Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 57 (1966)

Heft: 8

Artikel: Induktive Beeinflussung einer Rohrleitung und ihres Steuerkabels durch eine parallellaufende Hochspannungsleitung

Autor: Menemenlis, Ch.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916586

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.12.2025

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

Literatur

[1] *J. Guanter* und *G. Rieder:* Beleuchtung zweier Strassentunnel auf der Strecke Thusis–Rongellen. Bull. SEV 50(1959)6, S. 225...232.
[2] *J. Muth:* Beleuchtung einer Bahnunterführung. Lichttechnik 12(1960)2, S. 66...68.
[3] *F. Tomek:* Moderne Beleuchtungsanlage für Schnellstrassentunnel. WSW-techn. Berichte Siemens-Halske, Wiener Schwachstrom-Werke) 13(1961)1, S. 3...13.
[4] A Mountain Tunnel. how to Light it. Illum. Engng. 56(1961)12, S. 676...677.
[5a] *J. M. Waldram:* The Lighting of Tunnels. Light & Lighting 49(1956)2, S. 51...56.
[5b] *J. M. Waldram:* Lighting and Visibility in the Approaches to Underpasses. GEC J. Sci. Technol. 29(1962)3, S. 119...129.
[6] *J. B. de Boer:* Untersuchungen der Sehverhältnisse bei Tunneleinfahrten. Lichttechnik 15(1963)3, S. 124...127
[7] Aanbevelingen voor Tunnenverlichting. Electro-Techniek 41(1963)2, S. 23...32 und Nr. 3, S. 46.
[8] *H. Kabayama:* Study on Adaptive Illumination for Sudden Change of Brightness. J. Illum. Engng. Japan 47(1963)10, S. 488...496.
[9] *Dr. A. Schreuder:* The Lighting of Vehicular Traffic Tunnels. Dissertation T. H. Eindhoven 1964, Philips Technical Library.
[10] *Association Française de l'Eclairage* et *Comité National Français de l'Eclairage:* Recommandations relatives à l'éclairage extérieur, 2e édition. Paris 1965.
[11] *P. H. Crawford:* The Effect of Fieldsize and Pattern on the Change of Visual Sensitivity with Time. Proc. Royal Soc. London 129(1940)6, S. 94...106.
[12] *H. Zijl:* Autotunnel bei Velsen. Internat. Lichtrdsch. 9(1958)1. S. 26...29.

Adresse des Autors:
Dr. *F. Mäder,* Adjunkt des Eidg. Amtes für Mass und Gewicht, Lindenweg 24, 3084 Wabern.

Induktive Beeinflussung einer Rohrleitung und ihres Steuerkabels durch eine parallellaufende Hochspannungsleitung

Von *Ch. Menemenlis,* Athen

622.692.4 : 621.315.051.2 : 538.521

Eine lange Rohrleitung, die parallel zu einer Hochspannungsleitung verlegt ist, sowie auch das Steuerkabel, das parallel zu dieser Rohrleitung läuft, stehen im Falle eines Erdkurzschlusses unter der induktiven Beeinflussung des Stromes der Hochspannungsleitung. Die folgenden Grössen, die infolge dieser Beeinflussung entstehen, werden nachstehend berechnet und diskutiert:

a) Die Spannung gegen Erde der Rohrleitung und des Kabelmantels;
b) Der induzierte Strom, in der Rohrleitung;
c) Die Spannung zwischen den Kabeladern und dem Kabelmantel (Aderspannung).

Ein Beispiel mit konkreten Zahlenwerten wird in Kurvenform dargestellt und diskutiert.

En cas de défaut à la terre, une longue canalisation tubulaire posée parallèlement à une ligne à haute tension, ainsi que le câble de commande parallèle à cette canalisation, sont influencés inductivement par le courant de la ligne à haute tension. Les grandeurs suivantes, qui résultent de cette influence, sont calculées et discutées:

a) La tension, par rapport à la terre, de la canalisation tubulaire et de l'enveloppe du câble.
b) Le courant induit dans la canalisation tubulaire.
c) La tension entre les conducteurs du câble et l'enveloppe de celui-ci.

Un exemple numérique concret est représenté sous forme de courbes et discuté.

1. Allgemeines

Im Zuge einer Rohrleitung für Öltransport kann es vorkommen, dass Teilstrecken dieser Rohrleitung parallel zu einer elektrischen Hochspannungsleitung verlaufen. Parallel zur Rohrleitung läuft auch ein Kabel für die Steuerung der Schieberstationen. Die Rohrleitung und das Kabel liegen in einer Tiefe von ungefähr 1 m. Im Falle eines Erdkurzschlusses der Hochspannungsleitung fliesst ein Erdstrom I_k längs der elektrischen Leitung zum Erdschlussort und durch die Erde zurück. Dieser Strom induziert in den Schleifen, welche die Rohrleitung bzw. das Kabel mit der Erde als Rückleitung bilden, eine Spannung (Fig. 1). Diese Spannung pro km Hin- und Rückleitung soll als induzierte Spannung pro km definiert und mit U_i' bezeichnet werden. Auf Grund dieser Spannung fliesst in der beeinflussten Leitung ein Strom I_x, der von der Impedanz und der Querableitung dieser Leitung und von der Abschlussimpedanz der beeinflussten Strecke abhängt (Fig. 2).

Die Spannung zwischen einem Punkt der beeinflussten Leitung und einem weit weg liegenden Punkt in der Normalebene zur beeinflussten Leitung ist die Spannung gegen Erde des betreffenden Punktes U_x. Diese Spannung hängt von U_i'

34'438-448

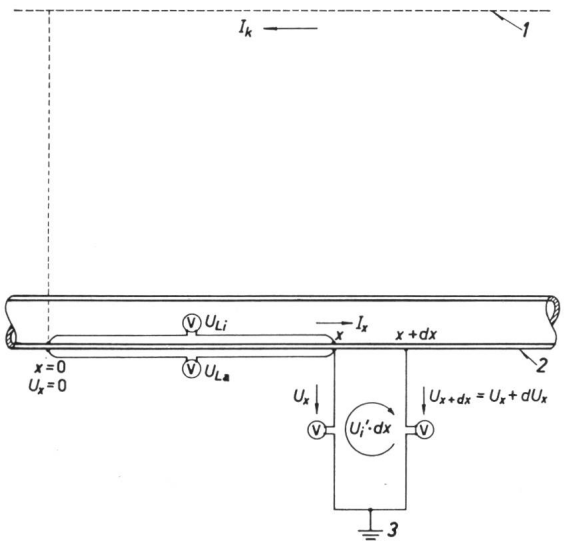

Fig. 1
Anordnung der induzierenden Hochspannungsleitung und der induzierten Leitung
1 Hochspannungsleitung; *2* beeinflusste Leitung; *3* Bezugserde; U_i' induzierte Spannung pro km; U_x Spannung gegen Erde; U_{Li}, U_{La} innere und äussere Längsspannung
Weitere Bezeichnungen siehe im Text

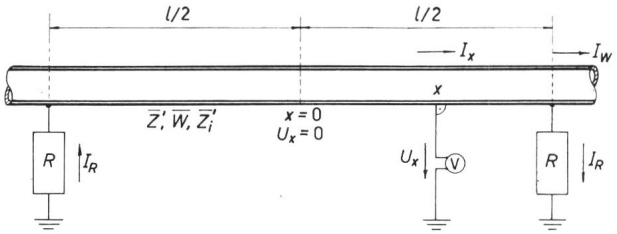

Fig. 2
Strom und Spannung der beeinflussten Leitung (Rohrleitung oder Kabel)
$\overline{Z}'$ Impedanz pro km der Schleife mit Erdrückleitung; $\overline{W}$ Wellenimpedanz; $\overline{Z}_i'$ innere Impedanz pro km
Weitere Bezeichnungen siehe im Text

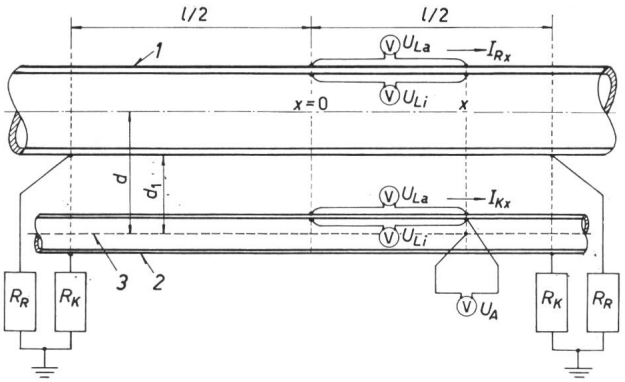

Fig. 3
Längsspannungen und Aderspannung
1 Rohrleitung; *2* Kabelmantel; *3* Kabeladern
Weitere Bezeichnungen siehe im Text

und den übrigen Faktoren, die den Strom beeinflussen, ab. Auf Grund des Stromes I_x kommt ein Spannungsabfall:

$$\overline{U}_L = \int_{x_1}^{x_2} \overline{E}\,\mathrm{d}x$$

zwischen zwei Punkten x_1 und x_2 auf der Oberfläche der beeinflussten Leitung zustande. Im Falle, wo eine Stromverdrängung vorkommt, ist dieser Spannungsabfall verschieden, je nachdem er längs der äusseren oder der inneren Oberfläche der Rohrleitung bzw. des Kabelmantels gemessen wird. Der Spannungsabfall an der äusseren Oberfläche wird als äussere Längsspannung definiert und mit U_{La} bezeichnet, derjenige an der inneren Oberfläche als innere Längsspannung U_{Li}.

Nimmt man an, dass längs der Kabeladern kein Strom fliesst, so erscheint die innere Längsspannung des Kabelmantels als Spannung zwischen den Kabeladern und dem Kabelmantel[1]). Diese Spannung ist die Aderspannung U_A (Fig. 3). Die erwähnten Spannungen können unter bestimmten Bedingungen hoch genug sein, um der Isolation des Steuerkabels (Aderspannung U_A) und jener der Niederspannungsanlagen in den Schieberstationen (Spannung gegen Erde U_x) zu schaden. Sie können auch gefährlich sein für das Personal, das die Schieberstationen betritt oder sich der Rohrleitung nähert (U_x, sowie ΔU_x zwischen Rohrleitung und Kabel).

Für die Bemessung der notwendigen Schutzmassnahmen ist die Kenntnis der Grösse der auftretenden Spannungen und ihrer Verteilung längs der Rohrleitung und am Kabel notwendig.

