

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 7 (1916)  
**Heft:** 3

**Artikel:** Ueber Messungen an Hochspannungskabeln im Leerlauf- und Kurzschlussversuch  
**Autor:** Kummer, W.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1057162>

### **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:** 25.12.2024

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

# SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

# BULLETIN

## ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

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

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

Generalsekretariat  
des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins,  
Neumühlequai 12, Zürich 1 - Telefon 9571

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

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.,  
Hirschengraben 80/82 Zürich 1      Telefon 6741

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 - Téléphone 9571

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 6741

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.

VII. Jahrgang  
VII<sup>e</sup> Année

Bulletin No. 3

März 1916  
Mars

## Ueber Messungen an Hochspannungskabeln im Leerlauf- und Kurzschluss-Versuch.

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

Die praktische Bedeutung von Messungen an Hochspannungskabeln im Leerlauf- und Kurzschluss-Versuch ist von G. Roessler erstmals im Hinblick auf das Projektieren von Kabelleitungen betont worden.<sup>1)</sup> Er bedient sich dabei der Begriffe des „Widerstandes des offenen“ und des „Widerstandes des kurz geschlossenen“ Kabels und setzt weiter voraus, dass diese Grössen durch Messungen im Leerlauf- und Kurzschluss-Versuch gewonnen werden; indessen könne man sie auch durch Vorausberechnung bestimmen.

In der nachfolgenden Entwicklung wird von neuem dargelegt, dass der Leerlauf-Versuch und der Kurzschluss-Versuch an Kabeln, im Hinblick auf deren Projektierung nach der Methode von Roessler, nicht verschiedene, sondern *identische* Zahlenwerte liefern, sodass es im Prinzip für praktische Arbeiten zwecklos ist, beide Versuche auszuführen, indem schon einer der beiden zu sämtlichen Zahlenwerten führt, die aus den zwei Versuchen erhältlich sind. Dabei stützen wir uns auf Rechnungen, sowie auf Versuche an künstlichen Kabeln, die wir im Winter 1896/1897 als einen Teil der Diplomarbeit, unter Leitung des 1912 gestorbenen Prof. Dr. H. F. Weber, ausgeführt haben. Wir glauben, die damaligen Arbeiten deswegen der Vergessenheit entreissen und weiterentwickeln zu sollen, weil Hochspannungskabel zur heutigen Zeit, besonders für die mit niedriger Periodenzahl arbeitenden Bahnkraftwerke, eine wachsende Bedeutung erlangen werden.

Wir legen ein Kabel zu Grunde, das gleichmässig verteilten Widerstand, Selbstinduktion und Kapazität aufweist. Wir vernachlässigen die Möglichkeit von Isolationsfehlern, die zur sog. „Ableitung an Erde“ führen, und die von Roessler zwar ebenfalls in Berücksichtigung

<sup>1)</sup> Elektrotechnische Zeitschrift 1905, Seite 734—741, sowie das, ebenfalls 1905, im Verlage von Julius Springer, Berlin, erschienene Werk Roesslers: „Die Fernleitung von Wechselströmen“.

gezogen wurden, für sehr hoch gespannte unterirdische Kabel jedoch nahezu bedeutungslos sind. Bezeichnen wir den Widerstand pro Länge 1 mit  $r$ , die Selbstinduktion pro Länge 1 mit  $l$  und die Kapazität pro Länge 1 mit  $c$ , so gilt für die, mit der Entfernung  $x$  vom Kabelanfang und mit der Zeit  $t$  veränderliche, Kabelspannung  $e$  die Differentialgleichung:

$$l \cdot c \cdot \frac{d^2 e}{dt^2} + r \cdot c \cdot \frac{de}{dt} = \frac{d^2 e}{dx^2}.$$

Bei Voraussetzung einer bei  $n$  Perioden sinusförmig oszillierenden Spannungsgrösse am Kabelanfang werden für die Auswertung der angeschriebenen Differentialgleichung bei verschiedenen Belastungszuständen des Kabels zwei Hilfsgrössen  $a$  und  $b$  benötigt, die aus  $r$ ,  $l$ ,  $c$  folgendermassen gebildet sind:

$$a = \pm \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ + \sqrt{(c \cdot r \cdot 2 \pi n)^2 + [l \cdot c \cdot (2 \pi n)^2]^2} - l \cdot c \cdot (2 \pi n)^2 \right\}}$$

$$b = \pm \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ + \sqrt{(c \cdot r \cdot 2 \pi n)^2 + [l \cdot c \cdot (2 \pi n)^2]^2} + l \cdot c \cdot (2 \pi n)^2 \right\}}$$

und entweder gleichzeitig positive oder gleichzeitig negative Zahlenwerte aufweisen.

