

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 21 (1930)
Heft: 6

Artikel: Eine Hochspannungsbrücke für Verlustmessungen an Isolierstoffen
Autor: Beldi, F.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058254>

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: 17.04.2026

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

In 2 Monaten wurden die gesamten Kabelarbeiten vom ersten Spatenstich bis zur Inbetriebnahme durchgeführt. In dieser Zeit wurden verlegt:

160 t 50 kV-Kabel,
600 t Kabelsteine,
12 t Messkabel,
40 t Zoreseisen.

Ein prozentualer Kostenvergleich der diversen Arbeiten ergibt folgende Zahlen:

50 kV-Kabel mit Zubehör	70 %
Kabelkanäle, Zoreseisen und Grabarbeiten	21,5 %
Montage und Bauleitung	8,5 %
Total	100 %

Eine Hochspannungsbrücke für Verlustmessungen an Isolierstoffen.

Von F. Beldi, Baden.

621.315.61.00.14:621.317.384

Es wird gezeigt, dass bei der Verwendung der Messbrücke nach Schering unter Umständen bedeutende Messfehler auftreten können, die durch ungleiche Erdkapazitäten der einzelnen Brückenarme bedingt sind. Der Verlustfaktor eines Dielektrikums kann dann zu klein, zu gross oder sogar «negativ» gemessen werden. Diese störenden Einflüsse können mittels Abgleichkapazitäten beseitigt werden. Weiterhin wird auf Messfehler, verursacht durch ungeschickte Aufstellung des Prüfobjektes, aufmerksam gemacht; auch da kann der Verlustfaktor eines Isolators zu klein, zu gross oder sogar «negativ» gemessen werden. An Hand einer Messung wird festgestellt, dass auf die Reinheit der Kurvenform geachtet werden muss.

Die Abgleichung der parasitären Kapazitäten durch Hilfskondensatoren ist sehr zeitraubend und es wurde deshalb eine Brückenordnung verwendet, die die Messfehler infolge der Störkapazitäten ausschliesst.

L'auteur montre que l'emploi du pont de Schering donne lieu dans certains cas à des erreurs de mesure importantes, dues à la capacité inégale des diverses branches du pont vis-à-vis de la terre. Il peut arriver alors qu'on mesure un facteur de perte du diélectrique trop petit, trop grand, ou même «négatif». Ces influences perturbatrices peuvent être éliminées au moyen de capacités d'équilibrage. L'auteur rend attentif ensuite aux erreurs de mesure causées par la position défectueuse de l'objet à examiner; ici également la mesure peut révéler un facteur de perte trop petit, trop grand ou même «négatif». Il montre par une mesure qu'il est indispensable de veiller à la pureté de la forme de l'onde.

L'élimination des capacités parasites au moyen de condensateurs auxiliaires exige beaucoup de temps; c'est pourquoi l'auteur a utilisé un dispositif de pont qui exclut toute erreur de mesure due aux capacités perturbatrices.

1. Zweck der Arbeit.

Das Wesen des elektrischen Durchschlags fester Isolierstoffe ist heute noch nicht völlig geklärt. Je nach den Versuchsbedingungen, wie Temperatur des Isoliermittels, Art, Steilheit und Zeitdauer der angelegten Spannung usw. bestehen für den elektrischen Durchschlag mehrere Theorien nebeneinander. Für die Praxis ist die sogenannte Wärmetheorie bei festen Isolierstoffen wohl von grösster Bedeutung.

Im Jahre 1922 wies Wagner darauf hin, dass der Durchschlag bei Spannungsbeanspruchung über längere Zeiten mit den dielektrischen Verlusten zusammenhängt. Diese Verluste wachsen stark mit der Temperatur an; letztere ist wiederum abhängig von den Verlusten und der Abkühlungsmöglichkeit des Dielektrikums. Ueberschreiten die Verluste ein gewisses Mass, so kann durch gegenseitiges Hochtreiben von Verlust und Temperatur der Isolator thermisch stellenweise zerstört werden. Die Folge davon ist ein Durchschlag.

Der Messung der dielektrischen Verluste kommt infolgedessen eine grosse Bedeutung zu. Für die Forschung ist sie ein willkommenes Hilfsmittel; für den Fabrikationsgang bedeutet sie eine geeignete Kontrolle der Güte des Isolators. Für den Betriebsmann ist die regelmässige Kontrolle des Isolationszustandes durch

Verlustmessungen ein gegebenes Mittel, Durchschläge rechtzeitig zu verhüten, da bekanntlich die Lebensdauer stark beanspruchter Isolation eine zwar hohe, aber keineswegs unbegrenzte ist.

Hauptsächlich aber ist dem Erbauer von Hochspannungsmaschinen und -Apparaten durch die Verlustmessungen ein wertvolles Mittel gegeben, seine Materialien richtig auszuwählen und den Einfluss der Rohstoffe und ihrer Verarbeitung auf die Grösse der Verluste des Fertigfabrikates festzustellen.

In welcher Weise man durch Verbesserung eines der wichtigsten Isoliermaterialien, des Hartpapiers, in den letzten Jahren fortgeschritten ist, lässt sich z. B. aus den in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellten Resultaten von Messungen an Hartpapier-Durchführungsisolatoren ersehen. Der Deutlichkeit halber sind alle Werte der Verluste auf den Ende 1924 gemessenen Verlust bezogen, dieser also mit 1 eingesetzt.

Verbesserung der Hartpapier-Durchführungen durch Materialuntersuchung.
Unterteil der Klemme in Oel von 90° C.

Tabelle I.

Fabrikationsjahr	1924	1925	1926	1927	1928
Verluste bei Nennspannung — Relativwerte	1,0	0,77	0,48	0,13	0,09

In der Isoliertechnik hat sich der Verlustfaktor $tg\delta$, der das Verhältnis des Verluststromes zum Verschiebungsstrom darstellt, als charakteristische Grösse für die Güte eines Isolierstoffes eingebürgert. Zur Beurteilung eines Isolators ist es also nötig, bei der Messung des $tg\delta$ alle äusseren Einflüsse, wie Kriechströme, Ladeströme als Folge elektrostatischer Felder fernzuhalten. Zweckmässig angebrachte Schirmungen lassen dieses Ziel erreichen, können aber unter Umständen zu weiteren Fehlern Anlass geben, die besonders bei gutem Isoliermaterial deutlich hervortreten.

In letzter Zeit wurde in der Literatur¹⁾ auf Fehlmessungen bei der Bestimmung des Verlustfaktors mittels der bekannten Scheringbrücke hingewiesen, ohne dass eine restlose Erklärung des Fehlers gegeben werden konnte. Da in der Forschungsabteilung für Hochspannung bei der A.-G. Brown, Boveri & Cie. mit der bereits im Jahre 1919 entwickelten Apparatur²⁾ zur Messung der dielektrischen Verluste seinerzeit ähnliche Unstimmigkeiten beobachtet wurden, sollen hier einige typische Fälle von Messfehlern erklärt und die Einrichtung zur Beseitigung derselben beschrieben werden.

