Empfindlichkeit und Genauigkeit bei der Messung kleiner Verlustfaktoren mittels Brückensystemen bei Niederfrequenz, insbesondere für Ölmessungen

Autor(en): **Angern, K. von**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **54 (1963)**

Heft 26

PDF erstellt am: **15.09.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-916547

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Empfindlichkeit und Genauigkeit bei der Messung kleiner Verlustfaktoren mittels Brückensystemen bei Niederfrequenz, insbesondere für Ölmessungen

Von *K. von Angern*, Watt

621.317.374.683.4.089.52

Ausgehend von der bekannten Scheringbrücke wird der grundlegende Aufbau einer Wechselstrommessbrücke zur genauen Messung von Verlustfaktoren bis auf 10^{-6} von flüssigen Isolierstoffen, insbesondere von Mineralölen beschrieben. Es wird dabei hergeleitet, welche Zweige das Brückensystems am zweckmässigsten veränderlich gestaltet werden und wie es möglich ist, im Zweig 4 der Brücke die Ablese- und Messgenauigkeit durch eine einfache Schaltung zu vergrössern. Ferner werden im letzten Abschnitt die Abgleichempfindlichkeit und die Messgenauigkeit rechnerisch behandelt.

En partant du pont de Schering, bien connu, l'auteur décrit la construction de principe d'un pont à courant alternatif pour la mesure précise jusqu'à 10^{-6} de facteurs de pertes de liquides isolants, notamment d'huiles minérales. Il montre quelles sont les branches du pont qui peuvent être de préférence rendues variables et comment il est possible d'augmenter la précision de lecture et la mesure dans la branche 4 de ce pont, par un simple montage. Pour terminer, il traite du calcul de la sensibilité de l'équilibrage du pont et de la précision des mesures.

1. Einleitung

Um zu entscheiden, welche Brückenmethode zur Bestimmung kleiner dielektrischer Verluste, insbesondere für Öle, am zweckmässigsten ist, müssen vorerst die an eine solche Messanordnung gestellten Anforderungen und Möglichkeiten der Realisierung derselben klargelegt werden. Es wird dabei von der Substitutionsmethode abgesehen, da mit dieser Methode die absolut genauesten Resultate erhalten werden. Die Forderungen können nach ihrer Art in zwei Gruppen aufgeteilt werden:

a) Messtechnische Anforderungen;
b) Wirtschaftliche Anforderungen.

In den folgenden Ausführungen werden in der Hauptsache die messtechnischen Anforderungen behandelt. Die Gruppe a) enthält unter anderem auch die Messgenauigkeit, d. h. die Abgleichgenauigkeit, die erforderlich ist, um mit Zuverlässigkeit einen Verlustwinkel in bestimmter Grössenordnung messen zu können.

Im Jahre 1949 sind auf internationaler Basis in verschiedenen Staaten Messungen des Verlustwinkels von ein und demselben Mineralöl durchgeführt worden. Obwohl die damaligen Messbrücken sich in ihrem Aufbau nicht wesentlich von den heutigen unterschieden haben, ergaben die Messresultate erstaunlich grosse Unterschiede (Tabelle I).

Zusammenfassung der Resultate von verschiedenen Ölmessungen bei 50 Hz und 10 kV/cm Feldstärke[1])

Tabelle I

	Messwerte: $\operatorname{tg} \delta \cdot 10^4$ Messungen bei			Abweichungen vom Mittel in % Messungen bei		
Nr.	60 °C	80 °C	100 °C	60 °C	80 °C	100 °C
1	1.4	1.5	2.1	− 70%	− 32 %	− 54%
2	5	1	1	+ 9%	− 54.0%	− 78%
3	3.9	5.2	13	− 13%	+ 140 %	+ 182%
4	3	1	2.3	+ 74%	− 54.0%	− 50%
Mittel	4.6	2.2	4.6	0	0	0

[1]) Die Messungen wurden mittels Scheringbrücken durchgeführt.

Aus dieser ist ersichtlich, dass die Messungen bis auf 2 Dezimalen voneinander verschieden sind. Das bedeutet, dass der Verlustfaktor bis auf 10^{-5} zuverlässig genau gemessen werden muss, d. h., es ist — abgesehen von der Art des Messverfahrens, Vorgehen und übrigen Prüfbestimmungen — eine Ablesegenauigkeit von 10^{-6} notwendig, um mit Sicherheit aussagen zu können, dass die Grösse 10^{-5} genau ist. Da zudem heute Mineralöle und synthetische Ölprodukte in ihrer Herstellung sehr weit fortgeschritten sind und Verlustfaktoren von 10^{-5} keine Seltenheit mehr sind, ist die Forderung der Messgenauigkeit von 10^{-5} gerechtfertigt. Bevor auf die messtechnischen Voraussetzungen zur Erfüllung dieser Forderung eingegangen wird, sei das zu verwendende Brückensystem betrachtet.

2. Brückensystem

Tabelle I beruht auf Messungen mit einem Brückensystem nach Schering. Für die Beurteilung, welches Brückensystem am geeignetsten ist, müssen vorerst die Grundbedingungen für eine Wechselstrombrücke betrachtet werden.

Entsprechend dem Aufbauprinzip wird für die Berechnung von Wechselstrommessbrücken von den Gleichstrommessbrükken ausgegangen, wobei die auftretenden Widerstände nicht mehr als reelle Grössen, sondern als komplexe Elemente eingesetzt werden. Alle mit Wechselstrom betriebenen Messbrücken haben zwei Merkmale:

a) Es müssen zwei voneinander unabhängige Abgleichmöglichkeiten vorhanden sein (Phase und Betrag).
b) Es muss ein wechselstromempfindliches Anzeigegerät verwendet werden.