Für die Effektivwerte der Spannung  $E_x$  am Orte mit der Entfernung  $x$  vom Kabelanfang und der Stromstärke  $I_x$  am selben Orte ergeben sich dann bei den Betriebszuständen des Leerlaufs und des Kurzschlusses die folgenden Ausdrücke.

*Im Leerlauf* gilt allgemein, wenn  $E_0$  den Effektivwert der den Kabelanfang ladenden Spannung bedeutet, während das Kabelende isoliert liegt:

$$E_x = E_0 \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon^{2a(\lambda-x)} + \varepsilon^{-2a(\lambda-x)} + 2 \cdot \cos [2b(\lambda-x)]}{\varepsilon^{2a\lambda} + \varepsilon^{-2a\lambda} + 2 \cdot \cos (2b\lambda)}}$$

$$I_x = E_0 \cdot \sqrt{\frac{(2\pi n c)^2}{r^2 + (2\pi n l)^2}} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon^{2a(\lambda-x)} + \varepsilon^{-2a(\lambda-x)} - 2 \cdot \cos [2b(\lambda-x)]}{\varepsilon^{2a\lambda} + \varepsilon^{-2a\lambda} + 2 \cdot \cos (2b\lambda)}}$$

Dabei ist mit:

$$x = \lambda$$

der Ort des Kabelendes bezeichnet. Weiter stellt  $\varepsilon$  die Basis des natürlichen Logarithmen-systems dar. Bei Ausführung des Leerlauf-Versuches an einem Kabel von der Länge  $\lambda$  lassen sich die effektiven Spannungen  $E_0$  und  $E_\lambda$  am Kabelanfang und am Kabelende, sowie die Stromstärke  $I_0$  am Kabelanfang messen. Man erhält:

$$E_0 = E_0$$

$$E_\lambda = E_0 \cdot \frac{2}{\sqrt{\varepsilon^{2a\lambda} + \varepsilon^{-2a\lambda} + 2 \cos (2b\lambda)}}$$

$$I_0 = E_0 \cdot \sqrt{\frac{(2\pi n c)^2}{r^2 + (2\pi n l)^2}} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon^{2a\lambda} + \varepsilon^{-2a\lambda} - 2 \cos (2b\lambda)}{\varepsilon^{2a\lambda} + \varepsilon^{-2a\lambda} + 2 \cos (2b\lambda)}}$$

*Im Kurzschluss* gilt allgemein, wenn  $E_0$  wiederum den Effektivwert der an den Kabelanfang gelegten Spannung bedeutet, während das Kabelende auf den zweiten Pol der Spannungsquelle kurzgeschlossen ist:

$$E_x = E_0 \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon^{2a(\lambda-x)} + \varepsilon^{-2a(\lambda-x)} - 2 \cos [2b(\lambda-x)]}{\varepsilon^{2a\lambda} + \varepsilon^{-2a\lambda} - 2 \cos (2b\lambda)}}$$

$$I_x = E_0 \cdot \sqrt{\frac{(2\pi n c)^2}{r^2 + (2\pi n l)^2}} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon^{2a(\lambda-x)} + \varepsilon^{-2a(\lambda-x)} + 2 \cos [2b(\lambda-x)]}{\varepsilon^{2a\lambda} + \varepsilon^{-2a\lambda} - 2 \cos (2b\lambda)}}$$

