

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

**Band:** 50 (1959)

**Heft:** 25

**Artikel:** Berücksichtigung der Impedanz des Messbelages bei Verlustfaktormessungen

**Autor:** Deutsch, F.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1059494>

#### 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:** 21.01.2026

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

quence-puissance [2], c'est-à-dire en faisant emploi d'un régulateur de réseau. Les essais du 12 mars 1959 ayant démontré l'équivalence des résultats du mode *indirect* et du mode *direct*, nous ne saurions donc assez chaudement recommander l'utilisation du premier d'entre eux. Ajoutons, pour terminer, que les régulateurs de vitesse auxquels il y a lieu d'avoir recours pour accomplir les ordres émanant du régulateur de réseau, doivent être bien adaptés à ce genre de service. Les régulateurs de vitesse à tête électrique qui permettent l'injection directe de l'ordre sous forme d'une tension — sans aucun dispositif intermédiaire, cause d'inévitables retards — méritent d'être à cet égard particulièrement préconisés.

## Bibliographie

- [1] Cahen, F. et A. Dejou: Le contrôle automatique de la marche en parallèle de très vastes ensembles d'interconnexion. Bull. Soc. franç. Electr. 7<sup>e</sup> série, t. 8(1958), n° 92, p. 463...478.
- [2] Gaden, D.: Les divers modes d'application du réglage fréquence-puissance. Bull. ASE t. 49(1958), n° 13, p. 576...583.
- [3] Juillard, E.: Influence des variations de tension et de fréquence sur la charge absorbée par les consommateurs. Bull. ASE t. 49(1958), n° 13, p. 570...576.
- [4] Renchon, R. et G. Daumerie: Image thermique de ligne aérienne. Conférence internationale des Grands Réseaux électriques à haute tension (CIGRE) 16<sup>e</sup> session 1956, t. 3, rapp. 303.
- Cuénod, M. et R. Renchon: Le contrôle de la surcharge des lignes aériennes par image thermique. Bull. ASE t. 48(1957), n° 12, p. 564...566; 575...579.

### Adresse de l'auteur:

D. Gaden, professeur, directeur des Ateliers des Charmilles S. A., Genève.

## Berücksichtigung der Impedanz des Messbelages bei Verlustfaktormessungen

Von F. Deutsch, Wettingen

621.317.374 : 621.317.733.011.4

In der Arbeit wird der Einfluss von Messbelägen mit verteilter Impedanz auf Verlustfaktormessungen untersucht. Zu diesem Zwecke werden zuerst allgemeine Formeln für die Ersatzimpedanz des Kreises impedanzbehafteter Messbelag-Dielelektrika hergeleitet. Dabei werden zwei in der Praxis vorkommende Anschlussmöglichkeiten berücksichtigt. Aus den gefundenen Formeln und den Abgleichbedingungen der Schering-Brücke wird der Messfehler, welcher von der Impedanz des Messbelages herrührt, berechnet und die Anwendung der abgeleiteten einfachen Ausdrücke an einem numerischen Beispiel gezeigt.

L'auteur examine l'influence d'armatures à impédance répartie sur les mesures du facteur de pertes. Dans ce but, il établit tout d'abord des formules générales pour l'impédance équivalente du circuit constitué par les armatures de mesure à impédance et le diélectrique, en tenant compte de deux possibilités de connexion usuelles. A l'aide de ces formules et des conditions d'équilibre du pont de Schering, il calcule l'erreur de mesure résultant de l'impédance des armatures, puis il indique par un exemple numérique l'emploi des expressions simples ainsi obtenues.

### 1. Einleitung

Befindet sich ein festes Isoliermaterial in einem elektrischen Wechselfeld, so erwärmt es sich («dielektrische Verluste»). Die dielektrischen Verluste sind weit grösser, als es der Ohmschen Leitfähigkeit des Materials entsprechen würde; zusätzlich zu den Jouleschen Verlusten sind die Reibungsverluste durch die Umorientierung der polarisierten Moleküle und die Verluste durch Glimmen in Luft einschlüssen des Dielektrikums für die Erwärmung verantwortlich.

Im allgemeinen nehmen die dielektrischen Verluste mit steigender Temperatur und steigender Feldstärke zu. Eine Folge davon ist der sog. «Wärmedurchschlag». Das elektrische Feld erzeugt im Dielektrikum Wärme; im stationären Zustand wird die gesamte Verlustwärme an die Umgebung abgegeben, wozu ein Temperaturgradient zu den Endflächen des Dielektrikums notwendig ist, d. h. seine Innentemperatur ansteigen muss. Die erhöhte Innentemperatur verursacht höhere Verluste, diese erhöhen wiederum die Temperatur usw., bis sich schliesslich ein Gleichgewichtszustand einstellt. Überschreitet jedoch die Spannung einen gewissen kritischen Wert, so stellt sich kein Gleichgewicht ein, Verluste und Innentemperatur schaukeln sich gegenseitig hoch, bis es zur Zerstörung der Isolation kommt. Die Kippsspannung ist eine wichtige Konstante des Isolierstoffes [1]<sup>1)</sup>.

Sind in einer Isolation Lufteinschlüsse vorhanden, so beginnen diese von einer gewissen Feldstärke an zu glimmen; die Verluste werden dadurch wesentlich höher. Die Kurve der dielektrischen Verluste in Funktion der Spannung zeigt einen Knick nach

oben («Ionisationsknick») und deutet damit auf das Vorhandensein von unerwünschten Lufteinschlüssen im Dielektrikum hin.