Das erste Merkmal liefert wie bei der Wheatstone-Brücke für Gleichstrom die Beziehung

$$\overline{Z}_1 : \overline{Z}_2 = \overline{Z}_3 : \overline{Z}_4$$

oder

$$\overline{Z}_1 \, \overline{Z}_4 = \overline{Z}_2 \, \overline{Z}_3$$

Durch Einsetzen von

$$\overline{Z} = \vec{R} + \mathrm{j} \, \vec{X}$$

wobei $\vec{R}$ die Wirkkomponente und $\vec{X}$ die Blindkomponente bedeuten, ergeben sich die beiden Grundgleichungen (1) und (2).

$$\vec{R}_1 \vec{R}_4 - \vec{X}_1 \vec{X}_4 = \vec{R}_2 \vec{R}_3 - \vec{X}_2 \vec{X}_3 \tag{1}$$

$$\vec{R}_1 \vec{X}_4 + \vec{X}_1 \vec{R}_4 = \vec{R}_2 \vec{X}_3 + \vec{X}_2 \vec{R}_3 \tag{2}$$

In der Formel ist der Phasenabgleich $\varphi_1 - \varphi_3 = \varphi_2 - \varphi_4$ eingeschlossen. Mit Berücksichtigung der Spannung in den einzelnen Zweigen(Fig. 1) bedeutet dies im Brückengleichgewicht:

$$\vec{U}_1 = \vec{U}_2 \qquad \vec{U}_3 = \vec{U}_4$$

oder wenn die Spannung zwischen den Punkten $u - v$ mit $\vec{U}_c$ und zwischen den Punkten $a - b$ mit $\vec{U}_a$ bezeichnet wird:

$$\vec{U}_1 = \vec{U}_2 = \vec{U}_c \frac{\vec{Z}_1}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_3} = \vec{U}_c \frac{\vec{Z}_2}{\vec{Z}_2 + \vec{Z}_4}$$

$$\vec{U}_3 = \vec{U}_4 = \vec{U}_c \frac{\vec{Z}_3}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_3} = \vec{U}_c \frac{\vec{Z}_4}{\vec{Z}_2 + \vec{Z}_4}$$

Bei der Abgleichung einer Wechselstrombrücke müssen die beiden Grundgleichungen (1) und (2) erfüllt werden, d. h. es müssen zwei Abgleichungen vorgenommen werden. Dabei sind zwei Möglichkeiten zu unterscheiden:

a) Die beiden Abgleichungen beeinflussen sich gegenseitig nicht;
b) Die beiden Abgleichungen beeinflussen sich gegenseitig.

Der erste Fall ist der erstrebenswerte, aber leider bei der Mehrzahl der Wechselstrommessbrücken nicht ohne weiteres zu erfüllen. Für eine Ölmessbrücke kommt zum Teil der zweite Fall in Frage.

Bei der Messung sehr kleiner Verlustfaktoren ist man aus technischen Gründen darauf angewiesen, das Vergleichsverfahren anzuwenden, d. h. der Prüfling wird mit einem gleichartigen, qualitativ höher stehenden Normal verglichen. Es wird die Differenz der Verlustfaktoren zwischen Prüfling und Normal-Kondensator gemessen. Als praktisch verlustfreies Element ist es naheliegend, einen Luft-Normalkondensator zu verwenden.

In den Zweigen *1* und *2* (Fig. 1) ergeben sich damit Kapazitäten, wobei die Kapazität C_1 als zu messende Grösse mit einer Wirkkomponente behaftet ist. In den Grundgleichungen wird:

$$\vec{Z}_1 = R + \frac{1}{\mathrm{j}\,\omega\,C_1} = \frac{1}{\mathrm{j}\,\omega\,C_1} \cdot \frac{1}{1 - \operatorname{tg}\delta}$$

$$\vec{Z}_2 = \frac{1}{\mathrm{j}\,\omega\,C_2}$$

Es scheiden also bereits $\vec{X}_1$, $\vec{R}_1$ und $\vec{R}_2$ als Abgleichvariable aus.

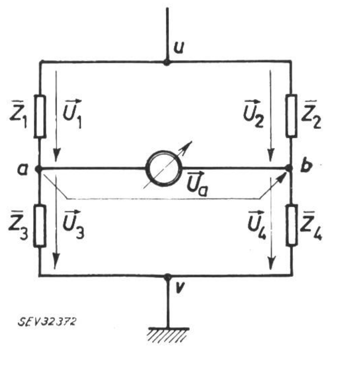

Fig. 1
Allgemeines Schema einer Wheatstonebrücke

a Linker Brückeneckpunkt der Messdiagonale
u Oberer Brückenspeisepunkt
b Rechter Brückeneckpunkt der Messdiagonale
v Unterer Brückenspeisepunkt
$\vec{Z}_1 ... \vec{Z}_4$ Impedanzen der Zweige 1...4
$\vec{U}_1 ... \vec{U}_4$ Spannung in den Zweigen 1...4
$\vec{U}_a$ Spannung an der Messdiagonale