2. Messungen an Isolatoren und Erklärung der Ergebnisse.

In den ersten Jahren der Materialuntersuchung wurde ausschliesslich ein Hochspannungs-Wattmeter²⁾ für kleine Verlustfaktoren zur Messung der dielektrischen Verluste verwendet. Mit der stetigen Verbesserung der Isolierstoffe gelang es, die Verluste immer weiter herabzusetzen, wodurch die Ausschläge am Messinstrument schliesslich so klein wurden, dass die Ablesungenauigkeit zu grossen Messfehlern führte. Weiterhin zeigten sich bei den kleinen Verlusten Messfehler, die mit den soeben genannten nicht zusammenhängen. Anstelle des Hochspannungswattmeters trat für genaue Untersuchungen und für kleine Verlustfaktoren die Brückenmethode nach Schering³⁾, deren Schema in Fig. 1 gegeben ist. Nach kurzer Zeit wurde jedoch diese Brücke etwas umgeändert, indem statt des Glimmerkondensators C_4 , der in der Anschaffung verhältnismässig teuer ist, ein Variometer L_3 in Serie mit dem Widerstand R_3 zur Anwendung gelangte (Fig. 2). Die Beeinflussung der Induktivität durch magnetische Fremdfelder wurde untersucht und diese Fehlerquelle mittels einer einfachen Abschirmung behoben, so dass ein genaues Arbeiten auch in Prüffeldern möglich ist.

¹⁾ Schaudinn: Elektrizitätswirtschaft 1929, No. 483. — Rosenlöcher & Rühlemann: A. f. E., 1929, XXII, No. 1.

²⁾ Roth: Hochspannungstechnik, Jul. Springer 1927. — Rump: BBC-Mittlg. 1923, H. 81.

³⁾ Schering: Zeitschr. f. Instrumentenkunde 1920, S. 124.

Mit der weitem Verbesserung der Isoliermaterialien, besonders der Fabrikate aus Hartpapier, zeigte sich alsbald dass auch die Messbrücke mit der Induktivität L_3 , sowie die Scheringbrücke, den an sie gestellten Anforderungen bei Messungen im Prüffeld nicht mehr genügen konnten. Es traten Messfehler auf, die vordem nicht

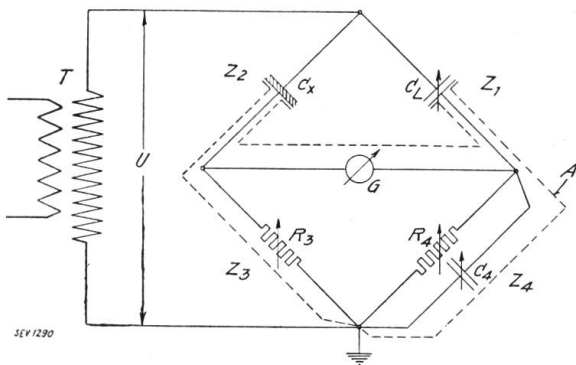


Fig. 1.
Scheringbrücke.

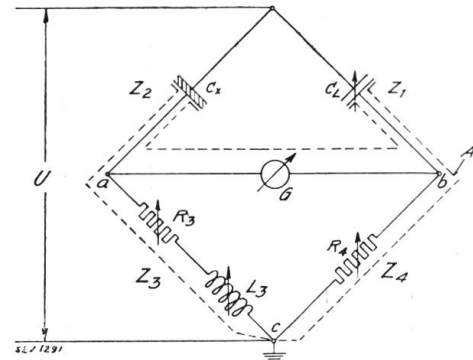


Fig. 2.
Abgeänderte Brücke.
 L_3 Induktivität (Variometer).

- T Prüftransformator
- U Messspannung
- C_L Luftkondensator (variabel und verlustlos)
- C_x Prüfobjekt
- G Vibrationsgalvanometer
- R_3, R_4 Präzisionswiderstände
- C_4 Glimmerkondensator
- Z Impedanzen der Brückenarme
- A Abschirmung

bemerkt wurden. Wie bei dem Hochspannungswattmeter, das bei sehr gutem Material in bestimmten Fällen negative Ausschläge ergab, wurde auch hier bei sehr guten Isolierstoffen negative $tg \delta$ gemessen. Bei der abgeänderten Brücke war es notwendig, die Induktivität L_3 in den Zweig Z_4 , bei der Brücke nach Schering dagegen war man gezwungen, den Kondensator C_4 in den Kreis Z_3 zu verlegen, um ein Brückengleichgewicht herstellen zu können. Trotz Abschirmungen gegen elektrostatische und elektromagnetische Felder und trotz einwandfreier Führung der Zuleitungen zu den entstehenden Brückenpunkten konnten diese Fehler nicht behoben werden. Es ist vielleicht nicht unwesentlich, zu bemerken, dass diese Messungen im Laboratorium wie im Prüffeld, wo meist längere abgeschirmte Leitungen (Größenordnung 10 bis 20 m) zur Brücke verlegt werden müssen, durchgeführt wurden. Eine kapazitätsarme Leitungsführung z. B. nach Giebe⁴⁾ ist hier praktisch unmöglich. Durch Versuche mit einwandfreier, sinusförmiger Spannung konnten die beobachteten Fehler nicht beseitigt werden. Trotzdem wurde bei den nachfolgenden Untersuchungen immer auf Sinusform der Spannung Wert gelegt. Im Laufe der weiteren Untersuchungen zur Aufdeckung dieser Messfehler ergab sich, dass der gemessene Verlustfaktor eines Prüfobjektes bei gleicher Spannung an der Brücke verschieden gross ausfiel, je nachdem die Grösse der Brückenwiderstände eingestellt war. Bestimmt man den Verlustfaktor bei gleicher Messspannung für verschiedene Werte von R_3 , so ergeben sich die Kurven nach Fig. 3. Mit zunehmendem Widerstand R_3 sinkt $tg \delta$ bei gleicher Spannung am Prüfobjekt. Bei praktischen Messungen wird der Widerstand R_3 möglichst klein gehalten. Die hohen Werte von R_3 sind hier lediglich zur klaren Verfolgung der Vorgänge eingestellt worden. Wurde die Grösse der Kapazität C_L des variablen Luftkondensators bei konstanter Spannung und konstantem Widerstand R_4 verändert, so wurde eine Abhängigkeit des gemessenen Verlustfaktors von der C_L nach Fig. 4 festgestellt. Die Veränderung des Verlustfaktors mit variablem Widerstand R_3 und variabler Kapazität C_L wurde an dem Versuchsrohr nach Fig. 5 wie auch an der Kondensatordurchführung nach Fig. 7 festgestellt.

⁴⁾ Giebe: Ann. d. Physik 1907, S. 941.