Die Messung der dielektrischen Verluste einer Isolation in Funktion der Spannung und Temperatur gibt also einen wichtigen Hinweis für die Beurteilung ihrer Güte; folgende Rechnung zeigt, wie man die Verluste erfassen kann.

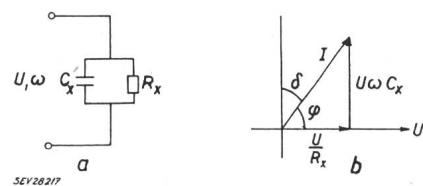


Fig. 1  
Ersatzschema (a) und Vektorbild (b) eines verlustbehafteten Dielektrikums

U angelegte Wechselspannung mit der Kreisfrequenz  $\omega$ ;  $C_x$ ,  $R_x$  Kapazität und Ohmscher Ersatzwiderstand des Dielektrikums;  $I$  Durch das Dielektrikum fliessender Strom, gegenüber der Spannung  $U$  um den Winkel  $\varphi$  phasenverschoben;  $\delta$  Komplementärwinkel zu  $\varphi$  (Verlustwinkel)

Das Ersatzschema eines nicht verlustfreien Dielektrikums werde durch die Parallelschaltung eines Kondensators  $C_x$  und eines Ohmschen Widerstandes  $R_x$  dargestellt (Fig. 1a). Bei Einwirkung einer Wechselspannung vom Effektivwert  $U$  und der Kreisfrequenz  $\omega$  sind die Verluste  $P$  im Dielektrikum — im Ersatzschema die Verluste im Widerstand  $R_x$  (Fig. 1b):

$$P = \frac{U^2}{R_x} = U^2 \omega C_x \operatorname{ctg} \varphi = U^2 \omega C_x \operatorname{tg} \delta \quad (1a)$$

Dann ist (mit  $B = U^2 \omega C_x$  = Blindleistungsaufnahme des Dielektrikums):

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P}{U^2 \omega C_x} = \frac{P}{B} = \frac{1}{\omega C_x R_x} \quad (1b)$$

bzw., bezogen auf die Volumeneinheit

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P}{U^2 \omega C_x} = \frac{p}{E^2 \omega \epsilon}$$

wobei  $p$  [ $\text{W/m}^3$ ] die Verluste pro Volumeneinheit,  $E$  [ $\text{V/m}$ ] die Feldstärke und  $\epsilon$  die Dielektrizitätskonstante des Dielektrikums sind.

Daraus folgt:

$$p = k (\epsilon \operatorname{tg} \delta) E^2 \quad (1c)$$

(k Konstante)

Der Verlustfaktor  $\operatorname{tg} \delta$  gibt also das Verhältnis der Wirkleistung (Verluste) eines Dielektrikums zu seiner Blindleistungsaufnahme an. Physikalisch sinnvoller ist die «Verlustziffer»  $\epsilon \operatorname{tg} \delta$ ; sie spielt in Gl. (1c) die Rolle der Leitfähigkeit  $\gamma$  im Jouleschen Gesetz, welches für die Volumeneinheit eines Leiters die Form  $p = \gamma E^2$  hat.

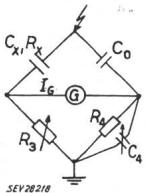


Fig. 2

**Prinzipschaltung der Schering-Brücke**  
 $C_x$  Kapazität des geprüften Dielektrikums,  
 $R_x$  sein Ersatzwiderstand;  $C_0$  Vergleichskondensator;  $R_3, R_4$  Abgleichswiderstände;  
 $C_4$  Abgleichskondensator

Die Bestimmung des Verlustfaktors  $\operatorname{tg} \delta$  und der unbekannten Kapazität  $C_x$  erfolgt in der Hochspannungstechnik mit Hilfe der Schering-Brücke. In Fig. 2 ist die Prinzipschaltung der Schering-Brücke dargestellt; in Wirklichkeit muss man die von den Erdkapazitäten der einzelnen Brückenzweige herührenden Messfehler durch eine spezielle Schaltung eliminieren [2].

Die zwei Bedingungen für den Brückenabgleich (d. h. für  $I_G = 0$ ) sind mit den Bezeichnungen von Fig. 2:

$$\frac{1}{\omega R_x C_x} = \operatorname{tg} \delta = \omega R_4 C_4 \quad (2a)$$

$$C_x = \frac{C_0 R_4}{R_3} \quad (2b)$$

Zum Zwecke der Messung des  $\operatorname{tg} \delta$  bringt man an den Oberflächen des Dielektrikums gut leitende Messbeläge auf, sei es durch Anstreichen mit Leitsilber, Metallisieren, sorgfältiges Aufkleben von Al-Folien oder durch Aufdampfen von Metall in Vakuum. Bei gewissen technischen Anordnungen besteht jedoch keine Möglichkeit, solche einwandfreien Messbeläge aufzubringen. Dies ist z. B. der Fall bei Isolationen in Transformatoren oder Messwählern. Dann muss man als Messbelag vorhandene, mehr oder weniger gut leitende Teile verwenden, so z. B. eine Wicklung oder einen halbleitenden Belag. Dieser «Messbelag» mit verteilter Impedanz kann jedoch einen beträchtlichen Einfluss auf den Brückenabgleich haben. Die üblichen Bedingungen (2a) und (2b) für den Brückenabgleich gelten jetzt nicht mehr genau und die ausgerechneten Werte für  $\operatorname{tg} \delta$  und  $C_x$  sind mit einem Fehler behaftet. Zweck der vorliegenden Rechnung ist, diesen Fehler zu bestimmen.

