiesen hat. Deswegen scheint uns, übrigens im Einklang mit der Analysis, für Schienen eine Zwischenformel zwischen den Schemata der Formeln (3) und (6) am Platze zu sein, die wir auf Grund der in unserer Abbildung 3 dargestellten Hauptresultate der Versuche Lichtensteins in der Schreibweise:

$$k = 1 + \nu \cdot q \cdot \frac{2,1}{10^3} \quad (7)$$

geben möchten. Es ist interessant, die Abbildungen 1 und 3 zu vergleichen und festzustellen, dass bei Schienen k im praktisch wichtigen Stromdichte-Bereich zwischen 0,02 und 0,04 A/mm^2 wirklich als annähernd konstant gelten darf, während k bei Drähten von $d \geq 0,3 \text{ cm}$ das scharf ausgesprochene Maximum im dabei ebenfalls wichtigen Stromdichtebereich von 0,2 bis 0,4 A/mm^2 hat.

Da schon die bisherige Praxis der Spannungsberechnungen an kupfernen Leitungen mit den ungünstigsten Werten der praktisch vorkommenden Stromstärken und also auch Stromdichten rechnet, dürfte es gerechtfertigt sein, für das k eiserner Fahrdrähte ebenfalls mit solchen Werten, d. h. hinsichtlich der effektiven Spannungskomponente eben mit den Werten k_{\max} zu rechnen. Nun ist aber zu beachten, dass die übliche Berechnung der Spannungsverhältnisse beim maximalen Betriebsstrom der Bahnfahrleitungen für eiserne Fahrdrähte unter Umständen, vielleicht sogar in der Regel, auf Stromdichten im eisernen Fahrdrabt führt, für die die Kurven von k das Maximum überschritten haben und Werte k aufweisen können, die extrem nur den dritten oder gar den vierten Teil von k_{\max} ausmachen. Das Resultat würde sein, dass unsere Rechnung sich als zu pessimistisch erweisen müsste. Um diesem Einwurf zu begegnen, könnte man für den eisernen Fahrdrabt mit einem Mittelwerte k_{mittel} rechnen, ähnlich wie es hinsichtlich der Schienenrückleitung geschieht. Bei Annahme derartiger Mittelwerte würden dann für die maximalen Betriebsströme die Spannungsverhältnisse annähernd richtig vorausberechnet, wohingegen aber gerade bei mittlern Betriebsströmen der Spannungsabfall viel zu klein berechnet werden würde. In ausgedehnten Speisebezirken könnten sich dann durch Zusammenwirken mehrerer mittelstark, aber gerade bei Eintreffen von Werten k_{\max} , belasteter Streckenabschnitte Spannungszustände einstellen, die, besonders durch ihre Häufigkeit, lästiger fallen müssten, als besonders hohe Spannungsschwankungen, die sich, wie bei kupfernen Fahrleitungen, nur bei extrem hohen Stromstärken einzustellen pflegen. Wir vertreten deshalb die Ansicht, dass man gut tut, für Fahrdrähte aus Eisen ohne weiteres mit k_{\max} zu rechnen, weshalb wir auch in unsern obenstehenden Ausführungen in erster Linie den Charakter der Grösse k_{\max} betrachtet haben.

Vergleichen wir für Fahrdrähte und Schienenrückleitungen die Abhängigkeit der Grösse k , beziehungsweise der Grösse k_{\max} von der Periodenzahl ν , so ist diese Abhängigkeit einerseits durch die Formel (4), andererseits durch die Formel (7) zum Ausdruck gebracht; es liegt auf der Hand, dass der verschiedene Charakter der Funktion $f(\nu)$, die für k , beziehungsweise für k_{\max} gültig ist, ebenso in den durchaus andern Stromdichtewerten in eisernen Fahrdrähten und in eisernen Schienen begründet ist, wie der oben erörterte Zusammenhang von d und k , bzw. von q und k .

Zur Berechnung des induktiven Spannungsabfalls in den Geleisen, bzw. zur Einführung in die Induktions-

koeffizienten, hat Huldshiner in der oben erwähnten Arbeit die ebenfalls von Lichtenstein gelieferten Unterlagen für die Permeabilität des Schieneneisens in eine zweckentsprechende Formel gefasst. Diese Formel, die den Zusammenhang von μ mit ν für Normalbahnschienen zum Ausdruck bringt, lautet:

$$\mu = 25 - \frac{\nu}{2,8} \dots \dots \dots (8)$$

Die Versuche Lichtensteins, auf die diese Formel (8) sich stützt, wurden wieder in der Weise vorgenommen, dass in μ die in den Induktionskoeffizienten für die Berücksichtigung der Hautwirkung erforderlichen Korrekturen inbegriffen sind.