Die vorliegende Berechnung wurde grundsätzlich für eine durchgehende Rohrleitung und ein durchgehendes Steuerkabel ausgeführt, die auf einer Teilstrecke *1* parallel zu einer elektrischen Hochspannungsleitung laufen. Es wurden dabei auch folgende Einflüsse untersucht:

a) Aufteilung der Rohrleitung in voneinander isolierte Teilstrecken;

b) Zusätzliche Erdung der Rohrleitung bzw. des Kabelmantels;

c) Abstand des Kabels von der Rohrleitung;

d) Vielfache metallische Querverbindungen zwischen Rohrleitung und Kabelmantel.

[1]) Das gilt unter der Voraussetzung, dass die untere Grenze x_1 des Integrals $\overline{U}_L = \int_{x_1}^{x_2} \overline{E}\,\mathrm{d}x$ einer Stelle entspricht, wo keine Spannung zwischen dem Kabelmantel und den Adern herrscht.

2. Die induzierte Spannung

Die Spannung pro km U_i', die eine vom Erdstrom durchflossene Leitung in der Schleife «Beeinflusste Leitung—Erde» induziert, ergibt sich aus der Formel:

$$\overline{U}_i' = -\mathrm{j}\,2\pi f k\,\overline{M}'\,\overline{I}_k \quad [\mathrm{V/km}] \tag{1}$$

wobei:

f Frequenz [Hz].
I_k Strom in der Schleife «induzierende Leitung — Erde» [A].
M Gegeninduktivität pro km zwischen beeinflussender und beeinflusster Leitung (beide mit Erdrückleitung) [H/km].
k Abschirmungsfaktor, durch den die Induktions-Wirkung induzierter Ströme, die in parallelen Leitern (z. B. Rohrleitung) zur induzierten Leitung (z. B. Steuerkabel) berücksichtigt wird.

Die Gegeninduktivität wird aus der Formel:

$$\overline{M}' = \left\{ 2\ln\frac{2}{\gamma\alpha d} + 1 + \frac{2\sqrt{2}}{3}\alpha(b+c) - \mathrm{j}\left[\frac{\pi}{2} - \frac{2\sqrt{2}}{3}\alpha(b+c)\right]\right\} 10^{-4} \quad [\mathrm{H/km}] \tag{2}$$

berechnet [1][2]). Darin bedeuten:

γ = 1,78 (Besselkonstante)
α = $\sqrt{4\pi\sigma\omega}$
σ spezifische Leitfähigkeit des Erdbodens in elektromagnetischen Einheiten (1 elektromagnetische Einheit = $10^{11}\,\Omega^{-1}\,\mathrm{m}^{-1}$).
d Abstand zwischen beeinflussender und beeinflusster Leitung [cm].
b Höhe der beeinflussenden Leitung oberhalb des Erdbodens [cm].
c Höhe der beeinflussten Leitung oberhalb des Erdbodens [cm]. (für die Berechnung wurde $c = 0$ angenommen).

Diese Formel gilt für einen Abschnitt aus einer unendlich langen induzierenden Leitung, d. h. ohne Berücksichtigung der Randeffekte beim Ein- und Austritt des Erdstromes im Erdboden.

2.1 Rohrleitung

Abschirmende Leiter sind das Erdseil und der Kabelmantel. Wegen des geringen Stromes, der im Kabelmantel fliesst, wird die vom Kabel bedingte Abschirmung vernachlässigt. Diejenige vom Erdseil wird durch den Faktor k ausgedrückt:

$$k = \left| 1 - \frac{\overline{Z}_{1a}'}{\overline{Z}_{aa}'} \right|$$

wobei

Z_{aa}' Impedanz pro km der Schleife Erdseil — Erde, und
Z_{1a}' Gegenimpedanz pro km zwischen dem Erdseil und der elektrischen Leitung.

Ein angenäherter Wert von k wird in der Literatur in Form von Tafeln [1] als Funktion des Widerstandes pro km R_{aa} des Erdseils angegeben.

Ausserhalb der beeinflussten Strecke wird an der Rohrleitung keine Spannung induziert.

2.2 Kabel

Neben der Schirmwirkung des Erdseils besteht auch die Wirkung des Stromes, der in der Rohrleitung fliesst. Diese letzte Wirkung wird nicht durch einen Abschirmungsfaktor, sondern als eine vom Rohrstrom zusätzlich induzierte Spannung u_i', berücksichtigt.

Innerhalb der beeinflussten Strecke ist also die gesamte am Kabel induzierte Spannung pro km:

$$\overline{U}_{tot}' = \overline{U}_i' + \overline{u}_i'$$

[2]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes

wobei

U_i' von der Hochspannungsleitung induzierte Spannung pro km mit Berücksichtigung der Abschirmungswirkung des Erdseils [siehe Gl. (1)]. Wegen des geringen Abstandes zwischen Rohr und Kabel, im Vergleich zum Abstand von der elektrischen Leitung, ist die Spannung U_i' am Kabel praktisch gleich der in der Schleife Rohrleitung—Erde induzierten Spannung.

$\overline{u_i'} = -\overline{Z}_{RK}' \overline{I}_{Rx}$ [V], wobei I_{Rx} der Strom, der in der Rohrleitung fliesst [A] und $\overline{Z}_{RK}' = \mathrm{j}\,\omega\,\overline{M}_{RK}'$ Gegenimpedanz zwischen der Rohrleitung und dem Kabel [Ω/km].

Die Gegeninduktivität pro km M_{RK}' zwischen der Rohrleitung und dem Kabel wird aus der Formel:

$$\overline{M}_{RK}' = \left(2 \ln \frac{2}{\gamma \alpha d} + 1 - \mathrm{j}\,\frac{\pi}{2}\right) 10^{-4} \quad [\mathrm{H/km}] \tag{3}$$

berechnet, welche aus Gl. (2) mit $b = c = 0$ entsteht. Als Abstand d zwischen beeinflussender und beeinflusster Leitung kann in diesem Falle der Abstand zwischen den Achsen der Rohrleitung und des Kabels angenommen werden.

Ausserhalb der beeinflussten Strecke fällt die Spannung U_i' aus. Der Strom, der in der Rohrleitung weiter fliesst, induziert aber weiterhin eine Spannung:

$$\overline{u_i'} = -\overline{Z}_{RK}' \overline{I}_{Rx}$$

wobei I_{Rx} jetzt der Strom der Rohrleitung in diesem äusseren Bereich $|x| \geqq l/2$ ist.

3. Der Strom und die Spannung gegen Erde

3.1 Rohrleitung (Index R)

Innerhalb der beeinflussten Strecke ($|x| \leqq l/2$) gelten die Differentialgleichungen (siehe auch Fig. 1):

$$\left.\begin{aligned} \frac{\mathrm{d}\,U_{Rx}}{\mathrm{d}x} &= \overline{U}_i' - \overline{Z}_R' \overline{I}_{Rx} \\ \frac{\mathrm{d}\,\overline{I}_{Rx}}{\mathrm{d}x} &= -\overline{G}_R' \overline{U}_{Rx} \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

und ausserhalb ($|x| \geqq l/2$):

$$\left.\begin{aligned} \frac{\mathrm{d}\,\overline{U}_{Rx}}{\mathrm{d}x} &= -\overline{Z}_R' \overline{I}_{Rx} \\ \frac{\mathrm{d}\,\overline{I}_{Rx}}{\mathrm{d}x} &= -\overline{G}_R' \overline{U}_{Rx} \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

wobei

U_i' Spannung pro km, die die Hochspannungsleitung, mit Berücksichtigung der Abschirmungswirkung des Erdseils, in der Rohrleitung induziert [siehe Gl. (1)].

Z_R' Impedanz pro km der Schleife Rohrleitung—Erde.

$\overline{G}_R' = g' + \mathrm{j}\,c'$ Querableitung pro km der Rohrleitung.

Die Anfangsbedingungen für die Lösung der Gl. (4) und (5) werden durch die folgenden Annahmen bestimmt:

a) Der Mitte von l wird die Abszisse $x = 0$ zugeschrieben.

b) Z' und G' sind unabhängig von x (homogene Leitung und Erde).

c) Die resultierende Abschlussimpedanz beider Enden der beeinflussten Strecke ist:

$$\overline{Z}_{RA} = \frac{R_R \overline{W}_R}{R_R + \overline{W}_R}$$

wobei

R_R Erdungswiderstand und W_R Wellenimpedanz der Rohrleitung.

Damit ist:

für $x = 0$: $\overline{U}_{Rx} = 0$

für $x = \frac{l}{2}$: $\overline{I}_{Rx} = \overline{I}_R + \overline{I}_W = \frac{\overline{U}_{Rx}}{R_R} + \frac{\overline{U}_{Rx}}{\overline{W}_R} = \frac{\overline{U}_{Rx}}{\overline{Z}_{RA}}$

für $x = \frac{l}{2}$: $\overline{U}_{Rx\,links} = \overline{U}_{Rx\,rechts}$

für $x \geqq \frac{l}{2}$: $\overline{I}_{Rx} = \frac{\overline{U}_{Rx}}{\overline{W}_R}$

Mit Berücksichtigung dieser Anfangsbedingungen ergibt sich:

für $|x| \leqq \frac{l}{2}$:

$$\overline{U}_{Rx} = \frac{\overline{U}_i'}{\overline{\gamma}_R} \overline{P} \sinh \overline{\gamma}_R x \tag{6}$$

$$\overline{I}_{Rx} = \frac{\overline{U}_i'}{\overline{Z}_R'} (1 - \overline{P} \cosh \overline{\gamma}_R x) \tag{7}$$

für $|x| \geqq \frac{l}{2}$:

$$\overline{U}_{Rx} = \pm \frac{\overline{U}_i'}{\overline{\gamma}_R} \overline{P} \sinh \overline{\gamma}_R \frac{l}{2}\, \mathrm{e}^{\overline{\gamma}_R \left(\frac{l}{2} - |x|\right)} \text{ [3]} \tag{8}$$

$$\overline{I}_{Rx} = \frac{\overline{U}_i'}{\overline{Z}_R'} \overline{P} \sinh \overline{\gamma}_R \frac{l}{2}\, \mathrm{e}^{\overline{\gamma}_R \left(\frac{l}{2} - |x|\right)} \tag{9}$$

In diesen Gleichungen ist:

$$\overline{P} = \frac{R_R}{R_R\, \mathrm{e}^{\overline{\gamma}_R l/2} + \overline{W}_R \sinh \overline{\gamma}_R \frac{l}{2}}$$

wobei

R_R Erdungswiderstand der Rohrleitung.

$\overline{\gamma}_R = \sqrt{\overline{G}_R' \overline{Z}_R'}$ Übertragungsmass der Rohrleitung.