Zur Berechnung fasst man die Impedanz des Messbelages und des Dielektrikums zusammen und bezeichnet sie mit  $Z$ . Für die Schering-Brücke lauten dann die Abgleichbedingungen:

$$Z = \frac{1 + j \omega R_4 C_4}{j \omega C_0 R_4} \quad (3)$$

bzw.

$$\operatorname{Re}(Z) = \frac{C_4}{C_0} R_3 \quad (3a)$$

und

$$\operatorname{Im}(Z) = -\frac{R_3}{\omega C_0 R_4} \quad (3b)$$

Aus Gl. (3a) und (3b) ist ersichtlich, dass für einen Brückenabgleich  $\operatorname{Re}(Z) > 0$  und  $\operatorname{Im}(Z) < 0$  sein muss.

## 2. Die Impedanz des Systems Messbelag-Dielelektrikum

### 2.1 Differentialgleichung der Impedanzkette

Der Messbelag habe eine über seine ganze Fläche gleichmäßig verteilte Impedanz. Seine beiden Enden  $a$  und  $b$  sind mit einem gut leitenden Streifen versehen. Das Problem ist damit ein eindimensionales und kann rechnerisch relativ einfach gelöst werden.

Der Messbelag habe eine Länge  $l$  und eine (Längs-) Impedanz  $Z_s$  (gemessen zwischen  $a$  und  $b$ ). Die Impedanz einer Längeneinheit ist dann

$$Z_s' = \frac{Z_s}{l}$$

Sind beide Messbeläge mit Impedanz behaftet, ändern sich die folgenden Betrachtungen in keiner Weise.  $Z_s$  ist dann die Summe der Impedanzen beider Messbeläge. In praktisch vorkommenden Fällen wird jedoch mindestens ein Messbelag gut leitend sein.

Die Impedanz des Dielektrikums sei  $Z_p$ , pro Längeneinheit  $l$  ist sie dann:

$$Z_p' = Z_p l$$

Das Ersatzschema für die Impedanz zwischen Messbelag und Dielektrikum ist eine Kette mit Längsgliedern  $Z_s'$  und Quergliedern  $Z_p'$  (Fig. 3).  $u$  sei die

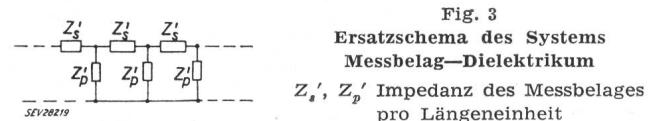


Fig. 3  
**Ersatzschema des Systems**  
**Messbelag—Dielelektrikum**

$Z_s', Z_p'$  Impedanz des Messbelages pro Längeneinheit

Spannung,  $i$  der Strom im Punkt  $x$  der Kette. Die Differentialgleichungen dieser Anordnung gewinnt man durch Anwendung der Kirchhoffschen Gesetze auf einen Knotenpunkt der Kette:

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{dx} &= -i Z_s' \\ \frac{di}{dx} &= -\frac{u}{Z_p'} \end{aligned} \right\} \frac{d^2 u}{dx^2} = \frac{Z_s'}{Z_p'} u = \alpha^2 u \quad (4)$$

wobei

$$\alpha = \sqrt{\frac{Z_s'}{Z_p'}}, \quad \alpha l = \sqrt{\frac{Z_s'}{Z_p'}} l = \sqrt{\frac{Z_s}{Z_p}}$$

Die wohlbekannte allgemeine Lösung von Gl. (4) ist:

$$U(x) = A \cosh \alpha x + B \sinh \alpha x \quad (5)$$

wobei  $A$  und  $B$  die Integrationskonstanten sind. Diese Lösung ist den jeweiligen Anfangsbedingungen anzupassen.

## 2.2 Anschluss an den verbundenen Punkten $a, b$ und den Punkt 0 (Fig. 4)

Die Anfangsbedingungen für diesen Fall sind:

$$U = U_0 \text{ für } \begin{cases} x = 0 \\ x = l \end{cases}$$

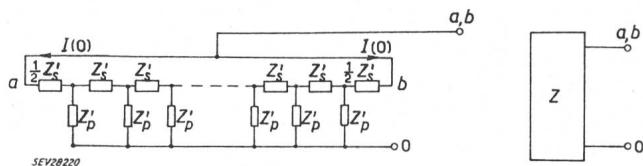


Fig. 4

Ersatzschema für den Anschluss des Messbelages an beiden Enden

$I(0)$  in das Ende des Messbelages hineinflossender Strom;  $a, b$  Enden des impedanzbehafteten Messbelages;  $0$  impedanzfreier Messbelag;  $Z_s', Z_p'$  Impedanz pro Längeneinheit des Messbelages bzw. des Dielektrikums;  $Z$  Totalimpedanz Messbelag—Dielektrikum

Ihre Berücksichtigung ergibt die Integrationskonstanten

$$A = U_0 \quad B = U_0 \frac{1 - \cosh \alpha l}{\sinh \alpha l}$$

Die Spannungsverteilung längs des Messbelages ist mit obigen Konstanten

$$u(x) = U_0 \left( \cosh \alpha x + \frac{1 - \cosh \alpha l}{\sinh \alpha l} \sinh \alpha x \right) \quad (6)$$