Bei Ausführung des Kurzschlussversuchs an einem Kabel von der Länge  $\lambda$  lassen sich ausser der effektiven Spannung  $E_0$  am Kabelanfang die Effektivwerte der Stromstärken  $I_0$  und  $I_\lambda$  am Kabelanfang und am Kabelende messen. Man erhält:

$$E_0 = E_0$$

$$I_0 = E_0 \cdot \sqrt[4]{\frac{(2\pi n c)^2}{r^2 + (2\pi n l)^2}} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon^{2a\lambda} + \varepsilon^{-2a\lambda} + 2 \cos(2b\lambda)}{\varepsilon^{2a\lambda} + \varepsilon^{-2a\lambda} - 2 \cos(2b\lambda)}}$$

$$I_\lambda = E_0 \cdot \sqrt[4]{\frac{(2\pi n c)^2}{r^2 + (2\pi n l)^2}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\varepsilon^{2a\lambda} + \varepsilon^{-2a\lambda} - 2 \cos(2b\lambda)}}$$

Bei der *Auswertung* der im Leerlauf und im Kurzschluss messbaren Spannungen und Stromstärken ergibt sich zunächst das bemerkenswerte Resultat, dass das Verhältnis der Endspannung zur Anfangsspannung bei einem offenen Kabel gegebener Länge genau übereinstimmt mit dem Verhältnis des Endstroms zum Anfangsstrom desselben Kabels im Kurzschluss-Versuch. Für dieses, mit der Kabellänge  $\lambda$  variierende Verhältnis  $V$  lässt sich schreiben:

$$V = \left( \frac{E_\lambda}{E_0} \right)_{\text{Leerlauf}} = \left( \frac{I_\lambda}{I_0} \right)_{\text{Kurzschluss}} = \frac{2}{\sqrt{\varepsilon^{2a\lambda} + \varepsilon^{-2a\lambda} - 2 \cos(2b\lambda)}}$$

Nicht direkt messbar, aber ebenfalls mit der Kabellänge  $\lambda$  variierend, ist das entsprechend gebildete Verhältnis:

$$U = \frac{2}{\sqrt{\varepsilon^{2a\lambda} + \varepsilon^{-2a\lambda} - 2 \cos(2b\lambda)}}$$

Ebenfalls nicht direkt messbar und unabhängig von der Kabellänge  $\lambda$  ist die Impedanzgrösse:

$$Z = \sqrt[4]{\frac{r^2 + (2\pi n l)^2}{(2\pi n c)^2}}$$

Für die von Roessler eingeführten Widerstandswerte:

$$R^0 = \left( \frac{E_0}{I_0} \right)_{\text{Leerlauf}} = \sqrt[4]{\frac{r^2 + (2\pi n l)^2}{(2\pi n c)^2}} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon^{2a\lambda} + \varepsilon^{-2a\lambda} + 2 \cos(2b\lambda)}{\varepsilon^{2a\lambda} + \varepsilon^{-2a\lambda} - 2 \cos(2b\lambda)}}$$

$$R^k = \left( \frac{E_0}{I_0} \right)_{\text{Kurzschluss}} = \sqrt[4]{\frac{r^2 + (2\pi n l)^2}{(2\pi n c)^2}} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon^{2a\lambda} + \varepsilon^{-2a\lambda} - 2 \cos(2b\lambda)}{\varepsilon^{2a\lambda} + \varepsilon^{-2a\lambda} + 2 \cos(2b\lambda)}}$$

lässt sich dann kürzer schreiben:

$$\begin{cases} R^0 = Z \cdot \frac{U}{V} \\ R^k = Z \cdot \frac{V}{U} \end{cases}$$

und folgen die Beziehungen:

$$R^0 \cdot R^k = Z^2 \quad ; \quad \frac{R^0}{R^k} = \frac{U^2}{V^2}$$

Für unsere Entwicklung benutzen wir noch die zwei weiteren scheinbaren Widerstandsgrössen:

$$S^0 = \left( \frac{E_\lambda}{I_0} \right)_{\text{Leerlauf}} = \sqrt[4]{\frac{r^2 + (2\pi n l)^2}{(2\pi n c)^2}} \cdot \frac{2}{\sqrt{\varepsilon^{2a\lambda} + \varepsilon^{-2a\lambda} - 2 \cos(2b\lambda)}}$$

$$S^k = \left( \frac{E_0}{I_\lambda} \right)_{\text{Kurzschluss}} = \sqrt[4]{\frac{r^2 + (2\pi n l)^2}{(2\pi n c)^2}} \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon^{2a\lambda} + \varepsilon^{-2a\lambda} - 2 \cos(2b\lambda)}}{2}$$