3.2 Kabel (Index K)

Innerhalb der beeinflussten Strecke ($|x| \leqq l/2$) gelten die Differentialgleichungen:

$$\left.\begin{aligned} \frac{\mathrm{d}\,\overline{U}_{Kx}}{\mathrm{d}x} &= \overline{U}_i' + \overline{u}_i' - \overline{Z}_K' \overline{I}_{Kx} \\ \frac{\mathrm{d}\,\overline{I}_{Kx}}{\mathrm{d}x} &= -\overline{G}_K \overline{U}_{Kx} \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

und ausserhalb ($|x| \geqq l/2$):

$$\left.\begin{aligned} \frac{\mathrm{d}\,\overline{U}_{Kx}}{\mathrm{d}x} &= \overline{u}_i' - \overline{Z}_K' \overline{I}_{Kx} \\ \frac{\mathrm{d}\,\overline{I}_{Kx}}{\mathrm{d}x} &= -\overline{G}_K' \overline{U}_{Kx} \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

wobei

U' Spannung pro km, die die Hochspannungsleitung mit Berücksichtigung der Abschirmungswirkung des Erdseils, der Schleife Kabel—Erde induziert.

Z_K' Impedanz pro km der Schleife Kabel—Erde.

$\overline{G}_K' = \mathrm{j}\,\omega\,c'$ Ableitung pro km des Kabelmantels für unendlich gute Isolierung.

c' Kapazität pro km des Kabelmantels.

$\overline{u}_i' = -\overline{Z}_{RK}' \overline{I}_{Rx}$ Spannung pro km, die die Rohrleitung in der Schleife Kabel—Erde induziert.

Für $|x| \leqq l/2$ [Gl. (10)] ist:

$$\overline{u}_i' = -\overline{U}_i' \frac{\overline{Z}_{RK}'}{\overline{Z}_R'} (1 - \overline{P} \cosh \overline{\gamma}_R x)$$

[3]) Das +-Vorzeichen gilt für $x > l/2$ und das − für $x < -l/2$.

für $x \geqq l/2$ [Gl. (11)] ist:

$$\overline{u}_i' = -\overline{U}_i' \frac{\overline{Z}_{RK}'}{\overline{Z}_R'} \overline{P} \sinh \overline{\gamma}_R \frac{l}{2} e^{\overline{\gamma}_R \left(\frac{l}{2} - x\right)}$$

Gl. (10) und (11) werden mit folgenden Anfangsbedingungen gelöst:

$$\text{für } x = 0: \quad \overline{U}_{Kx} = 0$$

$$\text{für } x \to \infty: \quad \overline{U}_{Kx} = 0$$

$$\text{für } x = \frac{l}{2}: \quad \overline{U}_{Kx\,links} = \overline{U}_{Kx\,rechts}$$

$$\text{für } x = \frac{l}{2}: \quad \overline{I}_{Kx\,links} = \overline{I}_{Kx\,rechts} + \frac{\overline{U}_{Kx}}{R_K}$$

Damit ergibt sich:

für $|x| \leqq \frac{l}{2}$:

$$\overline{U}_{Kx} = \overline{U}_i' \frac{\overline{Z}_{RK}'}{\overline{Z}_R'} \overline{P} \frac{\overline{\gamma}_R}{\overline{\gamma}_R^2 - \overline{\gamma}_K^2} \sinh \overline{\gamma}_R x + \frac{\overline{C}}{\overline{\gamma}_K} \sinh \overline{\gamma}_K x \tag{12}$$

$$\overline{I}_{Kx} = \frac{\overline{U}_i'}{\overline{Z}_K'} \left(1 - \frac{\overline{Z}_{RK}'}{\overline{Z}_R'}\right) - \frac{\overline{U}_i'}{\overline{Z}_K'} \frac{\overline{Z}'_K}{\overline{Z}_R'} \overline{P} \frac{\overline{\gamma}_K^2}{\overline{\gamma}_R^2 - \overline{\gamma}_K^2} \cosh \overline{\gamma}_R x - \frac{\overline{C}}{\overline{Z}_K'} \cosh \overline{\gamma}_K x \tag{13}$$

für $x \geqq \frac{l}{2}$:

$$\overline{U}_{Kx} = \overline{U}_i' \frac{\overline{Z}_{RK}'}{\overline{Z}'} \overline{P} \frac{\overline{\gamma}_R}{\overline{\gamma}_R^2 - \overline{\gamma}_K^2} \sinh \overline{\gamma}_R \frac{l}{2} e^{\overline{\gamma}_R \left(\frac{l}{2} - x\right)} + \frac{\overline{C}}{\overline{\gamma}_K} \sinh \overline{\gamma}_K \frac{l}{2} e^{\overline{\gamma}_K \left(\frac{l}{2} - x\right)} \tag{14}$$

$$\overline{I}_{Kx} = \frac{\overline{U}_i'}{\overline{Z}_K'} \frac{\overline{Z}_{RK}'}{\overline{Z}_R'} \overline{P} \frac{\overline{\gamma}_K^2}{\overline{\gamma}_R^2 - \overline{\gamma}_K^2} \sinh \overline{\gamma}_R \frac{l}{2} e^{\overline{\gamma}_R \left(\frac{l}{2} - x\right)} + \frac{\overline{C}}{\overline{Z}_K'} \sinh \overline{\gamma}_K \frac{l}{2} e^{\overline{\gamma}_K \left(\frac{l}{2} - x\right)} \tag{15}$$

In diesen Gleichungen ist:

Z_K', Z_R' Impedanz pro km der Schleife Kabel—Erde bzw. Rohrleitung—Erde.

Z_{RK}' Gegenimpedanz pro km zwischen Rohrleitung und Kabel.

γ_K, γ_R Übertragungsmass des Kabelmantels bzw. der Rohrleitung.

$$\overline{P} = \frac{R_R}{R_R e^{\overline{\gamma}_R \frac{l}{2}} + \overline{W}_R \sinh \overline{\gamma}_R \frac{l}{2}}$$

R_R Erdungswiderstand der Rohrleitung.

W_R Wellenimpedanz der Rohrleitung.

$$\overline{C} = \overline{U}_i' \frac{R_K}{R_K e^{\overline{\gamma}_K \frac{l}{2}} + \overline{W}_K \sinh \overline{\gamma}_K \frac{l}{2}} \left[1 - \frac{\overline{Z}_{RK}'}{\overline{Z}_R'} \cdot \left(1 + \overline{P} \frac{\overline{\gamma}_K^2}{\overline{\gamma}_R^2 - \overline{\gamma}_K^2} e^{\overline{\gamma}_R \frac{l}{2}} + \overline{P} \frac{\overline{Z}_K'}{R_K} \cdot \frac{\overline{\gamma}_R}{\overline{\gamma}_R^2 - \overline{\gamma}_K^2} \sinh \overline{\gamma}_R \frac{l}{2}\right)\right]$$

R_K Erdungswiderstand des Kabelmantels.

W_K Wellenimpedanz des Kabelmantels.

3.3 Spannung gegen Erde der Rohrleitung U_{Rx} an den Stellen $x = \pm\, l/2$

3.3.1 Im Falle einer unendlich langen, elektrisch durchverbundenen Rohrleitung ohne zusätzliche Erdung ($R_R = \infty$, Abschlussimpedanz $\overline{Z}_{RA} = \overline{W}_R$) wird der Betrag der Spannung gegen Erde U_{Rx} an den Stellen $x = \pm\, l/2$, $U_{\pm l/2}$ aus Gl. (6) berechnet:

$$U_{\pm l/2} = \frac{U_i'}{\gamma_R} \cdot \frac{\left|\sinh \overline{\gamma}_R \frac{l}{2}\right|}{e^{a\,(l/2)}} = \frac{U_i'}{2\gamma_R} \sqrt{1 + \frac{1}{e^{2al}} + \frac{4 \sin^2 b \frac{l}{2} - 2}{e^{al}}}$$

wobei:

U_i' Betrag der induzierten Spannung pro km der Schleife Rohrleitung—Erde [Gl. (1)].

$\overline{\gamma}_R$ $a + \mathrm{j}\,b$ Übertragungsmass der Rohrleitung ($\gamma_R = |\overline{\gamma}_R|$).

Für $l \to \infty$ wird $U_{\pm l/2} = U_i'/2\gamma_R$. Das heisst, die Spannung $U_{\pm l/2}$ für unendlich lange beeinflusste Strecke strebt dem Grenzwert $U_i'/2\gamma_R$ zu.

3.3.2 Im Falle einer an den Enden der beeinflussten Länge l isolierten Rohrleitung (Abschlussimpedanz $\overline{Z}_{RA} = \infty$) wird der Betrag der Spannung gegen Erde U_{Rx} an den Stellen $x = \pm\, l/2$ aus derselben Gl. (6) gegeben und lautet:

$$U_{\pm l/2} = \frac{U_i'}{\gamma_R} \frac{\left|\sinh \overline{\gamma}_R \frac{l}{2}\right|}{\left|\cosh \overline{\gamma}_R \frac{l}{2}\right|} = \frac{U_i'}{\gamma_R} \sqrt{\frac{\sinh^2 a \frac{l}{2} + \sin^2 b \frac{l}{2}}{\cosh^2 a \frac{l}{2} - \sin^2 b \frac{l}{2}}}$$

Für $l \to \infty$ wird $U_{\pm l/2} \to U_i'/\gamma_R$.

Das heisst, auch in diesem Falle strebt die Spannung gegen Erde $U_{\pm l/2}$ einem Grenzwert zu. Dieser Grenzwert ist doppelt so gross als der Grenzwert für unendlich lange und elektrisch durchverbundene Rohrleitungen.

Fig. 11 gibt den Effektivwert der Spannung $U_{\pm l/2}$ der Rohrleitung für die erwähnten zwei Fälle in Funktion der Länge l der Beeinflussungsstrecke und den übrigen Voraussetzungen des berechneten Beispiels (siehe Abschnitt 5).

4. Die Längsspannungen der Rohrleitung und des Kabelmantels und die Aderspannung (Fig. 3)

4.1 Die äussere Längsspannung U_{La}

Zwischen $x_1 = 0$ und $x_2 = x$ ist die *äussere Längsspannung* U_{La} durch das Integral

$$\overline{U}_{La} = \int_0^x \overline{E}_a \, \mathrm{d}x$$

bestimmt, wobei

E_a die axiale elektrische Feldstärke auf der äusseren Oberfläche der beeinflussten Leitung bedeutet.

Bezeichnet man mit R_W' den Wechselstromwiderstand pro km der beeinflussten Leitung, mit L_i' die innere Induktivität pro km der beeinflussten Leitung und I_x den Strom an der Stelle x der beeinflussten Leitung (Rohrleitung oder Kabelmantel), so ist:

$$\overline{E}_a \, \mathrm{d}x = \overline{I}_x (R_W' + \mathrm{j}\,\omega L_i') \, \mathrm{d}x$$

Durch Einsetzen wird:

$$\overline{U}_{La} = (R_W' + \mathrm{j}\,\omega L_i') \int_0^x \overline{I}_x \, \mathrm{d}x = \overline{Z}_i' \int_0^x \overline{I}_x \, \mathrm{d}x$$

wobei $\overline{Z}_i' = R_W' + \mathrm{j}\, L_i$ die *innere Impedanz* des Leiters pro km bedeutet.