Der Stromverlauf längs des Messbelages folgt aus Gl. (4):

$$\begin{aligned} i(x) &= -\frac{1}{Z_s'} \cdot \frac{du}{dx} = \\ &= -\frac{\alpha}{Z_s'} \left( \sinh \alpha x + \frac{1 - \cosh \alpha l}{\sinh \alpha l} \cosh \alpha x \right) \quad (7) \end{aligned}$$

Der von beiden Seiten der Kette zufließende Strom ist

$$2 I(0) = -2 \frac{\alpha U_0}{Z_s'} \cdot \frac{1 - \cosh \alpha l}{\sinh \alpha l} \quad (8)$$

Die totale Impedanz  $Z$  wird mit

$$\begin{aligned} \alpha l &= \sqrt{\frac{Z_s}{Z_p}}, \sinh \alpha l = 2 \sinh \frac{\alpha l}{2} \cosh \frac{\alpha l}{2} \\ 1 - \cosh \alpha l &= -2 \sinh^2 \frac{\alpha l}{2} \end{aligned}$$

zu

$$\begin{aligned} Z &= \frac{U_0}{2 I(0)} = -\frac{Z_s}{2 \alpha l} \cdot \frac{\sinh \alpha l}{1 - \cosh \alpha l} = \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{Z_s Z_p} \operatorname{ctgh} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Z_s}{Z_p}} \quad (9) \end{aligned}$$

Gl. (9) kann man vereinfachen, wenn  $\operatorname{ctgh} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Z_s}{Z_p}}$

in eine Reihe entwickelt wird. Die Reihe für  $\operatorname{ctgh} x$  ist:

$$\operatorname{ctgh} x = \frac{1}{x} + \frac{x}{3} - \frac{x^3}{45} + \frac{2x^5}{945} - \dots \quad (10a)$$

bzw. für  $\operatorname{ctgh} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Z_s}{Z_p}}$ :

$$\begin{aligned} \operatorname{ctgh} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Z_s}{Z_p}} &= 2 \sqrt{\frac{Z_p}{Z_s}} + \frac{1}{6} \sqrt{\frac{Z_s}{Z_p}} - \\ &\quad - \frac{1}{8 \cdot 45} \sqrt{\left(\frac{Z_s}{Z_p}\right)^3} + \dots \quad (10b) \end{aligned}$$

Damit ist

$$\begin{aligned} Z &= \frac{1}{2} \sqrt{Z_s Z_p} \left[ 2 \sqrt{\frac{Z_p}{Z_s}} + \frac{1}{6} \sqrt{\frac{Z_s}{Z_p}} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{8 \cdot 45} \sqrt{\left(\frac{Z_s}{Z_p}\right)^3} + \dots \right] = Z_p + Z_s \left( \frac{1}{12} - \frac{1}{720} \cdot \frac{Z_s}{Z_p} + \dots \right) \end{aligned}$$

Für  $Z_s \leq Z_p$  (sowohl für Real- als auch Imaginärteil) gilt mit genügender Genauigkeit (Fehler  $< 1/720$  bei  $Z_s < Z_p$ ):

$$Z = Z_p + \frac{1}{12} Z_s \quad (9b)$$

Die Anwendung der so erhaltenen überraschend einfachen Formel (9b) sei an einem Zahlenbeispiel gezeigt:

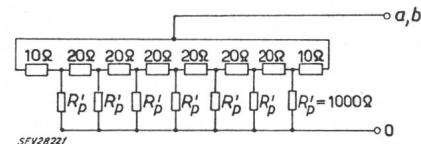


Fig. 5  
Widerstandskette zu numerischem Beispiel

$a, b$  zusammengeschlossene Enden des Längswiderstandes;  $0$  Anschluss des Querwiderstandes

Gegeben sei eine Schaltung aus Ohmschen Widerständen nach Fig. 5. Gesucht ist der Widerstand zwischen den Klemmen  $a, b$  und  $0$ . Gl. (9b) gibt sofort:

$$R = R_p + \frac{1}{12} R_s = \frac{1000}{7} + \frac{140}{12} \approx 154,6 \Omega$$

Die langwierige direkte Ausrechnung ergibt  $R \approx 155 \Omega$  (beide Resultate mit Rechenschiebergenauigkeit).

## 2.3 Anschluss zwischen Punkten $a$ und $0$ ; Punkt $b$ bleibt frei (Fig. 6)

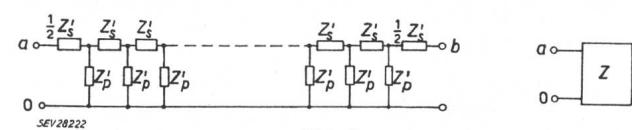


Fig. 6

Messbelag an einem Ende angeschlossen, das andere Ende frei  
Ersatzschema

$a$  angeschlossenes,  $b$  freies Ende des impedanzbehafteten Messbelages;  $0$  impedanzfreier Messbelag;  $Z_s', Z_p'$  Impedanz pro Längeneinheit des Messbelages bzw. des Dielektrikums;  $Z$  Totalimpedanz Messbelag—Dielektrikum

Hier sind die Anfangsbedingungen:  $x = 0$ ,  $U = U_0$ ;  $x = l$ ,  $i(l) = 0$ . Aus ihnen werden die