Für diese Grössen können wir kürzer schreiben:

$$\begin{cases} S^0 = Z \cdot U \\ S^k = Z \cdot \frac{1}{U} \end{cases}$$

und folgen die Beziehungen:

$$S^0 \cdot S^k = Z^2 \quad ; \quad \frac{S^0}{S^k} = U^2$$

Führt man bei Messversuchen sowohl den Leerlauf-, als auch den Kurzschluss-Versuch aus, dann ergeben sich die für Kabelprojektierung und Kabelbeurteilung wichtigen Grössen  $V$ , sowie  $R^0$  und  $R^k$ , unmittelbar aus den beiden Messungen.

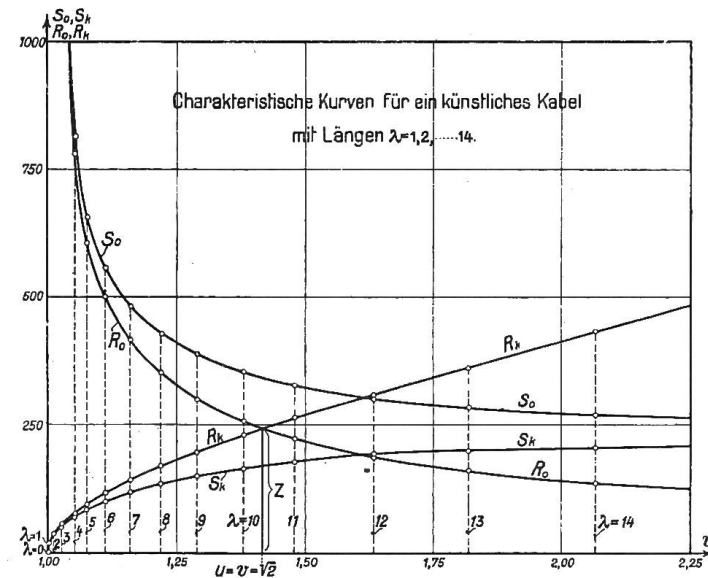
Nun werden wir aber zeigen, dass es möglich ist, sämtliche, den Leerlauf und den Kurzschluss betreffenden Grössen aus den Messergebnissen des Leerlaufs allein, oder auch aus den Messergebnissen des Kurzschlusses allein abzuleiten. Zu dieser Darlegung nehmen wir beispielsweise an, es seien nur Leerlaufmessungen vorgenommen worden, aus denen die Grössen  $V$ , sowie  $R^0$  und  $S^0$  berechnet wurden, und zwar für verschiedene Längen des zu untersuchenden Kabels. Sobald es uns gelingt, aus unsern Messungen die Grössen  $U$  und  $Z$  einzeln zu bestimmen, können dann auch die den Kurzschluss betreffenden Daten  $R^k$  und  $S^k$  angegeben werden, ohne dass der Kurzschluss-Versuch selbst auszuführen ist.

Es kann die Grösse  $Z$  nun folgenderweise bestimmt werden: Die bei verschiedenen Kabellängen  $\lambda$  aus den gemessenen Werten berechneten Daten  $R^0$  und  $S^0$  werden über den zugehörigen Daten  $V$  als Kurvenpunkte aufgetragen, wie es aus der nebenstehenden Abbildung für ein noch zu besprechendes konkretes Zahlen- und Messungs-Beispiel ersichtlich ist. Aus unsern Formeln ist ersichtlich, dass ein solches Kurvenbild gewisse charakteristische Einzelwerte aufweisen muss. So muss für den Sonderwert:

$$U = \frac{1}{U} = 1$$

sich ergeben:

$$S^0 = S^k = Z$$



Dabei muss dann:

$$\sqrt{\varepsilon^{2a\lambda} + \varepsilon^{-2a\lambda} - 2 \cos(2b\lambda)} = 2$$