Es sollen nun, bei Beschränkung auf Einphasenbahnen, die für eine Berechnung des Spannungsabfalls in Fahrleitungen und Schienen in Betracht fallenden Formeln mitgeteilt und durch ein Zahlenbeispiel verdeutlicht werden, wobei zum Vergleich das eine Mal eine kupferne und das andere Mal eine eiserne Fahrleitung in Betracht gezogen werden soll¹⁾. Für die Schienenrückleitung und für die Fahrleitung aus Kupfer bedienen wir uns dabei der von Huldshiner zusammengestellten Formeln, während wir für die Fahrleitung aus Eisen die betreffenden Formeln rechnungsgemäss abändern.

Nach dem von Huldshiner angewandten Schema bezeichnen wir die aus Fahrleitung und Schienenrückleitung gebildete Stromschleife als „1-2“, wobei die Ziffer 1 sich auf die zwei Fahrschienen mit der Permeabilität μ_1 und mit dem gegenseitigen Abstand D_{11} bezieht, während die Ziffer 2 den Fahrdrabt bezeichnet, der, in der Höhe D_{12} über Schienenoberkante, in der Vertikalebene mitten zwischen beiden Schienen aufgehängt sein soll. Bezeichnet man noch mit a_1 und a_2 die für die beiden Leiter 1 und 2 in Betracht kommenden äquivalenten, bzw. wirklichen Radien, stellt man weiter fest, dass alle Längen in cm ausgedrückt sein müssen, dann gilt für die in Volt pro km gemessene induktive Komponente ϵ_σ des zum Strome J (in Ampère) gehörenden Spannungsabfalls bei kupfernem Fahrdrabt die Beziehung:

$$\epsilon_\sigma = \frac{4 \pi \nu \cdot J}{10^4} \cdot \left(\lg \frac{D_{12}^2}{\sqrt{a_1 \cdot D_{11} \cdot 0,78 \cdot a_2}} + \frac{\mu_1}{8} \right) \dots (9)$$

Hat jede der zwei Schienen den Gleichstromwiderstand R_1 in Ohm pro km , hat ferner der Fahrdrabt den Widerstand R_2 in Ohm pro km , dann folgt für die in Volt pro km ausgedrückte effektive Komponente des Spannungsabfalls:

$$\epsilon_\rho = J \cdot R_2 + \frac{J}{2} \cdot R_1 \cdot \left(1 + \nu \cdot a_1^2 \cdot \frac{6,6}{10^3} \right) \dots (10)$$

Der resultierende oder totale Spannungsabfall der Schleife 1 bis 2 hat dann den Wert:

$$\epsilon_{\text{total}} = \sqrt{\epsilon_\sigma^2 + \epsilon_\rho^2} \dots \dots \dots (11)$$

Für einen eisernen Fahrdrabt von der Permeabilität μ_2 sind die Gleichungen (9) und (10) zu ersetzen durch die folgenden Gleichungen (12) und (13):

$$\epsilon_\sigma = \frac{4 \pi \nu \cdot J}{10^4} \cdot \left(\lg \frac{D_{12}^2}{\sqrt{a_1 \cdot D_{11} \cdot a_2}} + \frac{\mu_1 + 2 \cdot \mu_2}{8} \right) \dots (12)$$

$$\epsilon_\rho = \frac{J}{2} \cdot R_1 \cdot \left(1 + \nu \cdot a_1^2 \cdot \frac{6,6}{10^3} \right) + J \cdot R_2 \cdot \left(0,5 + 2 \cdot a_2 \sqrt{\nu} \right) (13)$$

Dabei sind μ_1 nach Gleichung (8) und μ_2 nach Gleichung (5) zu bestimmen.

An einem Zahlenbeispiel soll nun der Unterschied des totalen Spannungsabfalls pro km Hin- und Rückleitung für kupferne und für eiserne Fahrdrähte von je 50, 100 und 150 mm^2 Querschnitt anschaulich vorgeführt werden. Als Geleise wählen wir das S. B. B.-Geleise, Profil I von 45,93 kg Schienengewicht pro laufendem Meter und 4,31 cm äquivalenten Radius für die 58,51 cm^2 messende Querschnittsfläche. Für diese Geleise-Verhältnisse und für Fahrdrähte aus Kupfer hat die Schweiz. Studienkommission für elektrischen Bahnbetrieb die Ergebnisse von Rechnungen

¹⁾ Dabei nehmen wir, wie in solchen Rechnungen bislang üblich, keine Rücksicht auf die durch Geleise-Streuströme (sog. vagabundierende Ströme) bewirkte Störung in der «Rückleitung» des Fahrstroms,

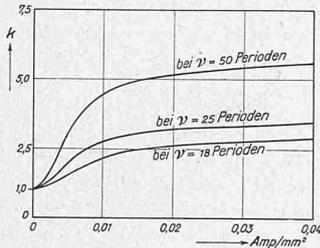


Abb. 3. Verhältnis k des Wechselstrom-Widerstandes zum Gleichstrom-Widerstand für Eisenbahnschienen von 51.6 cm^2 Querschnitt (nach Versuchen v. L. Lichtenstein, ETZ 1907, Seite 625 u. ff.).