Integrationskonstanten  $A$  und  $B$  in Gl. (5) bestimmt:

$$A = U_0; B = -U_0 \operatorname{tgh} \alpha l$$

Die Lösungen für den Spannungs- und Stromverlauf sind damit:

$$u(x) = U_0 (\cosh \alpha x - \operatorname{tgh} \alpha l \cdot \sinh \alpha x) \quad (11)$$

$$i(x) = -\frac{1}{Z_s'} \cdot \frac{du}{dx} = -\frac{\alpha l}{Z_s} U_0 \cdot (\sinh \alpha x - \operatorname{tgh} \alpha l \cdot \cosh \alpha x) \quad (12)$$

Die Impedanz ist

$$Z = \frac{U_0}{I(0)} = \sqrt{Z_s Z_p} \cdot \operatorname{ctgh} \sqrt{\frac{Z_s}{Z_p}} \quad (13)$$

Auch hier kann die Hyperbelfunktion in eine Reihe entwickelt werden:

$$Z = Z_p + Z_s \left( \frac{1}{3} - \frac{1}{45} \cdot \frac{Z_s}{Z_p} + \frac{2}{945} \cdot \frac{Z_s^2}{Z_p^2} - \dots \right) \quad (13a)$$

und die Näherungsformel wird:

$$Z = Z_p + \frac{1}{3} Z_s \quad (13b)$$

Ein Vergleich der Gl. (13a) und (9a) zeigt, dass die Reihe in (9a) bedeutend schneller konvergiert. Gl. (13b) führt also zu einem grösseren Fehler als Gl. (9b). Der Fehler bei Benützung von Gl. (13b) gegenüber der genauen Formel (13) ist kleiner als  $1/45$  (2%) bei  $Z_s/Z_p \leq 1$ . Ausserdem fällt bei dieser Schaltung die Impedanz des Messbelages — wie zu erwarten war — viel stärker ins Gewicht [vergl. Gl. (13b) und Gl. (9b)].

### 3. Anwendung auf Verlustfaktormessungen

#### 3.1 Anschluss des Messbelages nach 2.2; Messbelag hat nur Ohmschen Widerstand (Fig. 7)

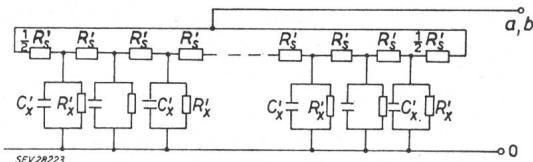


Fig. 7

Messbelag mit nur Ohmschem Widerstand, an beiden Enden angeschlossen  
Ersatzschema

a, b zusammengeschlossene Enden des widerstandbehafteten Messbelages; 0 impedanzfreier Messbelag;  $R_s'$  Widerstand des Messbelages pro Längeneinheit;  $C_x'$ ,  $R_x'$  Kapazität und Ersatzwiderstand des Dielektrikums pro Längeneinheit

Hier ist  $Z_s = R_s$  der gesamte gleichmässig verteilte vorausgesetzte Längswiderstand des Messbelages (aus getrennter Messung oder Berechnung bekannt) und  $Z_p = \frac{1}{\frac{1}{R_x} + j \omega C_x}$  die Impedanz des

$$\frac{1}{R_x} + j \omega C_x$$

Dielektrikums, welche man mit der Schering-Brücke bestimmen will.

Nach Gl. (9b) ist die Impedanz zwischen a, b und 0:

$$\begin{aligned} Z &= Z_p + \frac{1}{12} Z_s = \frac{1}{\frac{1}{R_x} + j \omega C_x} + \frac{1}{12} R_s = \\ &= R_x \left( \frac{1}{\omega^2 C_x^2 R_x^2} - j \frac{1}{\omega C_x R_x} \right) + \frac{1}{12} R_s \end{aligned}$$

$$Z = R_x \operatorname{tg}^2 \delta + \frac{1}{12} R_s - j R_x \operatorname{tg} \delta$$

Die Bedingungen für den Brückenabgleich sind nach Gl. (3a) und (3b):

$$\operatorname{Re}(Z) = R_x \operatorname{tg}^2 \delta + \frac{1}{12} R_s = \frac{C_4}{C_0} R_3$$

$$\operatorname{Im}(Z) = -R_x \operatorname{tg} \delta = -\frac{R_3}{\omega C_0 R_4}$$

Daraus folgt für den Verlustfaktor (aus der Brückenmessung, bei Kenntnis des Widerstandes des Messbelages):

$$\operatorname{tg} \delta = \omega R_4 C_4 - \frac{1}{12} \cdot \frac{\omega C_0 R_s R_4}{R_3} \quad (14)$$

Für  $R_s = 0$  reduziert sich Gl. (14) auf den bekannten Ausdruck  $\operatorname{tg} \delta = \omega R_4 C_4$ . Der Ausdruck für  $C_x$  bleibt unbeeinflusst, wie es ja zu erwarten war:

$$C_x = C_0 \frac{R_4}{R_3} \quad (15)$$

Gl. (14) umgeformt:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega R_4 C_4 - \frac{1}{12} \omega R_s C_x \quad (14a)$$

bzw.

$$\operatorname{tg} \delta = (\operatorname{tg} \delta)' - \frac{1}{12} \omega R_s C_x \quad (14b)$$

mit dem fehlerbehafteten Messwert  $(\operatorname{tg} \delta)' = \omega R_4 C_4$ .

Der absolute Messfehler wird demnach um so grösser, je grösser die Kapazität des gemessenen Objektes und der Widerstand des Messbelages sind.