Auch die ungleichen Kapazitäten der einzelnen Brückenarme gegen Erde können eine wichtige Ursache für die Messfehler bilden. Bekanntlich werden zur Vermeidung von Messfehlern bei der Isoliermaterialuntersuchung Abschirmungen am Prüfobjekt selbst angebracht, und zwar:

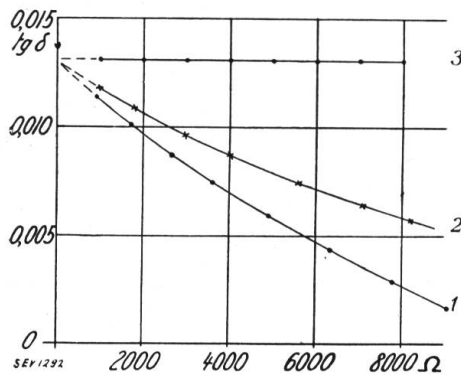


Fig. 3.

Verlustfaktor in Abhängigkeit vom Widerstand R_3 bei konstanter Spannung U .

- 1 Messung mit abgeänderter Brücke, Fig. 2.
- 2 Messung mit Scheringbrücke, Fig. 1.
- 3 Messung mit Hochspannungsbrücke Fig. 14.

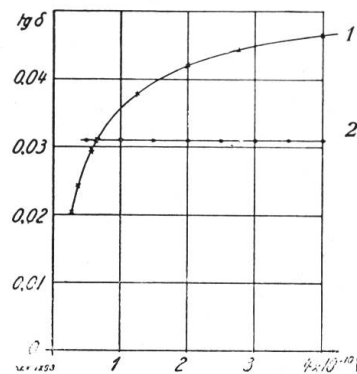


Fig. 4.

Verlustfaktor in Abhängigkeit von der Kapazität C_L bei konstanter Spannung U .

- 1 Messung mit abgeänderter Brücke (Fig. 2).
- 2 Messung mit Hochspannungsbrücke (Fig. 14).

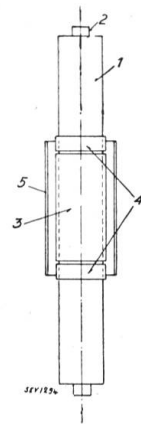


Fig. 5.

Abschirmung des Isolierrohres für Verlustmessung.

- 1 Isolierrohr mit Durchführungsbolzen (2).
- 3 Messbelag.
- 4 und 5 Abschirmung.

1. Die Abschirmung 4 (vergl. Fig. 5) zur Vermeidung von Kriechströmen vom spannungsführenden Pol 2 zum Messbelag 3, der Oberfläche des Isolators entlang. Der Messbelag ist zum Brückenpunkt a geführt.
2. Die Abschirmung 4 zur Vermeidung von Randeffecten. Der zu untersuchende Isolierstoff soll möglichst im homogenen Feld gemessen werden, da verzerrte Felder der Rechnung und Auswertung der Messergebnisse meist unzugänglich sind.
3. Die Abschirmung 5 zur Vermeidung von statischen Ladungen auf den Messbelag 3, herrührend vom äusseren Feld des Isolators und der Spannungszuführung.

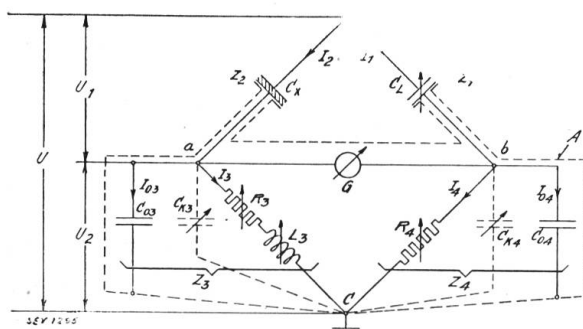


Fig. 6.

Abgeänderte Brücke mit Erdkapazitäten.

- C_{03} C_{04} Erdkapazitäten
- C_{K3} C_{K4} Abgleichkapazitäten.

Da sämtliche Abschirmungen direkt geerdet sind, ist dadurch eine Störungsquelle je nach Grösse der Kapazitäten der Schutzbeläge gegen Messbelag vorhanden. Ihre Einflüsse auf die Messung können dadurch beobachtet werden, dass die Abschirmung 5 räumlich verschieden angeordnet, d. h. ihr Durchmesser resp. Abstand vom Messbelag 3 verändert wird. Bei gleicher Spannung am Prüfobjekt konnten verschiedene $tg \delta$ gemessen werden, die offensichtlich nicht einer etwaigen äusseren Feldänderung durch die vorgenommene Veränderung der Abschirmung 5 zugeschrieben werden dürfen. Der Einfluss des äusseren Feldes wurde vollkommen ausgeschaltet, dennoch wurde eine Beeinflussung von $tg \delta$ festgestellt.

Die Kapazität C_{03} (Fig. 6) des Messbelages 3 gegen die Abschirmung 5 wurde nun durch kleine Kondensatoren C_{K3} vergrössert und weitere Kurven aufgenommen; dabei ergab sich bei einer ganz bestimmten Grösse dieser Kapazität, dass bei gleicher Spannung am Prüfobjekt der Verlustfaktor praktisch unabhängig von R_3 ist. Bei

Die Kapazität C_{03} (Fig. 6) des Messbelages 3 gegen die Abschirmung 5 wurde nun durch kleine Kondensatoren C_{K3} vergrössert und weitere Kurven aufgenommen; dabei ergab sich bei einer ganz bestimmten Grösse dieser Kapazität, dass bei gleicher Spannung am Prüfobjekt der Verlustfaktor praktisch unabhängig von R_3 ist. Bei

weiterer Vergrößerung der genannten Kapazität stieg der Verlustfaktor mit zunehmendem R_3 an. Das prinzipielle Schema der Brücke kann somit auf Grund dieser Beobachtungen entsprechend der Fig. 6 dargestellt werden.

Bei entfernter Abschirmung 5 (Fig. 5) und abgeglichenen Erdkapazitäten (mittels C_{K3}) wurde fast derselbe Verlustfaktor $tg \delta$ gemessen wie mit Abschirmung und abgestimmter Brücke. Der Einfluss des äussern Feldes bei der Messung ist also gering im Vergleich zu den Messfeldern, die durch die Abschirmung als Kapazität gegen Messbelag 3 entstehen.

Vollkommen anders verhält sich dagegen die Abschirmung 4. Ohne diese Abschirmung wurde bei abgeglichener Erdkapazität ein wesentlich grösserer Verlustfaktor gemessen als mit Abschirmung. Wurde die Abschirmung 4 gegen die Oberfläche des Isolators durch eine dünne Luftschicht isoliert, also so angebracht, dass Kriechströme zum Messbelag gelangen konnten, so ergab sich praktisch derselbe Verlustfaktor wie mit aufgelegter Abschirmung, d. h. die Kriechströme sind von untergeordneter Bedeutung. Der grössere Einfluss rührt von dem Randeffekt her.