Tafel I: Geleise samt kupfernen Fahrleitungen für Wechselstrom-Betrieb.

Period. pro sek	Spannungsabfall in Volt pro km und Ampère								
	Ein Fahrdraht von 50 mm ²			Ein Fahrdraht von 100 mm ²			Ein Fahrdraht von 150 mm ²		
	ϵ_0	ϵ_σ	ϵ_{total}	ϵ_0	ϵ_σ	ϵ_{total}	ϵ_0	ϵ_σ	ϵ_{total}
0	0,35	0,00	0,35	0,19	0,00	0,19	0,13	0,00	0,13
15	0,38	0,21	0,45	0,22	0,22	0,31	0,16	0,22	0,28
25	0,40	0,34	0,54	0,24	0,36	0,43	0,19	0,36	0,40
50	0,46	0,62	0,78	0,34	0,65	0,71	0,24	0,66	0,70

Tafel II: Geleise samt eisernen Fahrleitungen für Wechselstrom-Betrieb.

Period. pro sek	Spannungsabfall in Volt pro km und Ampère								
	Ein Fahrdraht von 50 mm ²			Ein Fahrdraht von 100 mm ²			Ein Fahrdraht von 150 mm ²		
	ϵ_0	ϵ_σ	ϵ_{total}	ϵ_0	ϵ_σ	ϵ_{total}	ϵ_0	ϵ_σ	ϵ_{total}
0	2,62	0,00	2,62	1,32	0,00	1,32	0,88	0,00	0,88
15	6,52	1,03	6,60	4,40	1,03	4,51	3,50	1,04	3,65
25	7,49	1,54	7,64	5,02	1,55	5,25	4,06	1,55	4,23
50	9,14	2,22	9,40	6,20	2,23	6,60	4,94	2,25	5,42

(ausgeführt durch Ing. A. Dänzer-Ischer, Bern) auf Grund der oben unter (9), (10) und (11) mitgeteilten Formeln, bzw. auf Grund gleichwertiger Formeln, veröffentlicht¹⁾, die wir hier nur noch für den Fall eiserner Fahrdrähte zu ergänzen haben, um den gewünschten zahlenmässigen Vergleich durchführen zu können. In obestehenden Zahlentafeln sind die bezüglichen Resultate zusammengestellt:

Die für eine Periodenzahl $\nu = 0$ gegebenen Zahlenwerte entsprechen ohne weiteres der Spannungsgrösse $\epsilon_0 = \epsilon_{total}$ für den Fall von Gleichstrom als Betriebsstrom.

Ein Vergleich der Werte ϵ_0 und ϵ_{total} für die Ausrüstung mit kupferner Fahrleitung einerseits und mit eiserner Fahrleitung andererseits zeigt die gewaltige wirtschaftliche Ueberlegenheit der erstern Ausrüstung für gleiche Querschnitte der Fahrleitung. Natürlich werden in praktischen Fällen die zwei Ausrüstungen überhaupt nicht für gleiche Fahrdrabt-Querschnitte verglichen, sondern es wird von vornherein auch das Vorhandensein allfälliger Verstärkungsleitungen zum Fahrdrabt berücksichtigt werden müssen, die ausserhalb des Lichtraumprofils der Bahn, z. B. an den Masten der Fahrleitung, geführt sein können und mit dem Fahrdrabt genügend oft elektrisch parallel geschaltet sind. Im Falle eiserner Fahrleitungen sind solche Verstärkungsleitungen, die zweckmässig aus Aluminiumseilen zu erstellen sind, im Hinblick auf den Spannungsabfall als überhaupt unentbehrlich zu betrachten; es ergeben sich dann andere Werte für den massgebenden Spannungsabfall pro km und Amp., die von Fall zu Fall besonders zu ermitteln sind.

Angesichts der nicht absolut einwandfreien Unterlagen, die uns zur Berechnung der massgebenden Grössen k und μ für Eisendrähte als Bahnfahrleitungen zur Verfügung stehen, können wir unsere Tafel II nicht als unbedingt zuverlässig bezeichnen; qualitativ dürfte sie jedoch das Verhalten der Eisenleitungen bei deren Verwendung als Bahnfahrdrähte für Wechselstrom-Betrieb hinreichend genau klarlegen. Wir erinnern hier auch noch an unsere weiter oben angebrachten Bemerkungen bezüglich der Verwendung der Werte k_{max} anstelle von Mittelwerten von k bei eisernen Fahrdrähten.