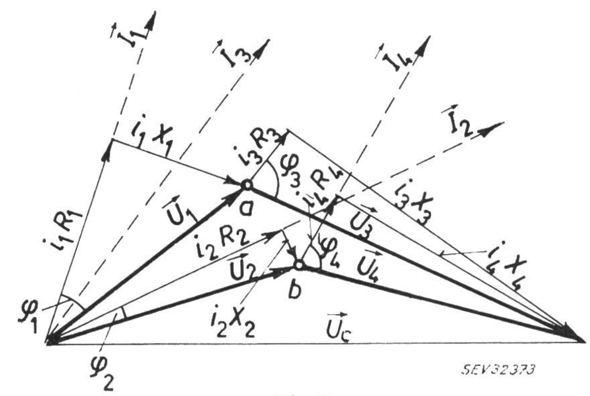

Fig. 2
Diagramm der allgemeinen nicht abgeglichenen Wheatstonebrücke

$\varphi_1 - \varphi_3 = \varphi_2 - \varphi_4$
Im abgeglichenen Zustand fallen die beiden Punkte *a* und *b* zusammen
$\varphi_1 ... \varphi_4$ Phasenwinkel der einzelnen Brückenzweige; $\vec{I}_1 ... \vec{I}_4$ Zweigströme;
$i_1R_1 ... i_4R_4$ Ohm'sche Spannungsvektoren der Zweige 1...4;
$i_1X_1 ... i_4X_4$ Kapazitive Spannungsvektoren der Zweige 1...4;
$\vec{U}_1 ... \vec{U}_4$ Resultierende Spannungsvektoren in den Zweigen 1...4;
$\vec{U}_c$ Brückenspeisespannungsvektor

Für die Abgleichmöglichkeit einer Wechselstrom-Messbrücke wird am einfachsten die Darstellung in der komplexen Ebene betrachtet (Fig. 2).

Zwecks Vereinfachung und zum Verständnis der folgenden Erläuterungen ist in Fig. 3 das Impedanz-Diagramm getrennt nach linkem und rechtem Brückenteil gezeichnet, wobei bereits vorausgesetzt ist, dass

$$\vec{Z}_1 = R_1 + \frac{1}{\mathrm{j}\,\omega\,C_1}$$

und

$$\vec{Z}_2 = \frac{1}{\mathrm{j}\,\omega\,C_2}$$

Es sind noch folgende möglichen Abgleichvariablen vorhanden:

$$\vec{Z}_2\!: \ \vec{X}_2 \rightarrow \vec{C}_2$$

$$\vec{Z}_3\!: \ \vec{R}_3 \ \text{ und } \ \vec{X}_3$$

$$\vec{Z}_4\!: \ \vec{R}_4 \ \text{ und } \ \vec{X}_4$$

Mit $\vec{X}_2 = C_2$ kann, da der Kondensator als verlustfrei vorausgesetzt ist, der Betrag beeinflusst werden. Für den Abgleich sind durch die Zweige *3* und *4* (Fig. 1) die beiden Dreiecke der Fig. 3 durch Verändern der Seitenlängen und Winkel und durch Drehen zur Deckung zu bringen. Macht man $\vec{Z}_3$ kapazitiv, muss $\vec{Z}_4$ ebenfalls kapazitiv sein, um die Brückenbedingungen zu erfüllen. In diesem Fall liegt eine Vierkapazitätenbrücke vor, bei welcher für die geforderte Genauigkeit in den unteren Brückenzweigen absolut genaue, in der Kapazität und im Verlustwinkel in Bezug auf Temperatur und Zeit konstante Kondensatoren verwendet werden müssen. Dies bietet in der Praxis einige Schwierigkeiten, wobei zu berücksichtigen ist, dass eine

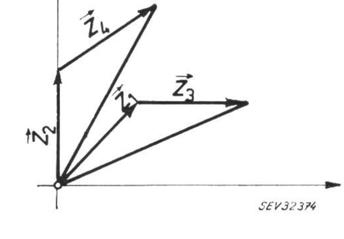

Fig. 3
Abgleichbarkeit von Wechselstrommessbrücken

$\vec{Z}_1 ... \vec{Z}_4$ Impedanzvektoren der einzelnen Zweigen

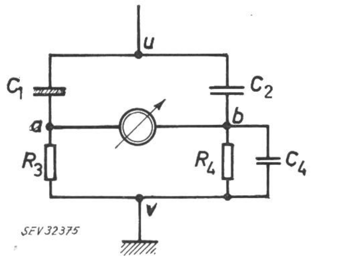

Fig. 4
Schema der Wechselstrom-messbrücke
C_1 Zu messender verlustbehafteter Kondensator
C_2 Verlustfreier Normalkondensator
C_4 Verlustwinkel-Abgleichkondensator
R_3, R_4 Brückenwiderstände
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

solche Brücke nicht mit Gleichstrom nachgeprüft oder geeicht werden kann.

Eine bessere Lösung, die auch in der Praxis einfacher realisierbar ist, besteht darin, die Zweige *3* und *4* als Ohmsche Komponente auszuführen. Es ist dabei nur zu berücksichtigen, dass ein phasendrehendes Element vorhanden sein muss, um die Winkel in Übereinstimmung zu bringen. Die beiden Dreiecke in Fig. 3 müssen einander ähnlich sein und dürfen nicht seitenverkehrt liegen. Im Dreieck mit $\vec{Z}_1\,\vec{Z}_3$ ist $\vec{Z}_1$ als phasendrehendes Element gegeben, folglich legt man Z_3 in die reelle Achse und bildet den Zweig *3* als verlustwinkelfreien Ohmschen Widerstand aus. Im Dreieck mit $\vec{Z}_2\,\vec{Z}_4$ ist $\vec{Z}_2$ in seiner Richtung gegeben, so dass $\vec{Z}_4$ als phasendrehendes Element auszuführen ist. Dies erfolgt durch Parallelschaltung eines Kondensators mit einem Ohmschen Widerstand in Zweig *4*. Damit ist grundsätzlich die Art der Elemente in den einzelnen Zweigen festgelegt, und es ergibt sich das Schema nach Fig. 4.