sein. Durch Differentiation der Beziehung

$$S^0 = Z \cdot U$$

nach  $V$  ergibt sich:

$$\frac{dS^0}{dV} = Z \cdot \frac{dU}{dV}$$

welche Beziehung für

$$U = 1 \quad , \quad dU = 0$$

übergeht in:

$$\frac{dS^0}{dV} = 0 \quad , \quad \text{bezw. } S^0 = \text{konstant.}$$

Der konstante Wert, in den  $S^0$  bei  $U = 1$  übergeht, kann nichts anderes sein, als:

$$S^0 = Z$$

Der weitere Sonderfall, für den:

$$U = V, \quad dU = dV$$

wird, liefert mit der Beziehung:

$$\frac{dS^0}{dV} = Z \cdot \frac{dU}{dV}$$

direkt:

$$\frac{dS^0}{dV} = Z$$

als Wert der trigonometrischen Tangente des Winkels der geometrischen Tangente an die Kurve  $S^0$  über  $V$  bei:

$$U = V.$$

Dann muss aber nach unsern Formeln gleichzeitig gelten:

$$R^0 = R^k = Z$$

Weiter muss dann:

$$U = V, \quad \varepsilon^{2a\lambda} + \varepsilon^{-2a\lambda} + 2 \cos(2b\lambda) = \varepsilon^{2a\lambda} + \varepsilon^{-2a\lambda} - 2 \cos(2b\lambda) \\ + 2 \cos(2b\lambda) = -2 \cos(2b\lambda) = 0$$

$$2b\lambda = \frac{\pi}{2}, = 3 \frac{\pi}{2}, = 5 \frac{\pi}{2}, = \dots$$

$$U = V = \frac{2}{\sqrt{\varepsilon^{2a\lambda} + \varepsilon^{-2a\lambda}}}$$

Für die Stelle der Kurven  $S^0$  und  $R^0$ , für die  $U = V$  gilt, gilt also einerseits auch:

$$\frac{dS_0}{dV} = Z$$

und andererseits zugleich:

$$R^0 = Z.$$

Diese Stelle lässt sich nun allerdings nicht mit gleicher Sicherheit aus den Kurven herauslesen, wie der Sonderfall:

$$\left( \frac{dS^0}{dV} \right)_{U=1} = 0.$$

Hat man aber aus diesem letztern Sonderfall die Grösse  $Z$  bestimmt, dann wird der Sonderfall:

$$\left( \frac{dS_0}{dV} \right)_{U=V} = Z = (R_0)_{U=V}$$

als Kontrollpunkt nützlich sein<sup>1)</sup>.

Es können nun mit Hülfe der Grösse  $Z$  und der vorhandenen Werte  $V$ ,  $R^0$ ,  $S^0$  ohne weiteres die Grössen  $R^k$  und  $S^k$  für alle Kabelängen  $\lambda$  bestimmt werden. Zeichnet man dann im selben Kurvenbild auch noch  $R^k$  und  $S^k$  über  $V$ , so muss die Kurve  $R^k$  die Kurve  $R^0$  im Punkte  $V = U$  schneiden. Weiter muss die Kurve  $S^k$  für  $U = 1$  dieselben horizontalen Tangenten besitzen, wie die Kurve  $S^0$ .

Als *Zahlenbeispiel* für unsere Beziehungen sollen nun die Daten eines der aus Spulen und Kondensatoren gebildeten künstlichen Kabels dienen, die wir im Winter 1896/1897 untersucht haben. Zur Kabelbildung dienten dabei Spulen mit den pro Spule durchschnittlich gültigen Konstanten:

<sup>1)</sup> Die Zahlenwerte für  $U$  und  $V$  der zwei Sonderfälle führen auch auf die Einzelwinkel, aus denen sich die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung im Leerlauf und im Kurzschluss zusammensetzt, auf die wir aber, um nicht zu ausführlich zu werden, hier nicht weiter eintreten.