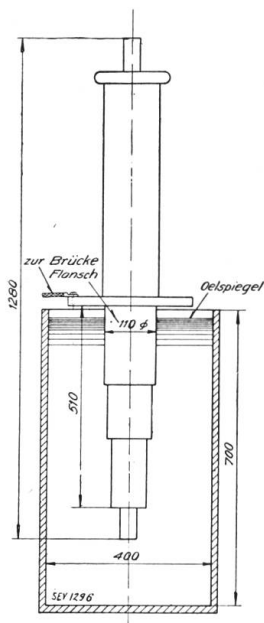


Fig. 7.

Anordnung der 87 kV-Kondensatordurchführung für die Messung.

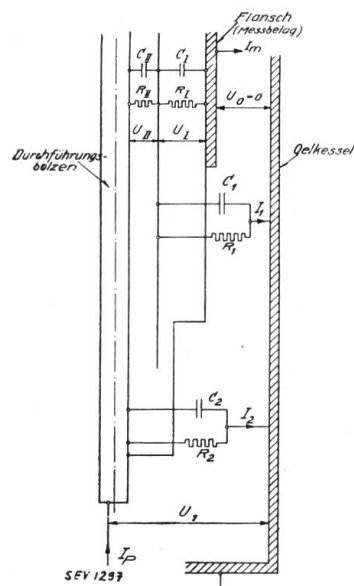


Fig. 8.

Schema der Ersatzkapazitäten der Kondensatordurchführung im Oelkessel.

- C_1 C_2 Teilkapazitäten der Durchführung
- C_1 C_2 Kapazitäten der Durchführung gegen den Kessel
- R_1 R_{11} Verlustwiderstand der Kondensatorschichten d. Isolators
- R_1 R_2 Verlustwiderstand des Oeles
- U_1 Messspannung
- I_P Strom des Isolators
- I_m Messtrom

Beim Fehlen des Schirmes ist das elektrische Feld am Ende des Messbelages inhomogen, wodurch zusätzliche Verluste infolge grösserer örtlicher Beanspruchung auftreten. Selbstverständlich bewirkt die Abschirmung 4 am Ende des Messbelages bei nicht abgeglichenen Erdkapazitäten C_{03} und C_{04} ebenfalls einen Fehler infolge ihrer Kapazität gegen den Messbelag.

Es dürfte allgemein bekannt sein, dass ungeschickte Aufstellung des Prüfobjektes ebenfalls zu Messfehlern Anlass gibt. Wir wollen hier einen typischen Fall betrachten, der bei Messungen an betriebsmässig aufgestellten Isolatoren auftreten kann. Um diese nachzubilden, wurde eine Kondensatordurchführung für 87 kV Nennspannung (Fig. 7) in einen engen, mit Oel gefüllten Eisenkessel getaucht und die Verlustmessung mit zwei verschiedenen Oelsorten durchgeführt. Das mit „I“ bezeichnete Oel ist reines Mineralöl, wie es für Transformatoren zur Anwendung gelangt. Das Mineralöl „II“ war stark verschmutzt und ausserdem während ca. zwei Jahren bei 90°C geheizt worden.

Daten der Oele „I“ und „II“.

Tabelle II.

Oel	Durchschlags- spannung ¹⁾ kV bei 90°	Verlustfaktor $tg \delta$ bei 90°	Scheinbare Dielekt. Konst. ϵ bei 90°	Säurezahl	Wassergehalt	Schlammgehalt %
I	90	0,047	2,30	0,04	vollk. trocken	0
II	70	0,30	2,13	0,63	Spuren	0,95

¹⁾ Zwischen Kugeln von 12,5 mm \varnothing bei 5 mm Abstand.

Der Verlustfaktor der Anordnung wurde nun in der Weise bestimmt, dass die Durchführung einmal ohne jede Abschirmung gemessen wurde. Um auch den Einfluss äusserer Störungen bei der Messung zu berücksichtigen, wurde alsdann die Durchführung auch mit einer Abschirmung 4 (Fig. 5) gegen Kriechströme versehen. Der Flansch, der als Messbelag (3) galt, war vollkommen mit der Abschirmung 5 eingedeckt. Die in Tabelle III aufgeführten Messresultate beziehen sich auf eine Messspannung von 60 kV bei 90° warmem Oel.

Tabelle III.

Durchführung	Strom mA	Verlustfaktor $tg \delta$	Bemerkungen
Oel I	3,10	0,039	Klemme nicht abgeschirmt
Oel II	3,05	0,029	
Oel I	3,13	0,0385	Klemme abgeschirmt

Eine Wiederholung der ersten Messung ergab, dass keine Veränderung an der Durchführung durch die Messung in den verschiedenen Oelen aufgetreten war. Wie die Messergebnisse zeigen, besteht praktisch kein Unterschied zwischen geschirmter und ungeschirmter Durchführung, d. h. die grosse Veränderung des Verlustfaktors bei dem verschiedenen Oel ist nicht einer Einwirkung von Lade- oder Leitungsströmen auf den Flansch als Messbelag zurückzuführen. Eine Erklärungsmöglichkeit dieser Messungen wäre gegeben durch die verschiedene Brechung der elektrischen Kraftlinien an der Isolatoroberfläche und dadurch einer veränderten Beanspruchung im Innern des Isolators. Der kleine Unterschied der Dielektrizitätskonstante der verschiedenen Oele lässt dies jedoch als unwahrscheinlich deuten, vielmehr ist der Unterschied den verschiedenen grossen Verlusten der Oele zuzuschreiben. Es treten von der Klemme Ströme durch das Oel auf den Kessel über, die eine Verschiebung des Messtromes I_m zur Messspannung U_i bewirken. Eine Messung, bei welcher der Strom vom isoliert aufgestellten Kübel, sowie vom Flansch zur Brücke geführt wurde, ergab bei geerdeter Abschirmung 2,45 mA bei einem Verlustfaktor von 0,052. Fig. 8 gibt das

Schema der Durchführung unter Berücksichtigung der genannten Störströme; übersichtshalber ist nur eine Kondensatoreinlage eingezeichnet.

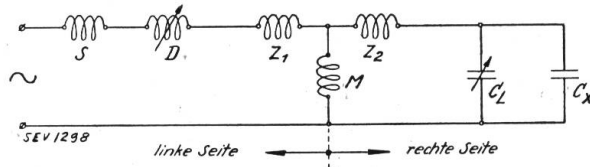


Fig. 9.

Resonanzschaltung für Verlustmessung.

- S Streuung der Stromquelle
- D Drosselspule
- Z_1 Z_2 Transformatorstreuung
- M Leerlaufinduktivität des Transformators
- C_L Verlustloser Vergleichskondensator
- C_x Prüfobjekt.