Noch nicht klar ist die Frage, welche Elemente für die Einstellung der Betragsänderung am zweckmässigsten sind. Hier gelten folgende Überlegungen:

Bei der normalen Scheringbrücke ist der obere Brückenteil mit C_1 und C_2 fest, und der untere Brückenteil mit R_3 und C_4 veränderlich. R_4 ist dabei als Brückenwiderstand z. B. mit den Werten $100/\pi$, $1000/\pi$ und $10000/\pi$ und dem Widerstand R_3 als Dekadenwiderstand mit den Stufen $10 \times (1 + 10 + 100)\ \Omega$ $+$ Schleifdraht $10 \times 0{,}1\ \Omega$ und parallelgeschalteten Kapazitätsdekaden $10 \times (0{,}1 + 0{,}01 + 0{,}001)\ \mu\text{F}$ $+$ Drehkondensator 50...1100 pF ausgeführt. Je nach Brückenverhältnis, d. h. je nachdem, welche Kapazität und welchen Verlustfaktor der Prüfling hat, dient die Einstellung von R_3 als Mass für die Kapazität und C_4 mit R_4 als Mass für den Verlustfaktor. Es ist dabei praktisch unmöglich, bei der Vielzahl von Einstellmöglichkeiten den unteren Brückenteil derart fehlwinkelfrei auszubauen, dass für jede Einstellung der einzelne innere Fehler kleiner als 10^{-6} ist. Es sei nur darauf hingewiesen, dass bei mit Schalter einstellbaren Widerständen je nach Einstellung der Fehlwinkel bis zur Grössenordnung 10^{-5} betragen kann, woraus ersichtlich ist, welche Anforderungen an solche Bauelemente in der Messtechnik gestellt werden. Da zudem immer wieder Restinduktivitäten und Ohmscher Widerstand der Verbindungsleitungen, Zusatzkapazitäten zwischen den einzelnen Brückenzweigen, Erdkapazitäten usw. auftreten (wobei die Werte je nach Einstellung verschieden sind), ist ein fehlwinkelfreier Aufbau mit einigen Schwierigkeiten verbunden. Durch Abschirmung können die unerwünschten Grössen in definierten Grenzen gehalten werden, wobei jedoch jede Abschirmung irgend eines Brückenteiles wieder zu unvermeidlichen Kapazitäten und Ableitungen zwischen dem Teil und dem Schirm führt. Bei zweckmässiger Abschirmung kann die Verteilung der Zusatzkapazitäten und Zuleitungen derart günstig beeinflusst werden, dass ihr Einfluss durch Korrekturformeln berücksichtigt ist. Ebenso ist es möglich, durch eine Hilfsbrücke die Messung beeinflussende Erdkapazitäten unwirksam zu machen. Für genaues Messen bedeuten die Abschirmungen ein nicht leicht zu lösendes Problem.

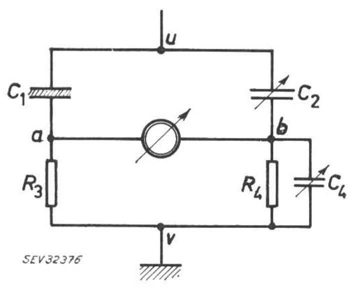

Fig. 5
Wechselstrommessbrücke mit festem unteren Brückenanteil und variablen $C_2 = C_N$
Bezeichnungen siehe Fig. 4

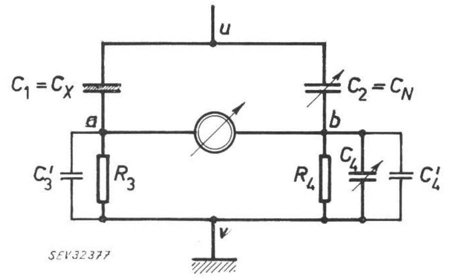

Fig. 6
Wechselstrommessbrücke mit Abgleichkapazitäten
C_X Unbekannter, zu messender Kondensator; C_N Einstellbarer Normalkondensator (verlustfrei); C'_3, C'_4 Abgleichkondensatoren für die inneren Fehlwinkeln der Zweige 3 und 4
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 4

Es liegt nicht im Rahmen dieses Berichtes, darauf näher einzugehen und würde auch zu weit gehen, nähere Details klarzulegen. Aus den angeführten Gründen ist jedoch ersichtlich, dass die klassische Scheringbrücke mit einstellbarem unteren Brückenzweig für die geforderte Genauigkeit von 10^{-6} einige Schwierigkeiten bietet.

Eine bessere Lösung ergibt sich, wenn der untere Brückenteil mit festen Brückenwiderständen ausgeführt und zu R_4 lediglich die einstellbare Kapazitätsdekade parallelgeschaltet wird. Dies bedingt, dass im oberen Brückenteil ein zusätzliches einstellbares Element für den Kapazitätsabgleich vorgesehen werden muss. Es ist deshalb C_2 als verlustfreier Drehkondensator auszubilden, womit aus der Schaltung das Schema nach Fig. 5 entsteht.

In der endgültigen Schaltung kann dabei je nach erforderlichem Messbereich der Widerstand R_3 in Stufen, z. B. von 1, 10, 100, 1000 Ω, ausgeführt und mittels eines Schalters umgeschaltet werden. Damit werden für jede Brückeneinstellung die Widerstände R_3 und R_4 für den Abgleich nicht mehr verändert, und man kann die beiden Brückenzweige *3* und *4* (Fig. 1) fehlwinkelfrei ausführen, indem die entsprechenden Abgleichkapazitäten für R_3 im Zweig *4* und für R_4 im Zweig *3* eingeschaltet werden. Ein entsprechendes Schema zeigt Fig. 6.