$$r = 2,06^{\Omega}$$

$$l = 0,0565^H$$

sowie Kondensatoren mit durchschnittlich:

$$c = 0,97^{MF}$$

Die Kabellänge  $\lambda = 1$  war dann gebildet aus der Parallelschaltung einer Spule und eines Kondensators, während jede beliebig grössere Kabellänge bis auf  $\lambda = 14$  durch Hinzufügung in Reihe weiterer Spulen mit parallelgeschalteten Kondensatoren hergestellt wurde. Dieses künstliche Kabel weist gegenüber den in der Praxis benutzten Bleikabeln unverhältnismässig grosse Werte der Selbstinduktion auf, was auch aus den berechneten Kabelkonstanten  $a$  und  $b$  ersichtlich ist. Diese ergaben sich nämlich für die in Betracht fallende Periodenzahl  $n = 51,5$  zu:

$$a = 0,0039 \quad ; \quad b = 0,076$$

Es ist also  $b$  neben  $a$  ganz erheblich grösser.<sup>1)</sup> Da besonders grosse  $\lambda$  nicht vorkommen, so darf man die Grössen:

$$e^{2a(\lambda-x)} \quad \text{sowie} \quad e^{-2a(\lambda-x)}$$

gleich  $+1$  setzen, ohne merkliche Fehler zu begehen. Es ergeben sich dann die Hauptgleichungen für  $E_x$  und  $I_x$  in besonders einfacher Form. Für den Leerlauf lauten sie:

$$E_x = E_0 \frac{\cos [b(\lambda - x)]}{\cos (b \cdot \lambda)}$$

$$I_x = E_0 \sqrt[4]{\frac{(2\pi n c)^2}{r^2 + (2\pi n l)^2}} \cdot \frac{\sin [b(\lambda - x)]}{\cos (b \cdot \lambda)}$$

Für den Kurzschluss lauten sie:

$$E_x = E_0 \frac{\sin [b(\lambda - x)]}{\sin (b \cdot \lambda)}$$

$$I_x = E_0 \cdot \sqrt[4]{\frac{(2\pi n c)^2}{r^2 + (2\pi n l)^2}} \cdot \frac{\cos [b(\lambda - x)]}{\sin (b \cdot \lambda)}$$

Es wurden mit diesen Formeln die Stromstärken und Spannungen für Kabel mit Längen  $\lambda = 1$  bis 14 am Kabelanfang und am Kabelende berechnet und sehr gute Uebereinstimmung mit den gemessenen Werten für dieselben Grössen gefunden. Aus diesen Werten lässt sich nun das auf Seite 68 abgebildete Kurvenbild herstellen, wobei  $V$ ,  $R^0$ ,  $S^0$ ,  $R^k$ ,  $S^k$  für alle Kabellängen  $\lambda = 1$  bis 14 zum Ausdruck kommen. Das Kurvenbild veranschaulicht im weitem, wie, nach unserer oben entwickelten Methode, die für den Kurzschluss gültigen Werte  $R^k$  und  $S^k$  ohne weiteres aus den Werten  $R^0$ ,  $S^0$  sowie  $V$  des Leerlaufs direkt erhältlich sind. Wie aus dem Kurvenbild zu ersehen ist, hat  $Z$  den Wert:

$$Z = \sqrt[4]{\frac{r^2 + (2\pi n l)^2}{(2\pi n c)^2}} = \sim 240^{\Omega}$$

der sich auch durch direkte Berechnung aus  $r$ ,  $l$ ,  $c$  demgemäss ergibt. Es mag noch bemerkt werden, dass für dieses künstliche Kabel der Sonderfall:

$$U = \frac{1}{U} = 1$$

rechnungsmässig nach den für  $\lambda = 0$  vereinfachten Formeln auf ein zugehöriges  $V = \infty$  führt. Weiter gilt im Sonderfall:  $U = V$  der Zahlenwert:

<sup>1)</sup> Bei den im praktischen Betrieb vorkommenden Kabeln ist dagegen gewöhnlich:

$$1 < \frac{b}{a} < 2.$$

$$U = V = \sqrt{2}$$

der in dem Kurvenbild ersichtlich ist.

Damit dürfte die Art der Anwendung der von uns abgeleiteten Beziehungen zwischen den charakteristischen Grössen des Leerlaufs und denen des Kurzschlusses hinreichend erläutert sein.