Für die Rohrleitung, bei der eine ausgeprägte Stromverdrängung besteht, ist:

$$R_W' \approx \omega L_i' \quad \text{und} \quad \overline{Z}_i' \approx (1 + \mathrm{j})\, R_W'$$

woraus folgt:

$$\overline{U}_{La} = (1 + \mathrm{j})\, R_W' \int_0^x \overline{I}_{Rx}\, \mathrm{d}x$$

Für den Kabelmantel, bei dem keine wesentliche Stromverdrängung auftritt und $\omega L_i' \ll R_W'$ ist, gilt angenähert $\overline{Z}_i' \approx R_K'$ und

$$\overline{U}_{La} = R_K' \int_0^x \overline{I}_{Kx}\, \mathrm{d}x$$

wobei R_K' der Gleichstromwiderstand pro km des Kabelmantels bedeutet.

4.2 Die innere Längsspannung U_{Li}

Zwischen $x_1 = 0$ und $x_2 = x$ ergibt sich:

$$\overline{U}_{Li} = \int_0^x \overline{E}_i\, \mathrm{d}x$$

wobei E_i die axiale elektrische Feldstärke auf der inneren Oberfläche der beeinflussten Leitung bedeutet. Es ist:

$$\overline{E}_i = \overline{J}_i\, \varrho$$

wobei

J_i Stromdichte auf der inneren Oberfläche der Rohrleitung bzw. des Kabelmantels und
ϱ spezifischer Widerstand derselben.

Für die Rohrleitung ist wegen der starken Stromverdrängung

$$\overline{J}_i \approx 0$$

woraus entsteht

$$\overline{E}_i \approx 0 \quad \text{und} \quad \overline{U}_{Li} \approx 0$$

Für den Kabelmantel ist $\overline{J}_i \approx \overline{J}_a$ das heisst, die Stromdichte auf seiner äusseren und inneren Oberfläche ist annähernd gleich gross, weil keine wesentliche Stromverdrängung besteht. Es gilt also:

$$\overline{E}_i \approx \overline{E}_a \quad \text{und} \quad \overline{U}_{Li} \approx \overline{U}_{La} = R_K' \int_0^x \overline{I}_{Kx}\, \mathrm{d}x$$

4.3 Die Aderspannung U_A des Steuerkabels

Wegen der inneren Längsspannung des Kabelmantels erscheint eine Spannung zwischen dem Kabelmantel und den Adern. Diese Spannung wird als *Aderspannung U_A* bezeichnet.

Erster Fall: Keine metallische Verbindung zwischen Kabelmantel und Rohrleitung, Rohrleitung und Kabel unendlich lang und elektrisch durchverbunden.

Wegen der Symmetrie[4]) übernehmen die Kabeladern das Potential[5]) der Stelle $x = 0$ (Mitte der induzierten Länge). Die Spannung U_A ist in diesem Falle

$$\overline{U}_A = \overline{U}_{Li} \approx \overline{U}_{La} = R_K' \int_0^x \overline{I}_{Kx}\, \mathrm{d}x \qquad (16)$$

[4]) Im Falle mehrerer induzierter Längen oder unsymmetrischer Erdungen wird die Symmetrie im allgemeinen gestört. Das Potential der Kabeladern gleicht dann nicht mehr dem Potential der Mitte der induzierten Länge. In diesem Falle soll die untere Grenze des Integrals einer Stelle entsprechen, wo das Potential des Kabelmantels dem Potential der Kabeladern gleicht.

[5]) Von Potential darf hier gesprochen werden, da im Kabelinnern kein Magnetfeld besteht.

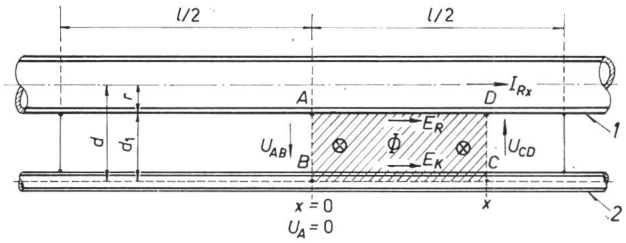

Fig. 4
Einfluss des Abstandes zwischen Rohrleitung und Kabel
1 Rohrleitung; *2* Kabel
Weitere Bezeichnungen siehe im Text

wobei

R_K' Gleichstromwiderstand pro km des Kabelmantels und
I_{Kx} Strom des Kabelmantels, gegeben aus den Gl. (13) und (15).

Zweiter Fall: Kabelmantel auf der ganzen Länge in vielfacher metallischer Querverbindung mit der Rohrleitung, Rohrleitung und Kabel unendlich lang und elektrisch durchverbunden (Fig. 4).

Eine Anwendung der Schleifenregel an der Schleife $\overline{ABCD}$ ergibt:

$$\overline{U}_{AB} + \int_0^x \overline{E}_K\, \mathrm{d}x + \overline{U}_{CD} - \int_0^x \overline{E}_R\, \mathrm{d}x = \frac{\mathrm{d}\overline{\Phi}}{\mathrm{d}t}$$

wobei

E_K, E_R die achsiale elektrische Feldstärke auf der äusseren Oberfläche des Kabelmantels bzw. der Rohrleitung und Φ der vom Rohrstrom I_R erzeugte Fluss zwischen der Rohrleitung und dem Kabel (von Radius r bis Radius d) innerhalb der Grenzen 0 und x.

Vielfache metallische Querverbindung des Kabelmantels z. B. zwischen AB und CD mit der Rohrleitung hat zur Folge:

$$\overline{U}_{AB} = 0 \quad \text{und} \quad \overline{U}_{CD} = 0$$

Nun gilt:

$$\int_0^x \overline{E}_K\, \mathrm{d}x = \overline{U}_{La} \text{ am Kabel} = \text{Aderspannung } \overline{U}_A \text{ [siehe Gl. (16)]},$$

und

$$\int_0^x \overline{E}_R\, \mathrm{d}x = \overline{U}_{La} \text{ an der Rohrleitung}$$

Damit wird:

$$\overline{U}_A = \overline{U}_{La} + \frac{\mathrm{d}\overline{\Phi}}{\mathrm{d}t} \qquad (17)$$

Wegen des grossen Widerstandes des Kabelmantels R_K', im Vergleich zur inneren Impedanz Z_i' der Rohrleitung beeinflusst die metallische Verbindung des Steuerkabelmantels den Strom der Rohrleitung sehr wenig. Mit Vernachlässigung dieser kleinen Beeinflussung ist:

$$\overline{U}_{La} = (1 + \mathrm{j})\, R_W' \int_0^x \overline{I}_{Rx}\, \mathrm{d}x \qquad (18)$$

wobei

R_W' Wechselstromwiderstand pro km der Rohrleitung und
I_{Rx} Strom der Rohrleitung.

Wird wegen des grossen Abstandes der Beitrag des Stromes der Hochspannungsleitung im Fluss Φ vernachlässigt, so beträgt der vom Strom der Rohrleitung I_{Rx} produzierte Fluss [2]:

$$\overline{\Phi} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d}{r} \int_0^x \overline{I}_{Rx}\, \mathrm{d}x$$

oder mit $\mu_0 = 4\pi\, 10^{-4}$ H/km:

$$\overline{\Phi} = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{d}{r} \int_0^x \overline{I}_{Rx}\, \mathrm{d}x \quad [\mathrm{Vs}]$$

und

$$\frac{\mathrm{d}\overline{\Phi}}{\mathrm{d}t} = \mathrm{j}\,\omega\, 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{d}{r} \int_0^x \overline{I}_{Rx}\,\mathrm{d}x \quad [\mathrm{V}] \tag{19}$$

Durch Kombination der Gl. (17), (18) und (19) ergibt sich:

$$\overline{U}_A = \left[(1+\mathrm{j})\,R'_W + \mathrm{j}\,\omega \cdot 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{d}{r}\right] \int_0^x \overline{I}_{Rx}\,\mathrm{d}x$$

Mit

$$\overline{Z}'_R = \left[R'_W + \pi^2 f + \mathrm{j}\,\omega \left(L'_i + 1 + 2 \ln \frac{2}{\gamma\,\alpha\, r}\right)\right] 10^{-4}$$

[siehe Gl. (28)]

und

$$\overline{Z}'_{RK} = \mathrm{j}\,\omega\, \overline{M}'_{RK} = \left[\pi^2 f + \mathrm{j}\,\omega \left(1 + 2 \ln \frac{2}{\gamma\,\alpha\, d}\right)\right] 10^{-4}$$

[siehe Gl. (3)]

ergibt sich

$$(1+\mathrm{j})\,R'_W + \mathrm{j}\,\omega\, 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{d}{r} = \overline{Z}'_R - \overline{Z}'_{RK}$$

und damit

$$\overline{U}_A = (\overline{Z}'_R - \overline{Z}'_{RK}) \int_0^x \overline{I}_{Rx}\,\mathrm{d}x \tag{20}$$

Im besonderen Falle, wo das Kabel *sehr nahe* der Rohrleitung liegt, ist $d \approx r$, $\ln (d/r) \approx 0$ und

$$\overline{U}_A = (1+\mathrm{j})\,R'_W \int_0^x \overline{I}_{Rx}\,\mathrm{d}x \tag{21}$$

Unter der Voraussetzung, dass an der Stelle $x = 0$ (Mitte von l) keine Spannung zwischen Kabelmantel und Kabeladern besteht, lauten also die allgemeinen Gleichungen der Aderspannung U_A:

Für den *ersten Fall*: Keine metallische Verbindung zwischen Kabelmantel und Rohrleitung. [Kombination der Gl. (13), (15) und (16)].