3. Abschirmung

Selbstverständlich müssen die einzelnen Brückenteile zweckmässig abgeschirmt sein, um einerseits die verschiedenen inneren Fremdkapazitäten erfassen zu können und anderseits von aussen einwirkende Störeinflüsse möglichst zu vermeiden. Als von aussen wirkende Einflüsse sind dabei elektrische und magnetische Streufelder aufzuführen. Die magnetischen Einflüsse lassen sich bei einiger Aufmerksamkeit, z. B. durch entfernte Aufstellung nicht zur Messanordnung gehörender Ge-

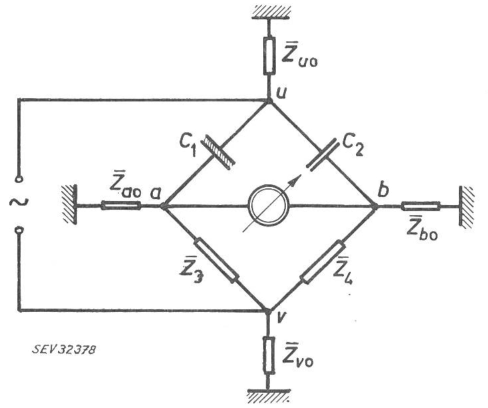

Fig. 7
Kapazitive Kopplungen bei einer Wechselstrommessbrücke
$\overline{Z}_{ao}$, $\overline{Z}_{bo}$, $\overline{Z}_{uo}$, $\overline{Z}_{vo}$ Streuimpedanzen der Brückeneckpunkte gegen Erde
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 4

räte oder durch Anbringen von Schirmen aus Materialien hoher Permeabilität beseitigen. Grössere Sorgfalt erfordern die elektrischen Streufelder. Alle vier Zweige der Brücke und der Indikatorzweig besitzen verteilte Streukapazitäten gegen Erde (Fig. 7).

Wie bereits erwähnt, müssen diese Kapazitäten bezüglich ihrer Lage und Grösse für einwandfreie Messungen definiert werden. Die Abschirmung allein genügt hiefür nicht; man muss vielmehr auch die Potentiale der Schirme gegeneinander und gegen Erde so festlegen, dass die Brückeneinstellung durch die Schirme nicht unkontrollierbar beeinflusst werden. In diesem Zusammenhang ist es von Bedeutung, welcher Eckpunkt der Brücke geerdet wird. Um Ausgleichströme zu vermeiden, ist es zweckmässig, den Wagnerschen Hilfszweig zu verwenden (Fig. 8). Man erreicht dadurch, dass:

a) Alle störanfälligen Kapazitäten, auch solche, die durch Bewegungen des Beobachters beeinflusst werden, den Zweigen der Hilfsschaltung parallel liegen und durch Abgleich für die Messbrücke unwirksam gemacht werden;
b) Die Nullecken der Messbrücke mit dem Indikator gegen die Abschirmung spannungslos sind und ihre Erdkapazitäten nicht in die Messung eingehen.

Aus Erfüllung dieser Anforderungen entsteht eine Messbrücke gemäss Fig. 9.

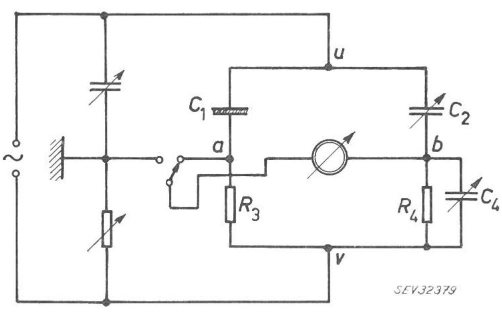

Fig. 8
Messbrücke mit Wagnerschem Hilfszweig
Bezeichnungen siehe Fig. 4

4. Kapazitäts- und tgδ-Genauigkeit

Bei der nach Fig. 5 aufgebauten Brücke ergeben sich für die Ausrechnung der Messgrössen folgende Formeln:

$$C_X = C_1 = C_2 \frac{R_4}{R_3} = C_N \frac{R_4}{R_3}$$

$$\operatorname{tg} \delta = R_4\, \omega\, C_4$$

Auf dem Markt sind heute verlustfreie Drehkondensatoren mit einer Kapazität von ca. 20...200 pF erhältlich. Wenn das Verhältnis $R_4/R_3 = 1$ gemacht wird, ergibt sich ein Messbereich von 20...200 pF.

Für Ölmessungen mit einem Schutzringkondensator kann dieser Bereich nur knapp genügen. $C_2 = C_N$ muss dabei, wenn die Dielektrizitätskonstante auf 2 Dezimalen genau bestimmt werden soll, eine Einstellgenauigkeit von 0,1 pF besitzen. Dies fordert eine besondere Einstellvorrichtung mit einer Ablesegenauigkeit von 0,2 Teilstrichen für eine Kapazitätsänderung von 0,1 pF. Dies kann zwar auf mechanischem oder elektrischem Weg gelöst werden, bietet jedoch erhebliche Schwierigkeiten. Der Messbereich 20...200 pF ist relativ klein. Man kann ihn ohne Schwierigkeit durch Ändern des Verhältnisses R_4/R_3 vergrössern; dabei muss jedoch der tg δ-Messbereich ebenfalls berücksichtigt werden. An einem Beispiel sei dies erläutert:

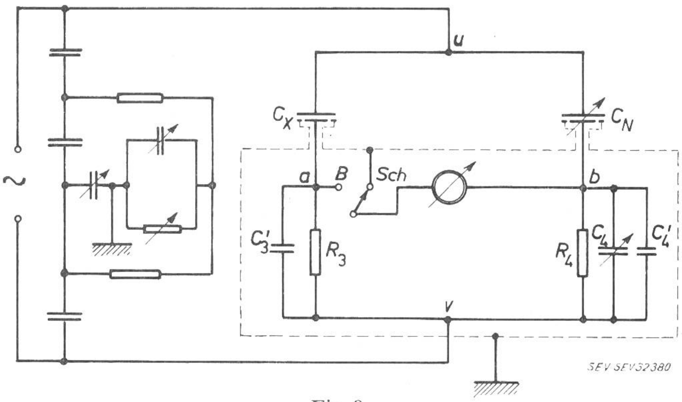

Fig. 9
Schema der Messbrücke
C_X Zu messender Kondensator mit Schutzringelektrode; C_N Verlustfreier Normalkondensator; *B* Brücke; *Sch* Schirm
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 4 und 6