In derselben Weise, wie wir für die Effektivwerte der Spannungen und Stromstärken im Leerlauf und im Kurzschluss einfache Beziehungen feststellten, können solche auch hinsichtlich der Phasenwinkel der Spannungen und Stromstärken im Leerlauf und Kurzschluss nachgewiesen werden. Falls man, im Sinne der Methode von Roessler, wirklich umfassende Vorausberechnungen über die Arbeitsweise eines Kabels unter allen möglichen Betriebsbedingungen anstellen will, dann ist die Angabe dieser Phasenwinkel notwendig.<sup>1)</sup> Im allgemeinen darf man sich jedoch bei der Beurteilung und Prüfung von Kabeln auf diejenigen Grössen beschränken, die wir vorstehend entwickelt haben, sodass wir auf die Angabe der Verhältnisse der Phasenwinkel verzichten wollen, um nicht ausführlicher werden zu müssen, als unbedingt notwendig ist.

Wenn man die Beziehungen durch die Mitberücksichtigung der sog. „Ableitung“ an die Erde erweitert, wie dies Roessler getan hat, dann sind die Beziehungen anwendbar auf niedrig gespannte Kabel und auf Luftleitungen, bei denen eine derartige „Ableitung“ auftritt. Formell werden unsere Beziehungen dabei nicht geändert, jedoch kommt die Konstante der „Ableitung“ dann vor in den Grössen  $a$ ,  $b$  und  $Z$ , wie man bei Roessler nachlesen kann.<sup>2)</sup>

Für eigentliche Kabelleitungen spielt weiter auch die fortwährende Umelektrisierung des Isolationsmaterials, die sog. „dielektrische Hysterese“ eine gewisse Rolle, die indessen bei den in Zukunft für Kabelleitungen vorwiegend in Betracht fallenden kleinen Periodenzahlen nicht sehr wesentlich sein dürfte. Auch das Auftreten sog. Wirbelströme in den Bleiumhüllungen dürfte bei niedrigen Periodenzahlen von geringem Einfluss sein. Sehr bedeutend werden unter Umständen aber die Wirbelströme in Eisenarmaturen ausfallen, worüber kürzlich eine interessante Untersuchung von *E. Soleri* an den Kabeln zum elektrischen Zugförderungsbetrieb des Mont Cenis-Tunnels veröffentlicht wurde<sup>3)</sup>; solche Verhältnisse müssen jedoch als abnormal bezeichnet werden.

Wir glauben, dass man unter Berücksichtigung der hier entwickelten Beziehungen bei Versuchen an genügend langen Kabeln die Verhältnisse der Praxis treffen dürfte. Mit unserem Hinweis über die Ersetzbarkeit des Kurzschluss-Versuches durch den Leerlauf-Versuch und umgekehrt, wollen wir durchaus nicht etwa dafür Propaganda machen, es solle überhaupt stets nur der eine der zwei Versuche vorgenommen werden. Es liegt uns mehr daran, von neuem festgestellt zu haben, dass der eine Versuch als *Kontrolle* für den andern dienen kann, sodass sie sich gegenseitig bestätigen oder auch ergänzen können, insbesondere dann, wenn die Herstellung verschiedener Kabellängen zu Versuchszwecken die Veranlagung der Versuche in einem oder andern Falle verumständlicht.

<sup>1)</sup> Siehe Fussnote auf Seite 69.

<sup>2)</sup> Besondere Verdienste um die Entwicklung der Methoden der Kabel-Projektierung haben sich neben *Roessler* noch erworben: *C. Breiffeld* („Elektrotechnik und Maschinenbau“, Wien 1907, sowie das 1912 in Braunschweig erschienene Buch: „Berechnung von Wechselstrom-Fernleitungen“), *P. H. Thomas* („Proc. of. Am. Inst. of E. E.“ 1909), sowie *Blondel* und *Le Roy* („La lumière électrique“, 1909. VII).

<sup>3)</sup> *L'Elettrotecnica*, Giornali ed Atti dell'Associazione Elettrotecnica Italiana, 1915, No. 4 (5. Febbraio 1915).