#### 3.2 Anschluss des Messbelages nach 2.3; Messbelag hat nur Ohmschen Widerstand (Fig. 8)

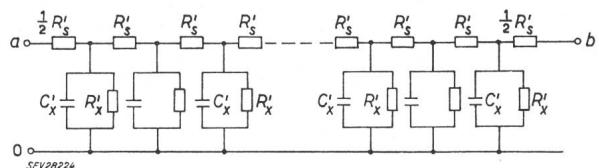


Fig. 8

Messbelag mit nur Ohmschem Widerstand, an einem Ende angeschlossen

a angeschlossenes, b freies Ende des widerstandsbehafteten Messbelages; 0 impedanzfreier Messbelag;  $R_s'$  Widerstand des Messbelages pro Längeneinheit;  $C_x'$ ,  $R_x'$  Kapazität und Ersatzwiderstand des Dielektrikums pro Längeneinheit

In entsprechender Weise wie unter 3.1 erhält man als Bedingungen für den Brückenabgleich

$$\operatorname{Re}(Z) = R_x \operatorname{tg}^2 \delta + \frac{1}{3} R_s = \frac{C_4}{C_0} R_3$$

$$\operatorname{Im}(Z) = -R_x \operatorname{tg} \delta = -\frac{R_3}{\omega C_0 R_4}$$

Daraus folgt, analog zu Gl. (14a)

$$\operatorname{tg} \delta = \omega R_4 C_4 - \frac{1}{3} \omega R_s C_x \quad (16)$$

### 3.3 Anschluss des Messbelages nach 2.2; Messbelag hat verteilten Ohmschen Widerstand und verteilte Induktivität (Fig. 9)

Hier ist  $Z_s = R_s + j \omega L_s$  die gesamte Längsimpedanz des Messbelages (aus Messung oder Berechnung bekannt) und  $Z_p = \frac{1}{1/R_x + j \omega C_x}$  die Impedanz des Dielektrikums.

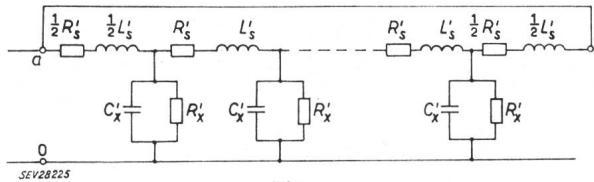


Fig. 9

Messbelag mit Ohmschem Widerstand und Induktivität, an beiden Enden angeschlossen  
Ersatzschema

a, b zusammengeschlossene Enden des impedanzbehafteten Messbelages; 0 impedanzfreier Messbelag;  $R_s'$ ,  $L_s'$  Widerstand und Induktivität des Messbelages pro Längeneinheit;  $C_x'$ ,  $R_x'$  Kapazität und Ersatzwiderstand des Dielektrikums pro Längeneinheit

Nach Gl. (9b) ist die Impedanz zwischen a, b und 0:

$$Z = Z_p + \frac{1}{12} Z_s = \frac{1}{\frac{1}{R_x} + j \omega C_x} + \frac{1}{12} (R_s + j \omega L_s);$$

Mit

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C_x R_x}$$

wird

$$Z = R_x \operatorname{tg}^2 \delta + \frac{1}{12} R_s - j \left( \operatorname{tg} \delta \cdot R_x - \frac{1}{12} \omega L_s \right)$$

Die Bedingungen für den Brückenabgleich sind nach Gl. (3a) und Gl. (3b):

$$\operatorname{Re}(Z) = R_x \operatorname{tg}^2 \delta + \frac{1}{12} R_s = \frac{C_4}{C_0} R_3$$

$$\operatorname{Im}(Z) = -R_x \operatorname{tg} \delta + \frac{1}{12} \omega L_s = -\frac{R_3}{\omega C_0 R_4}$$

Daraus ergibt sich:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\frac{C_4}{C_0} R_3 - \frac{1}{12} R_s}{\frac{R_3}{\omega C_0 R_4} + \frac{1}{12} \omega L_s} \quad (17)$$

$$C_x = \frac{12 C_0 R_4}{12 R_3 + \omega^2 C_0 R_4 L_s} \quad (18)$$

Nach einigen Umformungen und mit den Abkürzungen

$$(\operatorname{tg} \delta)' = \omega R_4 C_4 \text{ und } C_x' = C_0 \frac{R_4}{R_3}$$

findet man den übersichtlichen Ausdruck:

$$\operatorname{tg} \delta = (\operatorname{tg} \delta)' \frac{C_x}{C_x'} - \frac{1}{12} \omega C_x R_s \quad (17a)$$

zur Berücksichtigung des Messfehlers.  $(\operatorname{tg} \delta)'$  und  $C_x'$  sind die fehlerbehafteten Werte für  $\operatorname{tg} \delta$  und  $C_x$ , wie man sie bei Verwendung der normal gelgenden Abgleichbedingungen erhält.

Besonders befriedigend ist, dass die Induktivität des Messbelages, welche der Messung nur schwer zugänglich ist, in der Gl. (17a) nicht explizite vorkommt, sondern in der Größe  $C_x'$  enthalten ist. Die wahre Kapazität  $C_x$  muss jedoch aus anderer Messung oder Berechnung bekannt sein.