Messbereiche

a) $R_4 = R_3 = 10^4 \Omega$; $f = 50$ Hz

$C_4 =$

$$10\left(\frac{10^{-1}}{\pi} + \frac{10^{-2}}{\pi} + \frac{10^{-3}}{\pi}\right) \mu\text{F} + \text{Drehkondensator ca. } 350\,\text{pF}$$

$C_N = C_2 = 20 \ldots 200$ pF

$\underline{C_X = 20 \ldots 200\ \text{pF}}$

$\operatorname{tg} \delta_X = R_4\, \omega\, C_4 = 10^4 \cdot 2\pi f \cdot C_4$

$\operatorname{tg} \delta_{min} = R_4\, \omega\, C_{4min} = 10^4 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 10 \cdot 10^{-12} = \underline{10^{-7}}$

$\operatorname{tg} \delta_{max} = R_4\, \omega\, C_{4max} = 10^4 \cdot 2\pi \cdot 50 \dfrac{10^{-1}}{\pi} 10^{-6} = \underline{10^{-1}}$

b) Mit $R_4 = 10^4 \Omega$
$R_3 = 10^3 \Omega$

folgt:

$C_X = (20 \ldots 200)\, 10 = \underline{200 \ldots 2000\ \text{pF}}$

$\operatorname{tg} \delta_{min} = 10^4\, \omega\, C_{4min} = \underline{\pi \cdot 10^{-7}}$

c) Mit $R_4 = 10^3 \Omega = R_3$

$\underline{C_X = 20 \ldots 200\ \text{pF}}$

$\operatorname{tg} \delta_{min} = 10^3 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 10 \cdot 10^{-12} = \underline{\pi \cdot 10^{-6}}$

$\operatorname{tg} \delta_{max} = \underline{1}$

Wie ersichtlich, kommt man mit $R_3 = R_4 = 10^3\ \Omega$ bereits an die Grenze der geforderten Genauigkeit. Der kleinste bestimmbare Verlustfaktor ist bereits in der Grössenordnung von $\pi \cdot 10^{-6}$. Es gibt nun ein Mittel, die tg δ-Genauigkeit zu erhöhen, indem die Schaltung des Zweiges *4* nach Schema

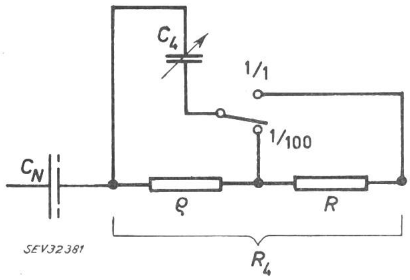

Fig. 10
Schaltschema des Zweiges 4 zur Erhöhung der tg δ-Genauigkeit
C_N Normalkondensator; C_4 Verlustwinkel-Abgleichkondensator; ϱ, R Teilwiderstände des Brückenwiderstandes R_4

Fig. 10 ausgeführt wird. Die Berechnung zeigt folgendes: Scheinwiderstände der Brückenzweige:

$$\vec{Z}_1 = r + \frac{1}{j\,\omega\,C_1}$$

$$\vec{Z}_2 = \frac{1}{j\,\omega\,C_2}$$

$$\vec{Z}_3 = R_3$$

$$\vec{Z}_4 = R + \frac{\varrho}{j\,\omega\,C_4\,\varrho + 1}$$

Daraus folgen die Gleichgewichtsbedingungen:

$$C_1\,R_3 = C_2\,R_4$$

und

$$C_1\,r\,R_4 = C_4\,\varrho^2$$

$$R + \varrho = R_4$$

$$\operatorname{tg}\delta = \omega\,C_4\,R_4\,\frac{\varrho^2}{R^2} = \omega\,C_4\,\varrho\,\frac{\varrho}{R_4}$$

Setzt man $\varrho/R = q$

so wird

$$\operatorname{tg}\delta = \omega\,C_4\,\varrho\,q = \omega\,C_4\,R_4\,q^2$$

Eine bequeme Lösung ergibt sich, wenn $q = 0{,}1$ ist, d.h. $q^2 = 0{,}01$. Man erhält dadurch die Möglichkeit, den Verlustfaktor einmal über den ganzen Widerstand R_4 aus

$$\operatorname{tg}\delta = R_4\,\omega\,C_4$$

und über einen Teil von R_4 aus

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1}{100}\,R_4\,\omega\,C_4$$

zu bestimmen, wodurch die Einstellgenauigkeit um 2 Dezimalen erhöht wird. In Fig. 11 ist das Schema einer solchen Messbrücke dargestellt.

5. Abgleichgenauigkeit und Empfindlichkeit

Zur Erreichung einer Messgenauigkeit von 10^{-5} kommt wie erwähnt eine Messbrücke nach Fig. 11 in Frage. Dazu ist eine hinreichende Anzeigeempfindlichkeit des Null-Indikators notwendig. Für jedes Messproblem sind, um eine Aussage über die Messempfindlichkeit machen zu können, die Eigenschaften der Messeinrichtung und des Indikators zu berücksichtigen. Auf dem Markte sind heute Null-Indikatoren mit einer Ansprechstromstärke von $5 \cdot 10^{-10}$ A/Teilstrich erhältlich.