$$|x| \leqq \frac{l}{2}$$

$$\overline{U}_A = \overline{U}'_i \frac{R'_K}{\overline{Z}'_K}\left(1 - \frac{\overline{Z}'_{RK}}{\overline{Z}'_R}\right) x - \tag{22}$$

$$- \overline{U}'_i \frac{R'_K}{\overline{Z}'_K} \frac{\overline{Z}'_{RK}}{\overline{Z}'_R} \overline{P} \frac{\overline{\gamma}_K^{\,2}}{\overline{\gamma}_R(\overline{\gamma}_R^{\,2} - \overline{\gamma}_K^{\,2})} \sinh \overline{\gamma}_R x - \frac{\overline{C}}{\overline{\gamma}_K} \cdot \frac{R'_K}{\overline{Z}'_K} \sinh \overline{\gamma}_K x$$

$$x \geqq \frac{l}{2}$$

$$\overline{U}_A = \overline{U}'_i \frac{R'_K}{\overline{Z}'_K}\left(1 - \frac{\overline{Z}'_{RK}}{\overline{Z}'_R}\right) \frac{l}{2} -$$

$$- \overline{U}'_i \frac{R'_K}{\overline{Z}'_K} \frac{\overline{Z}'_{RK}}{\overline{Z}'_R} \overline{P} \frac{\overline{\gamma}_K^{\,2}}{\overline{\gamma}_R(\overline{\gamma}_R^{\,2} - \overline{\gamma}_K^{\,2})} \sinh \overline{\gamma}_R \frac{l}{2}\, \mathrm{e}^{\overline{\gamma}_R\left(\frac{l}{2} - x\right)} -$$

$$- \frac{\overline{C}}{\overline{\gamma}_K} \cdot \frac{R'_K}{\overline{Z}'_K} \sinh \overline{\gamma}_K \frac{l}{2}\, \mathrm{e}^{\overline{\gamma}_K\left(\frac{l}{2} - x\right)} \tag{23}$$

Für den *zweiten Fall*: Kabelmantel auf der ganzen Länge in metallischer Verbindung mit der Rohrleitung. [Kombination der Gl. (7), (9) und (20) oder (21)].

a) $d > r$ (d Achsenabstand zwischen Rohrleitung und Kabel; r Äusserer Radius der Rohrleitung)

$$|x| \leqq \frac{l}{2}$$

$$\overline{U}_A = \overline{U}'_i \left(1 - \frac{\overline{Z}'_{RK}}{\overline{Z}'_R}\right)\left(x - \frac{\overline{P}}{\overline{\gamma}_R} \sinh \overline{\gamma}_R x\right) \tag{24}$$

$$x \geqq \frac{l}{2}$$

$$\overline{U}_A = \overline{U}'_i \left(1 - \frac{\overline{Z}'_{RK}}{\overline{Z}'_R}\right)\left(\frac{l}{2} - \frac{\overline{P} \sinh \overline{\gamma}_R \frac{l}{2}}{\overline{\gamma}_R}\, \mathrm{e}^{\overline{\gamma}_R\left(\frac{l}{2} - x\right)}\right) \tag{25}$$

b) $d \approx r$ (Kabel sehr nahe der Rohrleitung)

$$|x| \leqq \frac{l}{2}$$

$$\overline{U}_A = \overline{U}'_i \frac{(1+\mathrm{j})\,R'_W}{\overline{Z}'_R}\left(x - \frac{\overline{P}}{\overline{\gamma}_R} \sinh \overline{\gamma}_R x\right) \tag{26}$$

$$x \geqq \frac{l}{2}$$

$$\overline{U}_A = \overline{U}'_i \frac{(1+\mathrm{j})\,R'_W}{\overline{Z}'_R}\left(\frac{l}{2} - \frac{\overline{P} \sinh \overline{\gamma}_R \frac{l}{2}}{\overline{\gamma}_R}\, \mathrm{e}^{\overline{\gamma}_R\left(\frac{l}{2} - x\right)}\right) \tag{27}$$

In diesen Gleichungen bedeuten:

U'_i	die Spannung pro km, die die Hochspannungsleitung mit Berücksichtigung der Abschirmungswirkung des Erdseils, an der Schleife Kabel—Erde oder Rohrleitung—Erde induziert.
R'_K	Gleichstromwiderstand pro km des Kabelmantels.
Z'_{RK}	Gegenimpedanz pro km zwischen Rohrleitung und Kabel.
Z'_R, Z'_K	Impedanz pro km der Schleife Rohrleitung—Erde bzw. Kabelmantel—Erde.
R_R	Erdungswiderstand der Rohrleitung.
W_R	Wellenimpedanz der Rohrleitung.
R_K	Erdungswiderstand des Kabelmantels.
W_K	Wellenimpedanz des Kabelmantels.
γ_R, γ_K	Übertragungsmass der Rohrleitung bzw. des Kabelmantels.

$$\overline{P} = \frac{R_R}{R_R\, \mathrm{e}^{\overline{\gamma}_R \frac{l}{2}} + \overline{W}_R \sinh \overline{\gamma}_R \frac{l}{2}}$$

$$\overline{C} = \overline{U}'_i \frac{R_K}{R_K\, \mathrm{e}^{\overline{\gamma}_K \frac{l}{2}} + \overline{W}_K \sinh \overline{\gamma}_K \frac{l}{2}} \cdot$$

$$\cdot \left[1 - \frac{\overline{Z}'_{RK}}{\overline{Z}'_R}\left(1 + \overline{P} \frac{\overline{\gamma}_K^{\,2}}{\overline{\gamma}_R^{\,2} - \overline{\gamma}_K^{\,2}}\, \mathrm{e}^{\overline{\gamma}_R \frac{l}{2}} + \overline{P} \frac{\overline{Z}'_K}{R_K} \frac{\overline{\gamma}_R}{\overline{\gamma}_R^{\,2} - \overline{\gamma}_K^{\,2}} \sinh \overline{\gamma}_R \frac{l}{2}\right)\right]$$

Aus den Gl. (22) bis (27) geht folgendes hervor:

a) Die Aderspannung ist proportional zur induzierten Spannung U'_i, und damit proportional zum induzierenden Erdschlußstrom der Hochspannungsleitung I_K.

b) Im Falle metallischer Verbindung des Kabelmantels mit der Rohrleitung beeinflussen nur die Eigenschaften der Rohrleitung die Aderspannung[6]); wenn diese Verbindung ausfällt, sind auch die Eigenschaften des Kabelmantels von Bedeutung.

c) Im Falle einer metallischen Verbindung des Kabelmantels mit der Rohrleitung ist die Aderspannung proportional zum Quotienten:

$$\frac{\overline{Z}'_R - \overline{Z}'_{RK}}{\overline{Z}'_R} = \frac{\overline{Z}'_i + \mathrm{j}\,\omega\, 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{d}{r}}{\overline{Z}'_R}$$

Das bedeutet, dass diese Spannung umso grösser wird, je grösser der Abstand d zwischen Rohrleitung und Kabel ist.

d) Für $x \to \infty$ (sehr lange Rohrleitung) strebt die Aderspannung einem Grenzwert zu.

[6]) Das gilt unter der annähernden Annahme, dass diese Verbindung den Strom der Rohrleitung nicht beeinflusst.

Im Falle keiner metallischen Verbindung zwischen Kabelmantel und Rohrleitung beträgt dieser Grenzwert [siehe Gl. (23)]:

$$\overline{U}_A \text{ für } x \to \infty = \overline{U}_i' \left(1 - \frac{\overline{Z}_{RK}'}{\overline{Z}_R'}\right) \frac{R_K'}{\overline{Z}_K'} \cdot \frac{l}{2}$$

Diese Spannung entspricht der Aderspannung an der Stelle $x = \pm\, l/2$ für unendlich gute Erdung der Rohrleitung und des Kabelmantels, wie sie aus der Gl. (22) für $R_R = 0$ und $R_K = 0$ ($\overline{C}$ und $\overline{P} = 0$) entsteht.

Im Falle von vielfachen metallischen Verbindungen des Kabelmantels mit der Rohrleitung beträgt dieser Grenzwert [siehe Gl. (27)]:

$$\overline{U}_A \text{ für } x \to \infty = \overline{U}_i' \left(1 - \frac{\overline{Z}_{RK}'}{\overline{Z}_R'}\right) \frac{l}{2}$$

was auch $R_R = 0$ entspricht.

Hier soll noch folgender scheinbarer Widerspruch aufgeklärt werden: $R_K = 0$ und $R_R = 0$ entspricht einer metallischen Verbindung des Kabelmantels mit der Rohrleitung an den Stellen $x = \pm\, l/2$. Die Gl. (22) und (24) sollten also für $R_K = 0$ und $R_R = 0$ ($\overline{C}$ und $\overline{P} = 0$) gleiche Werte für $x = \pm\, l/2$ liefern. Das ist aber nicht der Fall, denn die zwei Resultate unterscheiden sich durch den Faktor $R_K'/\overline{Z}_K'$. Dieser Widerspruch entsteht dadurch, dass vorausgesetzt wurde, dass die metallische Verbindung des Kabelmantels mit der Rohrleitung den Strom in der Rohrleitung nicht beeinflusst, was nur annähernd zutrifft. Der Faktor $R_K'/\overline{Z}_K'$ hat einen Wert der sehr nahe bei 1 liegt; für das berechnete Beispiel ist

$$\left|\frac{R_K'}{\overline{Z}_K'}\right| \approx 0{,}96$$

5. Numerische Anwendungen

Eine Hochspannungsleitung laufe auf einer Strecke l (40 oder 10 km) parallel zu einer unendlich langen und durchgehenden Rohrleitung (Fig. 5). Die elektrische Leitung ist

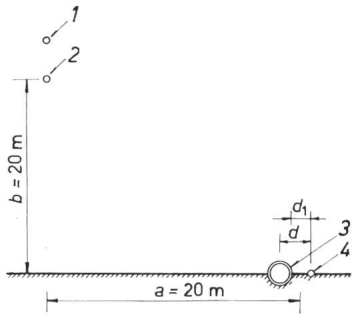

Fig. 5
Berechnete Anordnung von Hochspannungsleitung und Rohrleitung
1 Erdseil; *2* Hochspannungsleitung; *3* Rohrleitung; *4* Kabel
Weitere Bezeichnungen siehe im Text

mit einem Erdseil ausgerüstet. Parallel zur Rohrleitung ist das Steuerkabel für die Steuerung der Schieberstationen verlegt. Die Anordnung dieser Leitungen ist aus Fig. 5 ersichtlich. Der Abstand zwischen Erdseil und Hochspannungsleitung oder zwischen Rohrleitung und Kabel ist gering im Vergleich zu den übrigen Abmessungen der Anlage. Unter diesen Voraussetzungen wurden folgende Grössen berechnet:

a) Die Spannung gegen Erde U_x der Rohrleitung und des Kabelmantels (Fig. 6, 7).

b) Der Strom I_x längs der Rohrleitung (Fig. 8).

c) Die Aderspannung U_A zwischen Kabelmantel und Kabeladern (Fig. 9 und 10).

Vorausgesetzt wird:

Der Erdkurzschlußstrom betrage $I_K = 5$ kA (Effektivwert).

Der Widerstand des Erdseils betrage $R_{aa}' = 1\ \Omega/\text{km}$.

Die spezifische Leitfähigkeit des Erdbodens sei konstant und betrage $\sigma = 1/100\,\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ entsprechend einem spezifischen Widerstand von $\varrho = 100\,\Omega\,\text{m}$.