Weitere Fehler können entstehen bei Messungen mit nicht sinusförmiger Spannung; auf Reinheit der Kurvenform muss deshalb geachtet werden. Besitzt die Speise-Spannung schwache Harmonische, so werden diese durch die kapazitive Last des Isolators um so mehr hervorgehoben, je näher die Eigenfrequenz des Kreises mit der Oberwellenfrequenz der speisenden Spannung zusammenfällt. Um die unerwünschten Harmonischen von dem Prüfobjekt fernzuhalten, wird zweckmässig eine Resonanzschaltung für die Messfrequenz verwendet, d. h. alle Eigenfrequenzen des Systems müssen tiefer liegen als die Messfrequenz. Dies geschieht mit der Schaltung nach Fig. 9. Der Kreis $S \rightarrow D \rightarrow Z_1 \rightarrow Z_2 \rightarrow (C_L + C_x)$ wird mit der Netzfrequenz unter folgenden Bedingungen in Spannungsresonanz gebracht:

Die rechte Seite der Fig. 9 muss sich kapazitiv verhalten; diese Kapazität muss mit der linken gesamten Streuinduktivität bei der Messfrequenz durch Aenderung der Induktivität D auf Spannungsresonanz kommen. Die Spannungs- und Stromkurve einer 110 kV-Kondensatordurchführung, die an einem 50 kVA-Transformator angeschlossen war, stellt Fig. 10, Kurve 1 und 2 dar; die Spannungskurve des speisenden Netzes ist ebenfalls in derselben Figur, Kurve 3, angegeben. Letztere ist sinusförmig, während die Spannungs- und Stromkurven des Isolators ohne Resonanzschaltung starke Oberwellen aufweisen. Besonders deutlich tritt die 5. Harmonische hervor, gemäss Tabelle IV, in der die Anteile der Harmonischen in Prozenten der Grundwelle eingetragen sind.

Tabelle IV.

Oberwelle	Netzspannung	Fig. 10		Fig. 11	
		Spannungs-Kurve des Isolators (ohne Resonanz)	Strom-Kurve	Spannungs-Kurve des Isolators (mit Resonanz)	Strom-Kurve
3. Harmonische . . .	0,08	6,7	21	2,1	6,6
5. Harmonische . . .	0,50	21	98	—	—
7. Harmonische . . .	0,40	2,6	19	—	—
9. Harmonische . . .	0,35	—	—	—	—

Die Genauigkeit der Analyse der Netzspannung für so kleine Werte von Harmonischen ist allerdings nicht gross; festzuhalten ist nur, dass alle Oberwellen der Netzspannung nicht mehr als 1% der Grundwelle betragen. Die Kurven nach Fig. 11 stellen die Strom- und Spannungskurve desselben Isolators bei der Messung mittels der Resonanzschaltung nach Fig. 9 dar; sie sind praktisch sinusförmig.

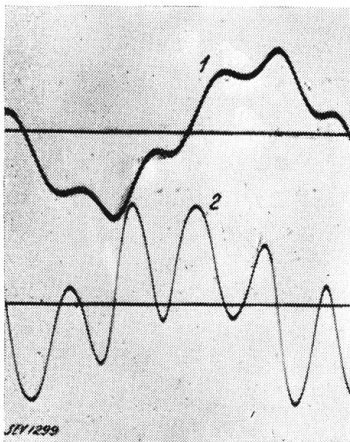


Fig. 10.

Messung an einem Isolator.
Spannungs- und Stromkurve ohne Resonanzschaltung aufgenommen.

- 1 Spannung am Isolator
- 2 Strom des Isolators
- 3 Netzspannung ohne Belastung

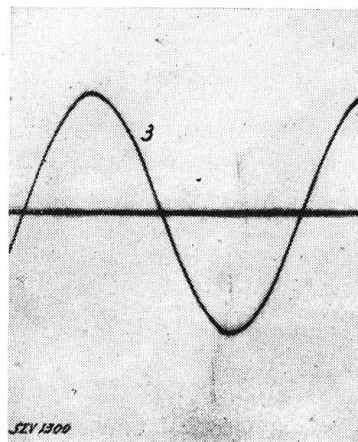


Fig. 11.

Messung an einem Isolator.
Spannungs- und Stromkurven mit Resonanzschaltung aufgenommen (Fig. 9).

- 1 Spannung am Isolator
- 2 Strom des Isolators

Da bei der Brückenmessung das Vibrationsgalvanometer auf die Messfrequenz abgestimmt wird, erfasst jene die Leistung der Oberwellenfrequenz nicht, wie die nachfolgenden Messergebnisse zeigen:

Der mit der weiter unten beschriebenen Anordnung gemessene Verlustfaktor einer 110 kV-Kondensatordurchführung bei 90^o C betrug:

$$\operatorname{tg} \delta = 0,045 \text{ bei Resonanzschaltung (Fig. 11) und}$$

$$\operatorname{tg} \delta = 0,039 \text{ bei einer Spannung nach Fig. 10, Kurve 1.}$$

3. Mathematische und graphische Behandlung der Aufgabe.

Im vorhergehenden Abschnitt wurde der Einfluss der parasitären Kapazität auf das Gleichgewicht der Brücken an Hand von Messresultaten erläutert. Diese Störkapazität wurde einfachheitshalber und wohl mit genügender Genauigkeit an den Brückenpunkten a und b konzentriert gedacht (Fig. 6) obwohl die Aufgabe, streng genommen, unter Berücksichtigung verteilter Kapazität, also mit nicht quasi-stationärer Stromverteilung behandelt werden müsste.

Wir wollen nun die Rechnung für die Brücke unter Berücksichtigung der Erdkapazitäten durchführen und die Bedingung aufstellen, für die mit Hilfe einer Abgleichkapazität C_{K3} (Fig. 6) der Verlustfaktor unabhängig von der Grösse des eingestellten Widerstandes R_3 bestimmt werden kann. Die Störkapazität kann mit genügender Genauigkeit als verlustlos betrachtet werden, da bei solchen Messungen wohl immer auf gute Isolation geachtet wird.

Der Verlustfaktor eines Isolators, gemessen mit der Brücke ohne Störkapazitäten (Fig. 2) errechnet sich zu $\operatorname{tg} \delta_0 = \frac{\omega L_3}{R_3}$, wobei $\delta_0 = 90^\circ - \varphi$ ist.

Der Index o des Winkels δ_0 soll andeuten, dass der Verlustwinkel mittels der Brücke ohne Erdkapazitäten bestimmt wurde.

Um nun den Einfluss der Erdkapazität auf das Messresultat bei der Brücke nach Fig. 6 erfassen zu können, wird vorerst der Fehlwinkel zwischen Isolatorstrom I_2 und Messtrom I_3 , bzw. zwischen Luftkondensatorenstrom I_1 und Messtrom I_4 bestimmt.

Es ist
$$\mathcal{Z}_4 = \frac{R_4 j \frac{1}{\omega C_{04}}}{R_4 + j \frac{1}{\omega C_{04}}}$$

Der Fehlwinkel a_4 wird also:

$$\operatorname{tg} a_4 = -R_4 \omega C_{04}.$$

Aus Fig. 6 ist ersichtlich, dass der Messtrom I_3 in Phase ist mit der Spannung über den Widerstand R_3 . Für die Bestimmung des Fehlwinkels zwischen dem Isolatorstrom I_2 und dem Messtrom I_3 benutzen wir also die fiktive Impedanz $Z'_3 = \frac{I_3 R_3}{I_2}$.