Um im folgenden einige Angaben über die Empfindlichkeit machen zu können, definiert man als die Messempfindlichkeit einer Wechselstrommessbrücke nach Fig. 1 die noch am Indikatorinstrument erkennbare kleinste Kapazitäts- oder Verlustfaktorabweichung gegenüber der genauen Abgleichungslage. Da das Wesen einer Brückenmessung im Vergleich der Spannungsabfälle in den Brückenzweigen liegt, rechnet man folgerichtig mit den Spannungen. Was interessiert, ist die Spannung U_a bzw. der Strom, welchen man in der Messdiagonale bei abgeglichener Brücke erhält, wenn die Abgleichung durch Änderung eines Brückenzweiges gestört wird. Für den allgemeinen Fall ist von Schering die Formel aufgestellt worden:

$$\Delta i_g = \frac{\Delta\vec{Z}_1}{\vec{Z}_1} \cdot \frac{U_e}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 + \vec{Z}_3 + \vec{Z}_4} \cdot \frac{1}{1 + \dfrac{\vec{Z}_g}{\vec{Z}_a}}$$

Darin bedeuten:

- U_e die durch die Verstimmung im Messzweig erzeugte Spannungsdifferenz zwischen den Punkten a und b;
- $\vec{Z}_g$ Widerstand des Null-Indikators;
- $\vec{Z}_a$ Widerstand der Brücke vom Indikator aus betrachtet;
- Δi_g der durch die Spannung U_e im Null-Indikator fliessende Strom.

Setzt man, da es gleichgültig ist, in welchem Brückenzweig die Veränderung vorgenommen wird, für

$$\frac{\Delta\vec{Z}}{\vec{Z}} = q$$

und löst die Formel nach q auf, erhält man:

$$q = \frac{\Delta\vec{Z}}{\vec{Z}} = \frac{\Delta i_g}{U_e} \cdot \frac{(\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 + \vec{Z}_3 + \vec{Z}_4)\,\vec{Z}_a}{\vec{Z}_a + \vec{Z}_g}$$

Durch Einsetzen der einzelnen Werte $\vec{Z} = \vec{R} + j\,\vec{X}$ und Umformen erhält man nach *Schering* für den Wert q aus den Brückendaten die Gleichung:

$$q = \frac{\Delta i}{U_1\,\omega\,C_1}\left(1 + \frac{R_g}{R_4} + \frac{C_2}{C_1}\right)$$

Die Formel kann noch vereinfacht werden, indem aus

$$C_2 : C_1 = R_3 : R_4$$

$$C_2\,R_4 = C_1\,R_3$$

$$I_1 \approx U_1\,\omega\,C_1$$

und

$$\frac{U_3}{R_3} \approx I_1\,\omega\,U_1 \cdot C_1 \quad \text{und} \quad U_3 \approx U_1 \cdot \omega \cdot C_1\,R_3$$

eingesetzt wird.

$$q = \frac{\Delta i}{U_3}\,(R_3 + R_4 + R_g)$$

Wird mit I_{50} die Ansprechstromstärke des Nullstrom-Anzeigers bezeichnet, so kann mit Hilfe dieser Formel die gerade noch feststellbare Änderung $\Delta\vec{Z}/\vec{Z}$ berechnet werden.

Eine Brücke mit den im Beispiel bereits aufgeführten Daten ergibt die Werte der Tabelle II (dabei sind für den Widerstand

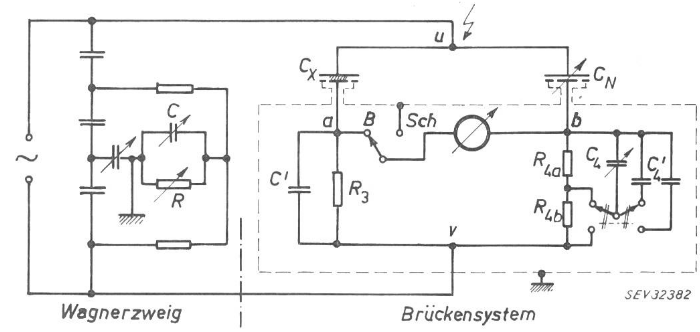

Fig. 11
Schema einer vollständigen Messbrücke mit Wagnerzweig und Schirm
C, R Abgleichelemente des Wagnerzweiges; R_{4a}, R_{4b} Teilwiderstände des Brückenwiderstandes im Zweig 4
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 9

R_g des Nullstrom-Anzeigers der Wert $10^3\,\Omega$ und eine Brückenspeisespannung von 2000 V, 50 Hz, angenommen):

Empfindlichkeiten

Tabelle II

C_1 pF	C_2 pF	R_3 Ω	R_4 Ω	q	I_i A	U_3 V
20	20	10^4	10^4	$8{,}35 \cdot 10^{-5}$	$1{,}26 \cdot 10^{-5}$	$1{,}26 \cdot 10^{-1}$
200	200	10^4	10^4	$8{,}35 \cdot 10^{-6}$	$1{,}26 \cdot 10^{-4}$	1,26
200	20	10^3	10^4	$4{,}77 \cdot 10^{-5}$	$1{,}26 \cdot 10^{-4}$	$1{,}26 \cdot 10^{-1}$
2000	200	10^3	10^4	$4{,}77 \cdot 10^{-6}$	$1{,}26 \cdot 10^{-3}$	1,26
20	20	10^3	10^3	$1{,}2 \cdot 10^{-4}$	$1{,}26 \cdot 10^{-5}$	$1{,}26 \cdot 10^{-2}$
200	200	10^3	10^3	$1{,}2 \cdot 10^{-5}$	$1{,}26 \cdot 10^{-4}$	$1{,}26 \cdot 10^{-1}$