Die Rohrleitung bestehe aus einem Stahlrohr von $r = 300$ mm äusserem Radius und 10 mm Wandstärke. Als Schutz gegen Korrosion ist sie isoliert durch eine Glasfasern-Bitumenisolation von 4 mm Stärke, die eine Ableitung von $g' = 0{,}01\ \Omega^{-1}\text{km}^{-1}$ und eine Dielektrizitätskonstante $\varepsilon = 4$ aufweist. Die spezifische Leitfähigkeit des Materials des Stahlrohrs sei $\sigma = 7 \cdot 10^6\ \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ und die relative Permeabilität sei $\mu_r = 500$ (konstant) oder $\mu_r = 100$ (konstant).

Das Steuerkabel habe einen Bleimantel von 20 mm äusserem Durchmesser und 1,2 mm Wandstärke; es ist mit Thermoplast-Isolation von 1 mm Dicke und Dielektrizitätskonstante $\varepsilon = 3$ von der Erde isoliert.

5.1 Impedanz Z_R' pro km der Schleife Rohrleitung mit Erdrückleitung

Wegen der grossen Wandstärke der Rohrleitung (10 mm) tritt die Stromverdrängung stark in Erscheinung. Der Gleichstromwiderstand pro km des Rohres ist:

$$R_G' = \frac{1}{\sigma F}$$

Mit $\sigma = 7 \cdot 10^6\,\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ und $F = \pi \cdot 0{,}59 \cdot 0{,}01\ \text{m}^2$ wird:

$$R_G' = 0{,}0077\ \Omega/\text{km}$$

Die Eindringtiefe des Stromes, das heisst die Tiefe, in welcher die Stromdichte auf 1/e der Stromdichte an der Oberfläche sinkt, beträgt [3]:

$$\frac{1}{\delta} = \sqrt{\frac{\omega\,\mu\,\sigma}{2}}$$

Bei einer relativen Permeabilität des Rohrmaterials von $\mu_r = 500$ und einer spezifischen Leitfähigkeit des Erdbodens von $\sigma = 7 \cdot 10^6\,\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ ist

$$\mu = \mu_0\,\mu_r = 4\,\pi \cdot 10^{-7}\,\Omega\,\text{sm}^{-1} \cdot 500 = 2\,\pi \cdot 10^{-4}\,\Omega\,\text{sm}^{-1}$$

und

$$\delta = 1{,}2\ \text{mm}$$

Bei $\mu_r = 100$ wird $\delta = 2{,}7$ mm.

Daraus geht hervor, dass der Wechselstromwiderstand des Rohres mit grosser Annäherung gleich dem Wechselstromwiderstand eines massiven Leiters mit einem Durchmesser vom äusseren Durchmesser des Rohres ist.

Bezeichnet man

$$x = \frac{r}{2}\sqrt{\frac{\omega\,\mu\,\sigma}{2}} = \frac{r}{2} \cdot \frac{1}{\delta}$$

so gilt für $x \gg 1$:

$$\frac{R_W'}{R_G''} \approx \frac{\omega\,L_i'}{R_G''} \approx x$$

wobei

r Radius des Rohres (300 mm);
R_W' Wechselstromwiderstand pro km des Rohres;
R_G'' Gleichstromwiderstand pro km eines massiven Leiters mit dem Radius $r = 300$ mm, und
L_i' innere Induktivität des Rohres (oder Vollstabes).

In vorliegendem Fall ist:

für $\mu_r = 500$: $\quad x_{500} = \dfrac{300}{2} \cdot \dfrac{1}{1{,}2} = 125\ (\gg 1)$

für $\mu_r = 100$: $\quad x_{100} = \frac{300}{2} \cdot \frac{1}{2{,}7} = 55{,}6\,(\gg 1)$

und

$$R''_G = 0{,}000502\ \Omega/\mathrm{km}$$

Damit wird:

für $\mu_r = 500$: $R'_W \approx \omega L'_i \approx x_{500}\, R'' = 0{,}063\ \Omega/\mathrm{km}\,(\approx 8{,}2\ \mathrm{R}')$

für $\mu_r = 100$: $R'_W \approx \omega L'_i \approx x_{100}\, \mathrm{R}''_G = 0{,}028\ \Omega/\mathrm{km}\ (\approx 3{,}6\ R'_G)$

Die gesamte Impedanz pro km der Schleife der Rohrleitung mit Erdrückleitung wird aus der Formel [1]:

$$\overline{Z}'_R = \left[R'_W + \pi^2 f - \pi f \frac{8\sqrt{2}}{3}\alpha b + \right.$$
$$\left. + \mathrm{j}\omega\left(L'_i + 1 + 2\ln\frac{2}{\gamma\alpha r} + \frac{4\sqrt{2}}{3}\alpha b\right)\right] 10^{-4}\ \Omega/\mathrm{km}$$

berechnet. In dieser Formel bedeutet: b Höhe der Leitung über Boden. Für $b = 0$, wie vorausgesetzt, wird somit:

$$\overline{Z}'_R = \left[R'_W + \pi^2 f + \mathrm{j}\,\omega\left(L'_i + 1 + 2\ln\frac{2}{\gamma\alpha r}\right)\right] 10^{-4}\ \Omega/\mathrm{km} \quad (28)$$

wobei

$$\alpha = \sqrt{4\pi\sigma\omega}$$

Für $\sigma = 10^{-13}$ im elektromagnetischen System (was $\varrho = 100\ \Omega\,\mathrm{m}$ entspricht) ist:

$\alpha = 2 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{cm}^{-1}$
$\gamma = 1{,}78$ (Bessel-Konstante)
$r =$ Radius der Rohrleitung $= 300$ mm

Durch Einsetzen wird:

für $\mu_r = 500$: $\quad \overline{Z}'_R = 0{,}1125 + \mathrm{j}\,0{,}569\ \Omega/\mathrm{km}$
$\quad Z'_R = 0{,}58\ \Omega/\mathrm{km}$

und für $\mu_r = 100$: $\quad \overline{Z}'_R = 0{,}078 + \mathrm{j}\,0{,}532\ \Omega/\mathrm{km}$
$\quad Z'_R = 0{,}54\ \Omega/\mathrm{km}$

5.2 Querableitung pro km der Rohrleitung

Es ist

$$\overline{G}'_R = g' + \mathrm{j}\,\omega c'$$

Für 4 mm Isolationsdicke und $\varepsilon = 4$ wird:

$$c' = 1{,}67 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{F/km}$$

Mit $g' = 0{,}01\ \Omega^{-1}\mathrm{km}^{-1}$ ist:

$$\overline{G}'_R = 0{,}01 + \mathrm{j}\,0{,}00525\ \Omega^{-1}\mathrm{km}^{-1}$$

5.3 Wellenimpedanz und Übertragungsmass der Rohrleitung (für $\mu_r = 500$)

Es ist

$$\overline{W}_R = \sqrt{\frac{\overline{Z}'_R}{\overline{G}'_R}} = \sqrt{\frac{0{,}1125 + \mathrm{j}\,0{,}569}{0{,}01 + \mathrm{j}\,0{,}00525}} = 6{,}46 + \mathrm{j}\,3{,}1\ \Omega$$

$$W_R = 7{,}17\ \Omega$$

$$\overline{\gamma}_R = a + \mathrm{j}\,b = \sqrt{\overline{Z}'_R\,\overline{G}'_R} = \sqrt{(0{,}1125 + \mathrm{j}\,0{,}569)(0{,}01 + \mathrm{j}\,0{,}00525)} =$$
$$= 0{,}048 + \mathrm{j}\,0{,}065\ \mathrm{km}^{-1}$$

also ist

$$a = 0{,}048\ \mathrm{km}^{-1}$$

und

$$b = 0{,}065\ \mathrm{km}^{-1}$$

5.4 Impedanz Z'_K pro km der Schleife, Kabel mit Erdrückleitung

Im Kabelmantel kann die Stromverdrängung vernachlässigt werden. Der Wechselstromwiderstand gleicht also dem Gleichstromwiderstand und beträgt:

$$R'_W \approx R'_K = 3 \quad \Omega/\mathrm{km}$$

Die innere Induktivität des Kabelmantels wird aus der Formel [2]:

$$L_i = \frac{2\,W}{i^2}$$

berechnet, wobei

$$W = i^2 \frac{\mu\, l}{4\pi r_0^4} \int_{r_1}^{r_0} r^3\,\mathrm{d}r$$

die in der Länge l des Mantels aufgespeicherte magnetische Energie und r_1, r_0: innerer und äusserer Radius des Kabelmantels bedeuten. Damit wird:

$$L'_i = \frac{L_i}{l} = 0{,}01\ \mathrm{m\,H/km}$$

Die Impedanz pro km Z'_K des Kabelmantels mit Erdrückleitung wird aus Gl. (28) berechnet:

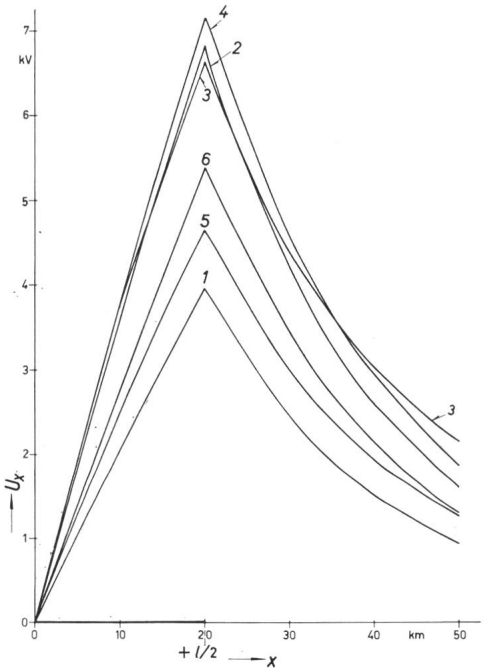

Fig. 6

Effektivwert der Spannung gegen Erde U_x

Kabel von der Rohrleitung isoliert, beeinflusste Länge $l = 40$ km

Kurve	Spannung gegen Erde U_x		zusätzliche Erdung		Abstand der Kabelachse von der Oberfläche der Rohrleitung d_1 cm
	der Rohrleitung	des Kabelmantels	der Rohrleitung R_R Ω	des Kabelmantels R_K Ω	
1	/		5		
2	/		∞		
3		/	∞	∞	10
4		/	∞	∞	100
5		/	5	∞	10
6		/	5	∞	100

Weitere Bezeichnungen siehe im Text

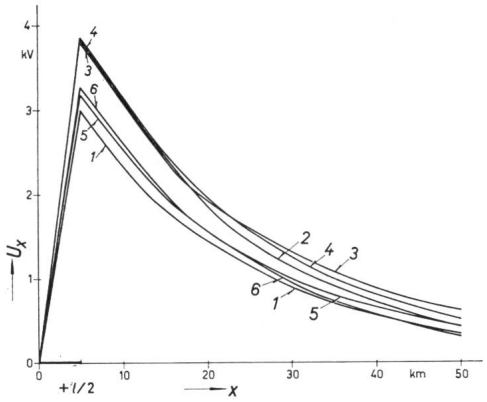

Fig. 7
Wie Fig. 6, aber für eine beeinflusste Länge von $l = 10$ km
Weitere Bezeichnungen siehe im Text

$$\overline{Z}'_K = 3{,}05 + \mathrm{j}\,0{,}72 \quad \Omega/\mathrm{km}$$

$$\overline{Z}'_K = 3{,}13 \quad \Omega/\mathrm{km}$$

(Dieser Wert ist praktisch gleich dem Ohmschen Mantelwiderstand.)