Es ist
$$\mathcal{Z}'_3 = \frac{-\frac{R_3}{\omega C_3} \left(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_{03}} \right) + j R_3^2 \frac{1}{\omega C_{03}}}{R_3^2 + \left(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_{03}} \right)^2}$$

$$\operatorname{tg} a'_3 = \frac{R_3}{\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_{03}}}.$$

Für $L_3 = 0$ wird $\operatorname{tg} a'_3 = -R_3 \omega C_{03} = \operatorname{tg} a_3$.

Mit Hilfe der Impedanz $Z_2 = \frac{Z_1 Z_3}{Z_4}$ bestimmen wir nun den Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta$ des Isolators.

Es ist
$$\mathcal{Z}_2 = \frac{R_3 + \omega L_3 \operatorname{tg} a_4 - j(\omega L_3 - R_3 \operatorname{tg} a_4)}{R_4 \omega C_L [\operatorname{tg} a_3 - j(1 - \omega^2 L_3 C_{03})]},$$

also
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{(R_3 + \omega L_3 \operatorname{tg} a_4) \operatorname{tg} a_3 + (\omega L_3 - R_3 \operatorname{tg} a_4)(1 - \omega^2 L_3 C_{03})}{(\omega L_3 - R_3 \operatorname{tg} a_4) \operatorname{tg} a_3 - (R_3 + \omega L_3 \operatorname{tg} a_4)(1 - \omega^2 L_3 C_{03})}.$$

Bei der Brücke ohne Erdkapazität ist $\frac{\omega L_3}{R_3} = \text{tg } \delta_0$,

damit wird
$$\text{tg } \delta = \frac{\text{tg } \delta_0 + \frac{\text{tg } a_4 - \text{tg } a'_3}{1 + \text{tg } a_4 \text{tg } a'_3}}{1 - \text{tg } \delta_0 \frac{\text{tg } a_4 - \text{tg } a'_3}{1 + \text{tg } a_4 \text{tg } a'_3}}$$

δ_0 ist hier der aus den Brückenablesungen R_3, L_3 bestimmte Verlustwinkel.

Der Verlustfaktor $\text{tg } \delta$ des Isolators wird mit Hilfe der Brückenablesung R_3, L_3 nur dann richtig gemessen, wenn der Fehlwinkel a_4 gleich dem Fehlwinkel a'_3 ist.

Es ist dann $\text{tg } \delta = \text{tg } \delta_0$.

Fig. 12 zeigt das Vektordiagramm der Brücke unter Berücksichtigung der Erdkapazitäten C_{03}, C_{04} . Der gemessene Verlustfaktor kann grösser oder kleiner als der wirkliche Verlustfaktor ausfallen, je nachdem a'_3 grösser oder kleiner als a_4 ist. Ist a_4 grösser als a'_3 und zugleich die Differenz dieser Fehlwinkel grösser als der wirkliche Verlustwinkel, so fällt der zu messende Verlustfaktor „negativ“ aus.

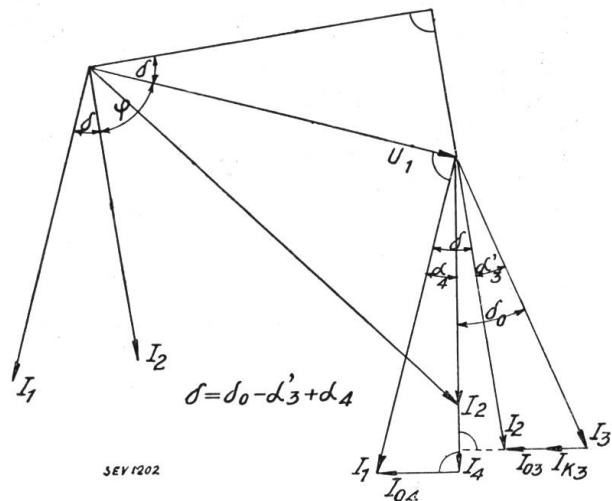


Fig. 12. Vektordiagramm zur abgeänderten Brücke unter Berücksichtigung der Erdkapazitäten.

Um den Einfluss der Widerstandsänderung von R_3 auf den gemessenen Verlustfaktor übersehen zu können, wird der Ausdruck

$$\frac{\text{tg } a_4 - \text{tg } a'_3}{1 + \text{tg } a_4 \text{tg } a'_3}$$

in der Gleichung für $\text{tg } a$ umgeformt.

Es ergibt sich: $\text{tg } \delta \approx \frac{\text{tg } \delta_0 + K'(R_3 - R_4)}{1 - \text{tg } \delta_0 (R_3 - R_4) K'}$, wobei $K' = \omega C_{03} = \omega C_{04}$ ist.

Weiterhin ist
$$\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{R_3 \sin a'_3}{R_4 \text{tg } a_3} \approx \frac{R_3}{R_4}$$

Die Gleichung für $\text{tg } \delta$ lautet daher:

$$\text{tg } \delta \approx \frac{\text{tg } \delta_0 + R_3 \left(1 - \frac{Z_1}{Z_2}\right) K'}{1 - \text{tg } \delta_0 R_3 \left(1 - \frac{Z_1}{Z_2}\right) K'}$$

wobei $Z_1 = \frac{1}{\omega C_L}$ und Z_2 die Impedanz des Prüfobjektes ist. Wird die Kapazität

C_L des Luftkondensators nicht verändert, so ist $K = K' \left(1 - \frac{Z_1}{Z_2}\right)$ konstant, also

$$\text{tg } \delta \approx \frac{\text{tg } \delta_0 + x}{1 - x \text{tg } \delta_0}, \text{ wobei } x = K R_3 \text{ ist.}$$

Werden also die Erdkapazitäten nicht abgeglichen und in der Ausrechnung unberücksichtigt gelassen – letzteres wird kaum immer möglich sein – so wird der Verlustfaktor falsch gemessen. Er ist dann einerseits stark abhängig von der Grösse der Differenz der einzelnen Fehlwinkel a'_3 und a_4 , andererseits von der Grösse der Widerstände R_3 resp. R_4 . Mit kleiner werdendem R_3 nähert sich der gemessene

Verlustfaktor immer mehr seinem wahren Wert. Der gemessene Verlustfaktor kann nach obiger Gleichung grösser oder kleiner ausfallen als der wirkliche Wert je nachdem Z_1 kleiner oder grösser als Z_2 ist.

Bei variabler Kapazität C_L des Luftkondensators und konstantem R_4 wird

$$\operatorname{tg} \delta \approx \frac{\operatorname{tg} \delta_0 + K_1 C_L - K_2}{1 - \operatorname{tg} \delta_0 (K_1 C_L - K_2)},$$

d. h. der Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta$ ist bei konstantem R_4 abhängig von der Grösse der Kondensatorkapazität C_L .