Aus Tabelle II geht hervor, dass mit $C_1 = 200$ pF eine in die Grössenordnung von 10^{-6} fallende Abgleichempfindlichkeit erreicht wird. Eine Vergrösserung der Empfindlichkeit kann erreicht werden durch Verkleinerung von Z_2, d. h. durch Verwendung eines verlustfreien Normalkondensators C_2 mit erhöhter Kapazität oder durch Erhöhung der Spannung. Das bedeutet einen merklichen finanziellen Mehraufwand, indem ein verlustfreier einstellbarer Normalkondensator hoher Spannungsfestigkeit relativ schwierig herzustellen und damit teuer ist. Es sind Vakuumkondensatoren bis 10 kV erhältlich, die mit einigen zusätzlichen Änderungen verwendet werden können. Werden alle Brückenelemente inklusiv dem Normalkondensator in einen gemeinsamen Kasten eingebaut, so ist man aus konstruktiven und isolationstechnischen Gründen auf eine möglichst niedrige Spannung angewiesen. Rechnet man mit einer Speisespannung von 3000 V, 50 Hz, $R_3 = R_4 = 10^4\,\Omega$, so ergibt sich mit $C_1 = C_2 = 100$ pF ein q-Wert von $1{,}10^{-5}$. Es ist daraus ersichtlich, dass man sich mit der Schaltung nach Fig. 11 an der Grenze des Möglichen bewegt und die gestellten Anforderungen nur bedingt erfüllen kann, d. h. bei relativ grossen Werten von C_1. Eine Lösung ist möglich, wenn es gelingt, den Nullstrom-Anzeiger um eine Potenz empfindlicher zu machen, was jedoch technisch nicht einfach ist, da hier bereits Faktoren, wie Elektronenrauschen bei elektronischem Aufbau sowie Anpassung an die Brücke u. a. m. eine Rolle spielen.

Adresse des Autors:
K. von Angern, Dipl. Ing. ETH, Watt (ZH).

Einpolige, einseitige Unterbrechung bei Erdkurzschluss im Maschennetz

Von *A. Wagner,* Innsbruck

621.316.1.052.4 : 621.3.014.7

Es werden Formeln für die Phasenströme und die Leitererd- und Sternpunktspotentiale einer Einfach- und einer Doppelleitung eines Maschennetzes mit direkt oder niederohmig geerdeten Sternpunkten für einpolige, einseitige Unterbrechung der fehlerbehafteten Phase bei einpoligem Erdkurzschluss abgeleitet. Die berechneten Grössen dienen zur Projektierung und Einstellung des Leitungsschutzes.

On établit des formules pour les courants de phase et les potentiels vers la terre des phases et des neutres aux extrémités d'une ligne d'énergie à un ou deux ternes connectée à un réseau maillé, dont les neutres sont mis à la terre directement ou par des résistances inférieures, après l'interruption unipolaire et unilatérale de la phase perturbée lors d'un défaut unipolaire à la terre. Les valeurs calculées servent au projet et à la mise au point de la protection de la ligne.

1. Einleitung

Für die Projektierung und Einstellung des Leitungsschutzes in einem Netz mit direkt oder niederohmig geerdeten Sternpunkten kann es zweckmässig sein, ausser den verschiedenen Betriebsbedingungen und Fehlerarten auch die Auswirkungen einer einpoligen, einseitigen Unterbrechung bei Erdschluss dieser Phase zu untersuchen. Diese Unterbrechung kann durch einen Leiterriss oder dadurch verursacht sein, dass bei einpoliger Kurzunterbrechung ohne Mitnahmeschaltung bei Schwachlast oder mangelnder Anregung an einem Leitungsende, wie zu kleinem Summenstrom, zunächst nur einseitig geöffnet wird, so dass erst die veränderte Stromverteilung zum vollständigen Öffnen dieser Phase führt. Eine Modellmessung erfordert die gleichzeitige Netzdarstellung von mindestens 2 Komponenten und fehlwinkelfreie Übertrager zur Verbindung der Komponentennetzwerke [1][1]). Zur Berechnung des Falles einseitiger Unterbrechung wurden bisher nur Formeln und Diagramme für dreipolige Fehler [2; 3] und für einpoligen Erdschluss nur die grundlegenden Beziehungen zur Aufstellung von Gleichungssystemen [1] und Berechnungsformeln für den Erdschlußstrom an Verbundleitungen zwischen zwei sonst durch keine weitere Leitung miteinander verbundenen Netzen [4] angegeben. Demgegenüber werden im folgenden Berechnungsformeln abgeleitet, aus denen sich nach Einsetzen der jeweiligen Impedanzen und EMK alle Anrege- bezw. Messgrössen aller Phasen an beiden Leitungsenden für den Fall ergeben, dass eine einseitigeinpolig unterbrochene und mit einpoligem Erdschluss behaftete Einfach- oder Doppelleitung an ein Maschennetz angeschlossen ist, wobei auch der Lasteinfluss berücksichtigt werden kann. Weiter wird die wegen der Gleichphasigkeit der Nullströme in den Phasen durch Auskreuzen nicht beseitigbare gegenseitige Beeinflussung der Stränge einer Doppelleitung berücksichtigt.

2. Ableitung von Berechnungsformeln

Die zu Grunde gelegte allgemeine Konfiguration der beidseitigen Anspeisung der Leitung durch ein Maschennetz kann zur Berechnung der Spannungen und Ströme an der Leitung

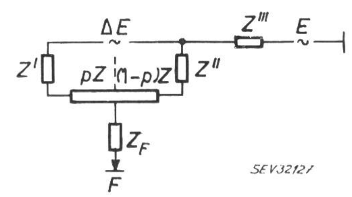

Fig. 1

nach dem Satz von der Ersatzspannungsquelle (Theorem von *Thévenin*) auf ein äquivalentes, vereinfachtes Netzersatzschaltbild nach Fig. 1 zurückgeführt werden, wie dies in Fig. 2 an

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.