5.5 Querableitung pro km des Kabelmantels

Für unendlich gute Isolierung des Kabels ist:

$$\overline{G}'_K = \mathrm{j}\,\omega\, c'$$

Für eine Isolationsdicke von 1 mm und eine Dielektrizitätskonstante der Isolation von $\varepsilon = 3$ ist:

$$c' = 1{,}75 \cdot 10^{-6} \quad \mathrm{F/km}$$

und damit

$$\overline{G}'_K = \mathrm{j}\,0{,}00055\,\Omega/\mathrm{km}$$

5.6 Wellenimpedanz und Übertragungsmass des Kabelmantels

$$\overline{W}_K = \sqrt{\frac{\overline{Z}'_K}{\overline{G}'_K}} = \sqrt{\frac{3{,}05 + \mathrm{j}\,0{,}72}{\mathrm{j}\,0{,}00055}} = 59{,}3 - \mathrm{j}\,46{,}8\,\Omega$$

$$W_K = 75\,\Omega$$

$$\overline{\gamma}_K = a + \mathrm{j}\,b = \sqrt{\overline{Z}'_K\,\overline{G}'_K} = \sqrt{(3{,}05 + \mathrm{j}\,0{,}72)\,\mathrm{j}\,0{,}00055} =$$
$$= 0{,}0258 + \mathrm{j}0{,}03255\ \mathrm{km}^{-1}$$

also ist

$$a = 0{,}0258\ \mathrm{km}^{-1}$$

und

$$b = 0{,}03255\ \mathrm{km}^{-1}$$

5.7 Die Gegeninduktivität pro km M'

zwischen Hochspannungsleitung und Kabel oder Rohrleitung ist praktisch in beiden Fällen gleich. Sie wird aus Gl. (2) berechnet:

$$\gamma = 1{,}78$$
$$\alpha = \sqrt{4\pi\sigma\omega} = 2 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{cm}^{-1}$$
$$d = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{2000^2 + 2000^2} = 2830\ \mathrm{cm} \quad \text{(siehe Fig. 5)}$$
$$b = 2000\ \mathrm{cm}$$
$$c = 0$$

Damit ist:

$$\overline{M}' = 702 - \mathrm{j}\,153 \quad \mu\mathrm{H/km}$$

und

$$M' = 719 \quad \mu\mathrm{H/km}$$

5.8 Resultate in Kurvenform

Durch Auswertung dieser Angaben für eine relative Permeabilität des Rohrmaterials $\mu_r = 500$ (konstant) wurden folgende Kurven gezeichnet, die den Effektivwert der entsprechenden Grössen geben:

a) Spannung der Rohrleitung gegen Erde U_{Rx}: Fig. 6 und 7, Kurven *1* und *2*, Gl. (6) und (8).
b) Spannung des Kabelmantels gegen Erde U_{Kx}, Rohrleitung und Kabel nicht verbunden: Fig. 6 und 7, Kurven *3...6*, Gl. (12) und (14).
c) Strom des Rohres I_{Rx}: Fig. 8, Gl. (7) und (9).
d) Aderspannung U_A [7]) für:
   α) Kabelmantel und Rohrleitung in metallischer Verbindung auf der ganzen Länge mit Achsenabstand $d \approx r$. (Kabel direkt an der Rohroberfläche): Fig. 9 und 10, Kurven *1* und *3*, Gl. (26) und (27).
   β) Kabelmantel und Rohrleitung in metallischer Verbindung auf der ganzen Länge mit Achsenabstand $d > r$: Fig. 9 und 10, Kurven *2* und *4*, Gl. (24) und (25).
   γ) Kabelmantel isoliert von der Rohrleitung: Fig. 9 und 10, Kurven *5...9*, Gl. (22) und (23).
e) Spannung der Rohrleitung gegen Erde bei $x = \pm\, l/2$ in Funktion der Länge der beeinflussten Strecke l für durchverbundene und bei $\pm\, l/2$ isolierte Rohrleitung: Fig. 11, Gl. (6).

6. Schlussfolgerungen

1. Mit einem Erdschlußstrom der Hochspannungsleitung von $I_K = 5$ kA und den übrigen Voraussetzungen des Beispiels ergibt sich an den Stellen $x = \pm\, l/2$ der Rohrleitung eine Spannung gegen Erde zwischen 3,9 kV und 6,8 kV für eine beeinflusste Länge von $l = 40$ km und zwischen 3 kV und 3,8 kV für $l = 10$ km. Für den nicht mit der Rohrleitung verbundenen Kabelmantel sind die entsprechenden Werte 4,6...7,1 kV und 3,2...3,9 kV (siehe Fig. 6 und 7).

[7]) In den Abb. 9 und 10 ist strichliert die Kurve (9) gezeichnet, die dem Falle eines bei $\pm\, l/2$ mit $R_K = 5\,\Omega$ geerdeten von der Rohrleitung getrennten Kabelmantels und eine ungeerdete Rohrleitung ($R_R = \infty$) gilt. Dieser Fall gibt weitaus die schlimmsten Aderspannungen und sollte daher bei Induktionsgefährdung vermieden werden.

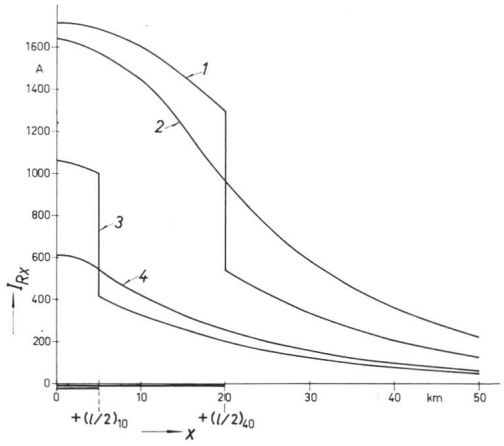

Fig. 8
Effektivwert des Stromes I_{Rx} der Rohrleitung
1 beeinflusste Länge $l = 40$ km, zusätzliche Erdung der Rohrleitung $R_R = 5\,\Omega$; *2* wie Kurve *1*, aber ohne zusätzliche Erdung der Rohrleitung ($R_R = \infty$); *3* beeinflusste Länge $l = 10$ km, zusätzliche Erdung der Rohrleitung $R_R = 5\,\Omega$; *4* wie Kurve *3*, aber ohne zusätzliche Erdung der Rohrleitung ($R_R = \infty$)
Weitere Bezeichnungen siehe im Text

2. Die Erdung beider Enden der beeinflussten Strecke der Rohrleitung mit $R = 5\,\Omega$ reduziert die maximale Spannung gegen Erde U_{Rx} im berechneten Beispiel um etwa 40% für $l = 40$ km oder 21% für $l = 10$ km (siehe Fig. 6 und 7).

3. In einer elektrisch durchverbundenen und nicht geerdeten Rohrleitung nimmt die Spannung gegen Erde U_x an den Stellen $x = \pm\, l/2$ praktisch linear mit der Länge l bis $l = 1/a$ zu (a Dämpfungsmass der Rohrleitung). Für grössere beeinflusste Längen l ändert sich diese Spannung nur sehr wenig (siehe Fig. 11, Kurve *1*). Bei 5 kA Erdschlußstrom beträgt diese Endspannung ca. 6 kV (siehe Fig. 11).

4. Häufige Querverbindungen zwischen Rohrleitung und Kabelmantel verhindern Spannungsdifferenzen zwischen diesen ($\Delta\, U_x = 0$).

5. Der Grenzwert der Spannung zwischen den Kabeladern und dem Kabelmantel (Aderspannung U_A) nimmt linear mit der beeinflussten Länge l zu, soweit die Kabeladern nicht durch

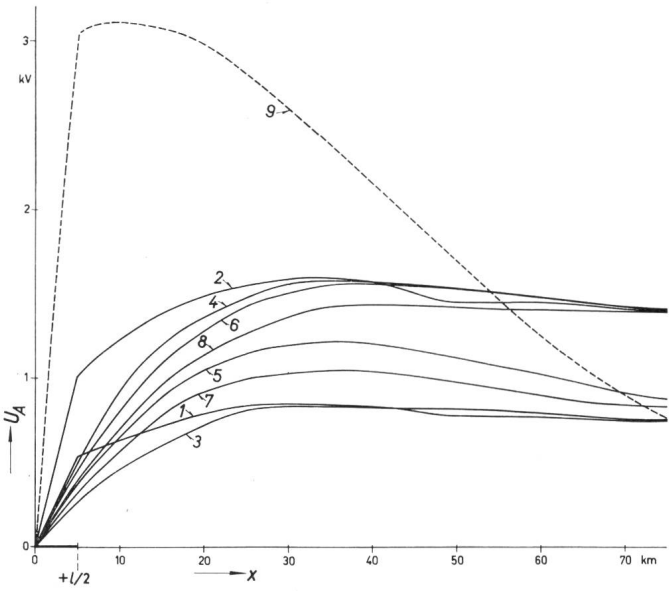

Fig. 10
Wie Fig. 9, aber für eine Länge von $l = 10$ km
Weitere Bezeichnungen siehe im Text

Schutzübertrager aufgetrennt werden (siehe Fig. 9 und 10, Kurven *1...8*).

6. Für einen Erdschlußstrom von 5 kA entsteht ein Grenzwert der Aderspannung U_A zwischen 3 kV und 5,7 kV für $l = 40$ km und zwischen 0,75 kV und 1,42 kV für $l = 10$ km (siehe Fig. 9 und 10).

7. Die kleinste Aderspannung U_A wird erreicht durch vielfache Querverbindung des Kabelmantels mit der Rohrleitung und möglichst kleinen Abstand zwischen diesen beiden. Durch Entfernen des Kabelmantels von der Oberfläche der Rohrleitung um 100 cm wird die Aderspannung annähernd verdoppelt. Erdung der Rohrleitung mit $R_R = 5\,\Omega$ beeinflusst im letzteren Falle die Aderspannung U_A sehr wenig (siehe Fig. 9 und 10).