#### 3.3.1 Praktische Anwendung von Gl. (17a)

Der Verlustfaktor der Säulenisolation eines fertigen 300-kV-Stützerspannungswandlers von Brown Boveri soll gemessen werden. Fig. 10 a zeigt den prinzipiellen Aufbau dieses Wandlers. Zum Zwecke der Messung wurden die Unterspan-

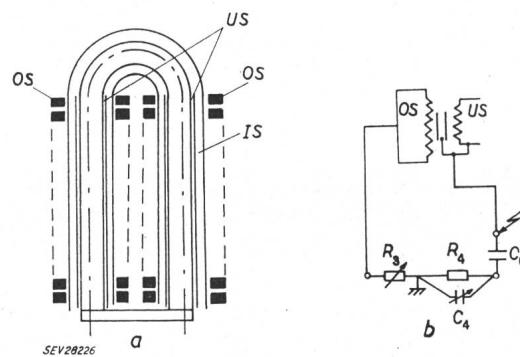


Fig. 10  
Prinzipieller Aufbau (a) eines 300-kV-Spannungswandlers von BBC und Schaltungsprinzip (b) zur Verlustfaktormessung der Säulenisolierung

OS Oberspannungswicklung; US Unterspannungswicklung; IS Säulenisolierung;  $C_0$  Vergleichskondensator;  $R_3$ ,  $R_4$  Abgleichswiderstände;  $C_4$  Abgleichskondensator

nungswicklung und der Eisenkern an Hochspannung gelegt und (als einzige Möglichkeit ohne Demontage) die Oberspannungswicklung als Messbelag verwendet (Fig. 10b). Die Messung bei 20°C ergab folgende Werte:

$$(\operatorname{tg} \delta)'_{20^\circ} = 2 \pi f \cdot R_4 C_4 = 0,0101 \rightarrow 1,01\%$$

$$C_x' = C_0 \frac{R_4}{R_3} = 1180 \text{ pF}$$

Aus diesen Werten und mit dem bekannten Ohmschen Widerstand der Oberspannungswicklung ( $R_{s,20^\circ} = 41000 \Omega$ ) und der Kapazität OS-US ( $C_x = 780 \text{ pF}$ ) errechnet man mit Hilfe von Gl. (17a) den tatsächlichen Verlustfaktor der Isolation bei 20°C:

$$\operatorname{tg} \delta = (\operatorname{tg} \delta)' \cdot \frac{C_x}{C_x'} - \frac{1}{12} C_x R_s = 0,0101 \cdot \frac{740}{1180} - \frac{314}{12} \cdot 740 \cdot 10^{-12} \cdot 41 \cdot 10^3 = 0,0054$$

$$\operatorname{tg} \delta = 0,54\%$$

Zur Kontrolle wurde bei diesem Wandler die Oberspannungswicklung abgenommen und an ihrer

Stelle ein gut leitender Belag aufgebracht. Die Messung ergab hier  $\operatorname{tg} \delta = 0,50\%$ .

Bei  $84^\circ\text{C}$  wurden folgende Werte gemessen:

$$(\operatorname{tg} \delta)' = 1,66\%, C_x' = 1080 \text{ pF}, R_s = 52000 \Omega.$$

Daraus folgt der korrigierte Wert des Verlustfaktors:

$$\operatorname{tg} \delta = 0,0166 \cdot \frac{740}{1080} - \frac{314}{12} \cdot 740 \cdot 10^{-12} \cdot 52 \cdot 10^3 = \\ = 0,0098 \rightarrow 0,98\%$$

Die Messung mit direkt aufgebrachtem Messbelag ergab hier  $\operatorname{tg} \delta = 0,94\%$ .

Die Übereinstimmung zwischen Rechnung und direkter Messung ist gut.

#### 4. Schlussfolgerung

Der bei den Verlustfaktormessungen an einer Isolation verwendete Messbelag muss sorgfältig aufgetragen sein und soll einen möglichst kleinen Widerstand haben, sonst ist die Messung fehlerbehaftet. Ist man jedoch bei gewissen Anordnungen gezwungen, als Messbelag eine Wicklung oder einen halbleitenden Belag usw. zu verwenden, so sind die oben abgeleiteten Korrekturen in Betracht zu ziehen.

#### Literatur

- [1] Berger, K.: Der Durchschlag fester Isolierstoffe als Folge ihrer Erwärmung. Bull. SEV Bd. 17(1926), Nr. 2, S. 37...57.
- [2] Beldi, F.: Eine Hochspannungsbrücke für Verlustmessungen an Isolierstoffen. Bull. SEV Bd. 21(1930), Nr. 6, S. 197...208.

#### Adresse des Autors:

F. Deutsch, dipl. Ingenieur, Lindenhof 8, Wettingen (AG).

## Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

### Tagung über «Strasse — Licht — Verkehrssicherheit» in Bad Homburg

061.3(43-2.456) : 628.971.6

In der Deutschen Bundesrepublik veranstalteten die Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen und die Lichttechnische Gesellschaft unter Mitwirkung einiger anderer interessanter Organisationen am 4. und 5. November 1959 in Bad Homburg eine Tagung über «Strasse — Licht — Verkehrssicherheit». Etwa 650 Teilnehmer — worunter 8 aus der Schweiz — aus allen am Straßenverkehr beteiligten Kreisen folgten den verschiedenen Vorträgen, an die sich eine lebhafte und vorwiegend positive Diskussion anschloss.

Das Thema war, zur Gewinnung einer guten Übersicht, in 3 Gruppen eingeteilt, wobei aber Überschneidungen nicht vermieden werden konnten.

Gruppe 1 umfasste den Zweck der Straßenbeleuchtung mit folgenden Beiträgen, wobei bei einigen mit kurzen Bemerkungen auf den Hauptinhalt hingewiesen wird:

— Verkehrsgefahren in den Dunkelstunden.