Die im vorigen Abschnitt angeführten Messergebnisse sind demnach durch die Rechnung bestätigt. Mit Hilfe der Abgleichkapazitäten C_{K3} resp. C_{K4} (Fig. 6) ist es möglich, den wahren Wert des Verlustfaktors zu bestimmen.

Wir wollen nun noch den Fall der angeführten Messung einer Klemme in gutem und schlechtem Oel näher betrachten. Um die Rechnung einfacher zu gestalten, führen wir sie für die Klemme mit nur einer Kondensatoreinlage durch. Im Prinzip ändert sich dadurch nichts gegenüber dem Fall mehrerer Einlagen. Ohne die Störströme I_1 und I_2 (Fig. 8), die von der Klemme direkt auf den Kübel übertreten, wird der Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta$ unter Annahme $C_i = C_{ii}$ und $R = R_{ii}$,

$$\operatorname{tg} \delta_a = - \frac{1}{R_i \omega C_i}.$$

Der Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta$, bei Anwesenheit der Störströme I_1 und I_2 , errechnet sich wie folgt:

Die fiktive Impedanz Z_m , gegeben durch die Spannung U_1 an der Klemme und durch den Messtrom I_m (Fig. 8), ist $Z_m = \frac{U_1}{I_m}$. Nehmen wir an, zwischen dem Flansch als Messbelag und dem Kübel bestehe keine Spannungsdifferenz, was mit der weiter unten beschriebenen Messanordnung möglich wird, so ist $I_m = I_1$ der Strom zwischen Kondensatoreinlage und Flansch. Ist $\operatorname{tg} \delta^* = - \frac{1}{R_i \omega C_i}$, so wird:

$$\begin{aligned} Z_m &= \frac{R_i}{1 + \operatorname{ctg}^2 \delta_a} \left[2(1 - j \operatorname{ctg} \delta_a) + \frac{R_i(1 - j \operatorname{ctg} \delta_a)}{R_i(1 + j \operatorname{ctg} \delta_a)} (1 + j \operatorname{ctg} \delta^*) \right] \\ \operatorname{tg} \delta_b &= \frac{2(1 + \operatorname{ctg}^2 \delta_a) + \frac{R_i}{R_i} [1 + \operatorname{ctg} \delta_a (2 \operatorname{ctg} \delta^* - \operatorname{ctg} \delta_a)]}{2 \operatorname{ctg} \delta_a (1 + \operatorname{ctg}^2 \delta_a) + \frac{R_i}{R_i} [\operatorname{ctg} \delta^* (\operatorname{ctg}^2 \delta_a - 1) + \operatorname{ctg} \delta_a]} \end{aligned}$$

Aus dieser Gleichung ist zu erkennen, dass der Verlustfaktor des Isoliermaterials nur dann richtig gemessen wird, wenn der Widerstand R_i unendlich gross wird; dann ist $\operatorname{tg} \delta_b = \operatorname{tg} \delta_a$. Um den Einfluss des Oeles auf den zu messenden Verlustfaktor feststellen zu können, führen wir folgende Rechnungen durch:

1. Es sei $\operatorname{tg} \delta^* = \operatorname{tg} \delta_a$.

$$\operatorname{tg} \delta_b = \frac{2(1 + \operatorname{ctg}^2 \delta_a) + \frac{R_i}{R_i} [1 + \operatorname{ctg}^2 \delta_a]}{2 \operatorname{ctg} \delta_a (1 + \operatorname{ctg}^2 \delta_a) + \frac{R_i}{R_i} [\operatorname{ctg} \delta_a (1 + \operatorname{ctg}^2 \delta_a)]} = \operatorname{tg} \delta_a.$$

Hat also das den Isolatorunterteil umgebende Dielektrikum denselben Verlustfaktor wie der Isolator, so wird der Verlustfaktor des Isolatormaterials gemessen.

2. Ist $\operatorname{tg} \delta^* \gg \operatorname{tg} \delta_a$ und $\operatorname{tg} \delta_a$ sehr klein, so ist

$$\operatorname{tg} \delta_b = \operatorname{tg} \delta_a \frac{2 C_i \operatorname{tg} \delta_a - C_i \operatorname{tg} \delta^*}{2 C_i \operatorname{tg} \delta_a + C_i}.$$

Je nach der Grösse von $C_1 \operatorname{tg} \delta^*$ gegenüber $2 C_1 \operatorname{tg} \delta_a$ wird der Verlustfaktor positiv oder negativ gemessen.

3. Ist $\operatorname{tg} \delta^* \ll \operatorname{tg} \delta_a$ und $\operatorname{tg} \delta_a$ sehr klein, so ist

$$\operatorname{tg} \delta_b = \frac{2 \left(1 + \frac{C_1}{C_1} \right)}{2 + \frac{C_1}{C_1}} \operatorname{tg} \delta_a.$$

Aus dieser Gleichung ist zu ersehen, dass der gemessene Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta_b$ grösser ausfällt als der $\operatorname{tg} \delta$ des Isoliermaterials, sobald der Verlustfaktor des umgebenden Dielektrikums kleiner ist als derjenige des Isoliermaterials. Ist die Kapazität C_1 sehr klein gegenüber C_1 , so wird, wenn der Verlustfaktor des Oels gegenüber dem Verlustfaktor des zu messenden Dielektrikums klein ist, praktisch genau der wahre $\operatorname{tg} \delta$ des Isolator-dielektrikums bestimmt.

Die Messergebnisse im vorhergehenden Abschnitt sind durch die obige Rechnung bestätigt.

Das Vektordiagramm zur Klemme mit Störströmen ist durch Fig. 13 gegeben. In diesem Diagramm sind die 3 Fälle eingezeichnet:

- a) Es sind keine Störströme vorhanden, gemessen wird $\operatorname{tg} \delta_a$ der Verlustfaktor des Isoliermaterials.
- b) Es sind Störströme vorhanden, der Verlustwinkel des Oels ist klein, es wird der Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta_b$ gemessen; er ist kleiner als $\operatorname{tg} \delta_a$.
- c) Die Störströme sind vorhanden, der Verlustwinkel des Oels ist noch grösser als in Fall b. Der gemessene Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta_c$ ist negativ.

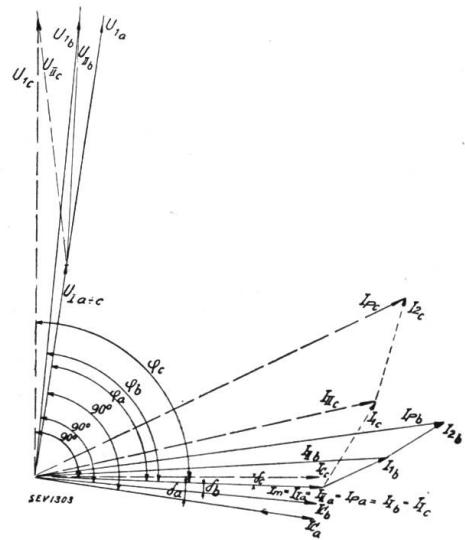


Fig. 13.
Ableitungs- und Verschiebungsstrom der Kondensatordurchführung im Oelkessel.
 I_c Luftkondensatorstrom.