8. Ein von der Rohrleitung getrenntes, mit eigenen Erdungen versehenes Steuerkabel (Rohrleitung nicht geerdet) erfährt

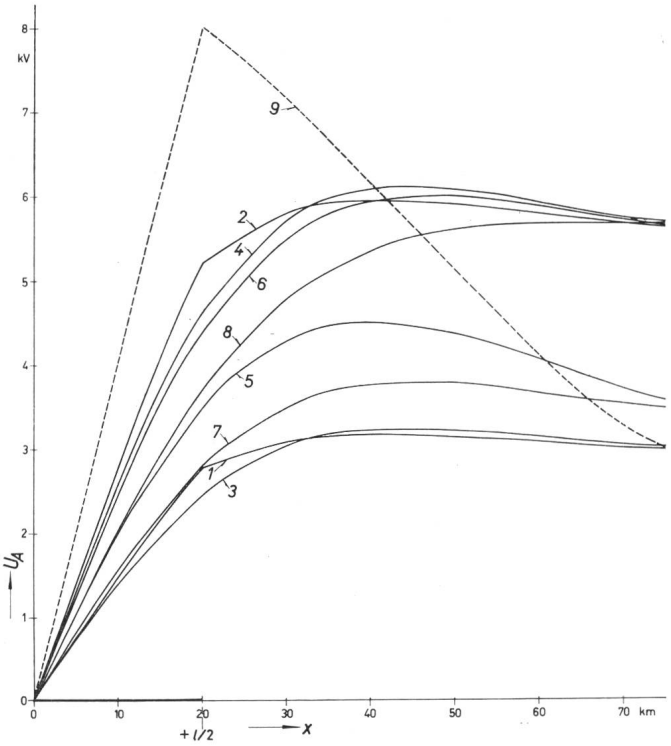

Fig. 9
Effektivwert der Aderspannung U_A, beeinflusste Länge $l = 40$ km

Kurve	Kabelmantel und Rohrleitung		Abstand der Kabelachse von der Oberfläche der Rohrleitung	Widerstand der zusätzlichen Erdung	
	elektrisch verbunden	isoliert	d_1 cm	R_R Ω	R_K Ω
1	/		2	5	
2	/		100	5	
3	/		2	∞	
4	/		100	∞	
5		/	10	∞	∞
6		/	100	∞	∞
7		/	10	5	∞
8		/	100	5	∞
9		/	10	∞	5

Weitere Bezeichnungen siehe im Text

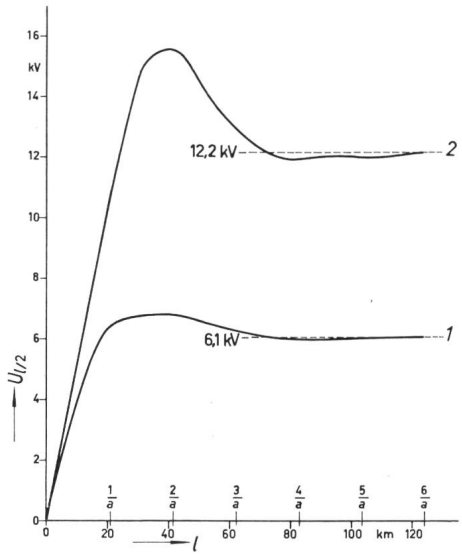

Fig. 11
Effektivwert der Spannung gegen Erde U_{Rx} der Rohrleitung an den Stellen $x = \pm\, l/2$
1 durchgehende Rohrleitung; *2* beeinflusste Strecke von Länge l an den Enden isoliert; a Dämpfungsmass der Rohrleitung

sehr hohe Aderspannungen und sollte deshalb überall dort, wo Induktionsgefährdung besteht, vermieden werden (siehe Fig. 9 und 11, Kurve 9).

Diese Arbeit wurde am Hochspannungslaboratorium der ETH in Zürich auf Anregung von Prof. Dr. K. Berger in den Jahren 1964/1965 durchgeführt, und zwar auf Grund eines Stipendiums der Kommission für ausländische Studierende des Eidg. Departements des Innern. Der Autor möchte auch an dieser Stelle für die gewährten Mittel seinen besten Dank aussprechen.

Literatur

[1] C.C.I.T.T.: Directives concerning the Protection of Telecommunication Lines against the adverse Effects of Electric Power Lines. Rome Edition 1937, Geneva 1952.

[2] *K. Küpfmüller:* Einführung in die theoretische Elektrotechnik. 7. Auflage, Springer Berlin 1962.

[3a] *A. von Weiss:* Übersicht über die theoretische Elektrotechnik. Erster Teil: Die physikalisch-mathematischen Grundlagen. 2. Auflage Füssen 1959.

[3b] *A. von Weiss:* Übersicht über die theoretische Elektrotechnik. Zweiter Teil: Repetitorium und Anleitung zur Durcharbeit der Grundlagen. 3. Auflage Prien 1961.

Adresse des Autors:

Dr. *Chr. Menemenlis,* Technische Hochschule von Athen (Hochspannungslaboratorium), Patission-Str. 42, Athen (Griechenland).

Raumsparende Konstruktionen von ortsfesten Bleiakkumulatoren

Von *F. König,* Soest

621.355.2

Die klassische Bauart ortsfester Bleibatterien mit positiven Grossoberflächen-(Planté-)Platten und negativen Kastenplatten (gemäss Normblättern DIN 40730 und 40731) in den Kapazitätsgrössen 36, 72, 144 und 288 Ah (bei 10stündiger Entladung) ist immer noch weit verbreitet. Im Fernmelde-Hochhaus Frankfurt am Main stehen z. B. Batterien dieser Art im Gesamtgewicht von etwa 250 t. Im Bereitschafts-Parallel-Betrieb der Post erreichen die positiven Platten eine Lebensdauer von 20 Jahren und die negativen die doppelte. Insofern ist diese Bauart die wirtschaftlichste. Meistens ist aber eine so grosse Lebensdauer gar nicht erforderlich; auch die dazu benötigten Batterieräume sind gross und teuer. Das Bestreben nach Platzersparnis führte ab 1952 zur Konstruktion mit positiven und negativen Gitterplatten, deren Grösse in den Kapazitäten 36, 72 und 170 Ah so bemessen war, dass in die vorhandenen Gefässe für Grossoberflächen-(Gro-)Platten 36, 72 und 144 Ah die doppelte Plattenzahl und daher mindestens die doppelte Kapazität eingebaut werden konnte (siehe Tabelle I).

Es sind noch viele Batterien dieser Bauart von z. T. recht grossen Kapazitäten in Betrieb, aber ihre Lebensdauer befriedigte nicht immer. Sie werden daher nicht mehr gebaut, da sie durch sogenannte «PzS»-Batterien mit positiven Röhrchenplatten überholt sind.

Um indessen die Vorteile der positiven Gro-Platten in einer raumsparenden und ausserdem geschlossenen Bauart ausnützen zu können, hat man die negativen Kastenplatten durch Gitterplatten ersetzt und mehrzellige Gefässe, zunächst aus Glas, dann aus glasklarem Kunststoff, angewandt. Fig. 1 und 2 zeigen solche «Verbundbatterien», die in den Grössen 6 V; 30, 45 und 60 Ah und 4 V, 72 und 108 Ah vielfach von der Deutschen Bundesbahn für den Betrieb von Signal- und Schranken-Anlagen verwendet werden. Durch Parallelschaltung der beiden Zellen 72 und 108 Ah erhält man 2-V-Einheiten geschlossener Bauart von 144 und 216 Ah. Die positiven Platten haben eine Stärke von 10 bzw. 12 mm. Eine ähnliche Entwicklung hat in England zur Verwendung dünnerer Gro-Platten im Engeinbau mit negativen Gitterplatten geführt,

34'584-587

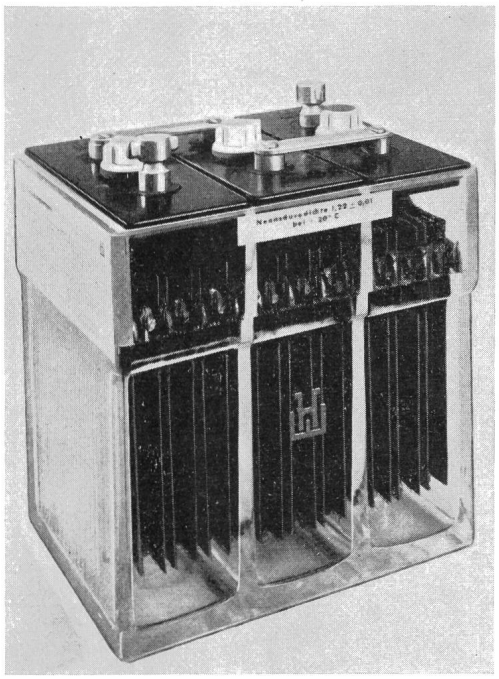

Fig. 1
Verbundbatterie 6 V, 45 Ah, mit positiven Grossoberflächen und negativen Gitter-Platten

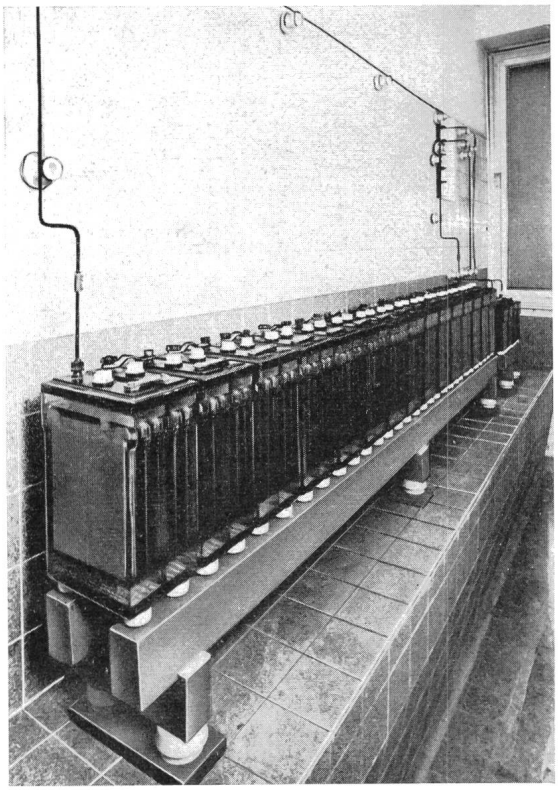

Fig. 2
60-V-Batterie aus 15 Einheiten 4 V, 72 Ah