Gefahrenquellen sind entgegenkommende Fahrzeuge mit blendenden Lichtern, ungenügende ortsfeste Beleuchtungsanlagen, niveaugleiche Kreuzungen, Bahnübergänge, Auto-bahnzufahrten usw.

— Verkehrsunfälle bei Nacht.

Der bekannte Gerichts-Sachverständige, Dr. Ing. Lossagk, Ratingen, führte aus seiner reichen Gerichtspraxis eine Menge von Unfällen an, die sich bei einwandfreier Beleuchtung hätten verhüten lassen.

— Verkehrsunfälle bei Dunkelheit in der Statistik.

Etwa 27 % aller Verkehrsunfälle Deutschlands haben sich im Jahr 1954 bei Nacht ereignet, obwohl der Anteil des Verkehrs während dieser Zeit nur 10...15 % des Tagesverkehrs beträgt. Die Unfallhäufigkeit ist also relativ doppelt so hoch wie am Tag.

— Verkehr und Stadtstraßen.

Gruppe 2 behandelte die Gesichtspunkte beim Bau von Straßenbeleuchtungsanlagen und enthielt folgende Beiträge:

— Kritischer Vergleich ausgeführter Straßenbeleuchtungen.

Civil-Ing. I. Folcker, Stockholm, Präsident der Internationalen Beleuchtungs-Kommission, berichtete über eine von ihm entwickelte Methode zur Bewertung ausgeführter Anlagen und führte Lichtbilder von Straßen vor, wobei gleichzeitig die Wirkung von jeweils gleichen Anlagen bei trockener bzw. nasser Straßenoberfläche verglichen und bewertet werden konnte.

— Die Güte der Straßenbeleuchtung.

Der Referent, Ir. J. B. de Boer, Eindhoven, behandelte die Forderungen, die an eine Straßenbeleuchtung zu stellen sind, und hielt sich ungefähr an seine Darlegungen, die er an der Diskussionsversammlung über öffentliche Beleuchtung vom 17. März 1959 in Genf<sup>1)</sup> vorgetragen hatte.

— Richtlinien und Leitsätze für Straßenbeleuchtung in verschiedenen Ländern.

— Straßenbau und Straßenbeleuchtung.

— Brücken und Hochstraßen.

— Tunnel und Unterführungen.

In den letztgenannten Vorträgen wurden z. T. neue Beleuchtungslösungen von Anlagen erläutert, die teils schon fertig erstellt, teils im Bau oder erst geplant sind. Anlagen aus Hamburg, Düsseldorf, Mannheim, Stuttgart und Berlin wurden anhand instruktiver Bilder besprochen.

Gruppe 3 hatte die Wirtschaftlichkeit der Straßenbeleuchtung zum Gegenstand und enthielt den einen, aber sehr bemerkenswerten Vortrag über «Probleme der Verwaltungen bei dem Bau von Straßenbeleuchtungen» von dipl. Ing. W. Schreiber, Stadtbaudirektor, Duisburg.

Die Grundhaltung dieses Vortrages und das Ergebnis der Schlussdiskussion zeigten, wie in Deutschland die Erkenntnis sich immer mehr durchsetzt, dass die Beleuchtungsanlagen als untrennbarer Bestandteil der Straßen betrachtet werden und dass die vielerorts noch bestehende Gepflogenheit, die Beleuchtungseinrichtungen durch die Gemeinde-Elektrizitätswerke nach Fertigstellung der Straßen nachträglich erstellen und auch betreiben zu lassen, einer gründlichen Korrektur bedarf. Die Programmfpunkte des künftigen systematischen Vorgehens lauten:

Rechtzeitiges Planen aller Straßenbestandteile durch alle massgebenden Stellen, Aufstellung eines Kostenvoranschlages, der auch die Beleuchtung umfasst, gemeinsames Erstellen der vollständigen Anlage und Besteitung aller Bau- und Betriebskosten durch die zuständigen Verwaltungen.

Man erfuhr den interessanten Hinweis, dass in grösseren Gemeinden Deutschlands der Aufwand für Betrieb und Unterhalt der Straßenbeleuchtung z. Zt. bei DM 6...7/Einwohner liegt.

Die Vorträge und auch alle Diskussionsbeiträge sollen in der Fachliteratur publiziert werden und dann auch in einem Sonderdruck erhältlich sein.

J. Guanter

#### Herkunft des Begriffes «Elektrizität»

001.4(100) : 413.164

[Nach A. Warner: Der Begriff «Elektrizität» als Beispiel für die internationale Angleichung der inneren und äusseren Form. ETZ-A, Bd. 80(1959), Nr. 18, S. 635...636]

Als W. Gilbert in seinem im Jahre 1600 geschriebenen Werk «De Magnete» darüber berichtete, dass geriebene Körper, wie Bernstein, Glas, Schwefel und Siegellack Anziehungs Kräfte entwickeln, die nicht auf Magnetismus zurückzuführen sind, nannte er diese Kraft nach dem lateinischen Namen des Bernsteins (electrum) «elektrisch». Er ahnte nicht, dass er damit den Grundstein eines Namens gelegt hatte, welcher seitdem von vielen Sprachen übernommen wurde.

Eine Untersuchung von 40 Sprachen ergab nun, dass der Begriff «Elektrizität» nicht immer im «Bernstein» seinen Ursprung hat. So gibt es eine Sprachengruppe, welche den Be-

<sup>1)</sup> Bull. SEV Bd. 50(1959), Nr. 12, S. 553...561.