4. Anordnung zur Beseitigung der genannten Fehler bei der Messung.

Im Vorhergehenden wurde dargelegt, dass die Erdkapazitäten der einzelnen Brückenweige, insofern sie nicht abgeglichen sind, bedeutende Messfehler verursachen. Die durch diese Erdkapazitäten C_{03} und C_{04} abfliessenden Ströme I_{03} und I_{04} (Fig. 6 und 12) sind Teilströme von I_1 resp. I_2 . In den Messzweigen Z_3 und Z_4 fliessen demnach nur die Differenzströme I_3 resp. I_4 . Mit Hilfe von Zusatzkapazitäten C_{K3} resp. C_{K4} , deren Grösse unbekannt sein kann, war es möglich, den Verlustfaktor genau zu bestimmen.

Diese Methode ist allerdings sehr zeitraubend und es lag der Gedanke nahe, anstelle dieser Abgleichung die Ursache der Messfehler selbst, nämlich die Ableitungsströme I_{03} resp. I_{04} zur Erde mit ihrer ungünstigen Phasenlage, zu eliminieren. Dies ist möglich, wenn die Brückenpunkte a und b Erdpotential annehmen. Um dies zu erreichen, könnte auf einfache Weise die Erdung an Punkt b , statt an Punkt c vorgenommen werden. Dadurch ist grundsätzlich nichts geändert worden; Punkt c nimmt nun dasjenige Potential gegen Erde an, das früher die Punkte a und b besaßen, so dass die Kapazitätsströme wieder auftreten können. Werden die Punkte a und b auf Erdpotential gebracht, ohne eine galvanische Verbindung zwischen diesen und Erde herzustellen, so können die Ströme I_{03} und I_{04} wohl auftreten, jedoch nicht mehr das Brückengleichgewicht stören, da sie keine Teilströme des Prüfobjekt- resp. Luftkondensatorstromes mehr sind.

Wirkungsweise. Dies lässt sich nun auf sehr einfache Art durch die Brücke der Fig. 14 herstellen, welche neben der normalen Messbrücke einen Hilfszweig Z_5 Z_6 besitzt, der ähnlich wie der Brückenweig Z_2 Z_3 ausgebildet ist und dessen Mittelpunkt direkt geerdet wird. An der normalen Messbrücke besteht keine Erdung mehr.

Eine ähnliche Schaltung hat Wagner⁵⁾ für Messungen mit hoher Frequenz bei kleiner Spannung angegeben, wo selbstverständlich die Störungen durch parasitäre Ströme in viel grösserem Mass vorhanden sind, als bei der Messung mit Niederfrequenz.

Die Leitungen zu den Punkten c und d besitzen eine gewisse Kapazität gegen Erde; es fließen deshalb entsprechend ihren Spannungen gegen Erde Kapazitätsströme ab. Da die Hauptbrücke an den Punkten a und b keine Spannung gegen Erde aufweist, können die parasitären Ströme die Hauptbrücke nicht mehr beeinflussen; sie bilden nur eine Belastung des Transformators.

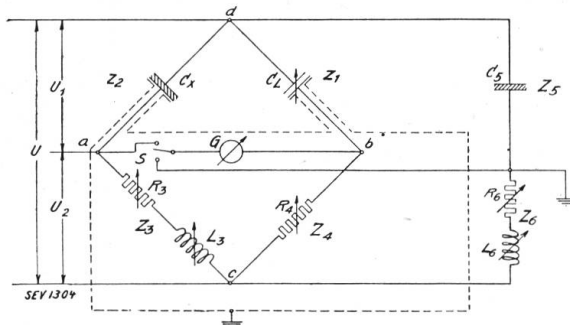


Fig. 14.

Neue Hochspannungsbrücke.

C_5 Hilfskapazität
 R_6 Widerstand
 L_6 Induktivität
 S Umschalter

Die Impedanzen Z_5 und Z_6 brauchen nicht bekannt zu sein; ebenfalls ist es nicht nötig, einen *verlustlosen* Kondensator C_5 zu benutzen. Praktisch wird man dafür ein zweites Prüfobjekt verwenden. Es kann selbstverständlich jede beliebige Kapazität, die der gewünschten Messspannung genügt, eingebaut werden. Der Widerstand R_6 darf Kapazität oder Induktivität besitzen.

Gang der Messung. Die Messung geschieht in folgender Weise: Vorerst wird die Messbrücke durch Veränderung der Impedanzen Z_3 und Z_4 abgeglichen, das Galvanometer also stromlos gemacht. Nun wird durch Umschalten des Galvanometers mittels des Schalters S der Hilfszweig Z_5 Z_6 mit dem Kondensatorzweig Z_1 Z_4 abgeglichen, d. h. durch Variieren von L_6 und R_6 wird Punkt b auf Erdpotential gebracht. Die normale Messbrücke wird nun, ohne Aenderung der Brückenweige Z_1 Z_4 mit Hilfe der Impedanz Z_3 der Hauptbrücke nachgestimmt, Punkt a erhält nun auch Erdpotential. Die Punkte a und b besitzen deshalb bei abgestimmter Brücke Erdpotential ohne galvanisch mit der Erde verbunden zu sein.

Die Auswertung der Brückenmessung geschieht genau gleich wie die der normalen Brücke; der Verlustfaktor berechnet sich also aus:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\omega L_3}{R_3}, \text{ resp. } \operatorname{tg} \delta = R_4 \omega C_4.$$

In den Fig. 3 und 4 sind Messungen des Verlustfaktors eingetragen; eine Abhängigkeit des Verlustfaktors von der Grösse der Brückenwiderstände oder der Grösse der Kapazität des Luftkondensators, wie sie bei der normalen Messbrücke auftritt, ist nicht vorhanden.

Empfindlichkeit. Bei dieser Brücke kann der Verlustfaktor sehr genau bestimmt werden. Eine Widerstandsänderung in einem der beiden Brückenweige Z_3 resp. Z_4 um 1,5‰ oder eine Aenderung der Kompensationsinduktivität um 2‰ ist am Galvanometer noch gut bemerkbar.

Eine Aenderung der Vergleichskapazität C_L des Luftkondensators von $0,5 \cdot 10^{-10} F$ bis $4 \cdot 10^{-10} F$, also auf das 8-fache, hat einen Fehler des gemessenen Verlustfaktors an einer Durchführung von $\pm 1,6\%$ zur Folge. Eine Widerstandsänderung in einem der beiden Messweige Z_1 Z_3 um das 9-fache gibt einen Fehler des gemessenen Verlustfaktors von $\pm 1,8\%$.

⁵⁾ ETZ 1911, S. 1001.