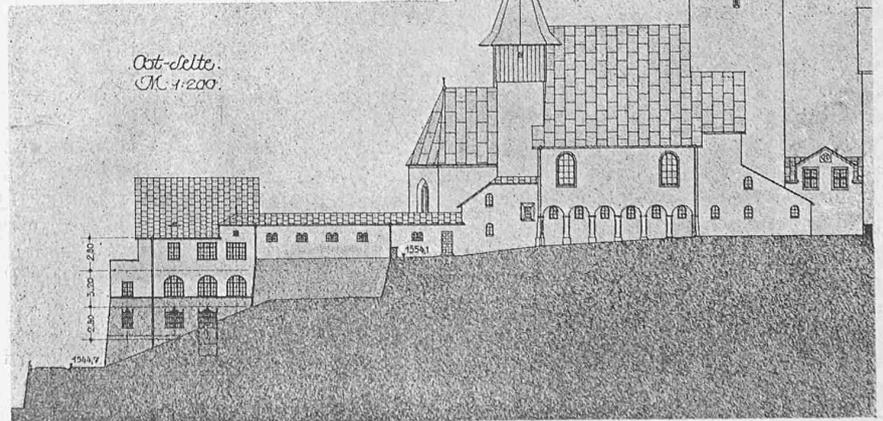
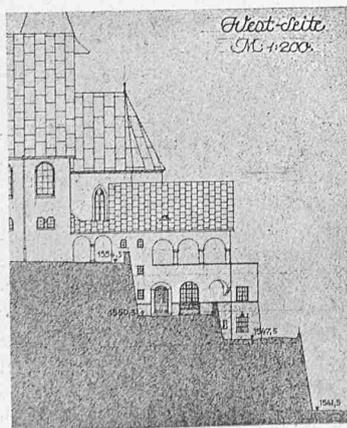
¹⁾ Seite 90 und 91 von Heft IV der »Berichte« der Schweizer. Studienkommission für elektrischen Bahnbetrieb.

Es verursacht keine besondern Schwierigkeiten, auch für Drehstrombahnen die Vergleichung der Spannungen ϵ_0 und ϵ_{total} für kupferne und eiserne Fahrdrabt-Ausrüstungen an einem bestimmten Bahntypus durchzuführen. Wir verzichten auf einen solchen Vergleich, der keine neuen Gesichtspunkte fördern dürfte.

Der Anwendung eiserner Fahrleitungen im Wechselstrombahnbetrieb sehen wir mit Interesse, aber nicht ganz ohne Sorge entgegen. Wenn eine Unterteilung der eisernen Fahrdrähte, ähnlich wie sie bei Eisenseilen vorliegt, ohne Nachteile für die Stromabnahme und Befestigung solcher Fahrdrähte durchführbar wäre, so müsste dies die Spannungsgrössen ϵ_0 und ϵ_{total} bedeutend verkleinern. In dieser Richtung dürfte wohl, abgesehen von der Anwendung passender Verstärkungsleitungen parallel zum Fahrdrabt längs der Bahnlinie, die aussichtsreichste Möglichkeit eines Fortschritts in der eigentlichen Anwendung eiserner Fahrleitungen für Wechselstrombahnen liegen.

Wettbewerb für ein Pfarrhaus in Davos.

Im Programm dieses engern Wettbewerbs (vergleiche Seite 98 in Nr. 8 vom 25. August 1917) war ausdrücklich auf das volkstümliche Bild des uralten »Berglihauses« hingewiesen und auf das gute Gesamtbild von Kirche und Pfarrhaus Wert gelegt; auch war die gemischte Bauweise von Stein und Holz freigestellt. Unsere Leser seien verwiesen auf die Darstellung der vor acht Jahren durch die Architekten Schäfer & Risch umgebauten Kirche St. Johann (Bd. LX, S. 336, vom 21. Dez. 1912). Der Verfasser des erstprämierten Entwurfs schreibt uns, dass seinem Vorschlag »Con chistro« die Absicht zugrunde liegt, gegen Schneetreiben und Wind geschützte Verbindungen zu schaffen mit dem (jetzt unbenutzten) Ankleideraum des Pfarrers und mit dem, leider ebenfalls unbenutzten, Konfirmandensaal über der Kirchen-Vorhalle. Wir haben deshalb diese Variante für unsere Darstellung des Wettbewerbs-Ergebnisses benützt.



1. Preis. Entwurf »Con chistro«. — Arch. R. Gaberel, Davos-Platz. — Fassaden und Geländeprofile 1:600.