Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 18 (1927)
Heft: 9

Artikel: Ein elektrodynamisches Wattmeter zur Messung dielektrischer Verluste
Autor: Täuber-Gretler, A.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058635

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: 22.08.2025

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

Ein elektrodynamisches Wattmeter zur Messung dielektrischer Verluste.

Von Dr. Ing. *A. Täuber-Gretler*, Zürich.

Der Autor beschreibt ein hochempfindliches elektrodynamisches Wattmeter, welches insbesondere zur Messung des dielektrischen Verlustwinkels und der Leistungsaufnahme fester Dielektra geeignet ist. Seine praktische Verwendbarkeit wird an Hand der Daten eines ausgeführten Instrumentes nachgewiesen.

L'auteur décrit un wattmètre électrodynamique ultrasensible, spécialement approprié à la mesure de l'angle des pertes diélectriques et de la puissance absorbée par les diélectriques solides. Il parle ensuite de l'utilisation pratique de l'instrument, de ce dernier.

621.374.6

Die Güte eines festen Dielektrikums wird bekanntlich in erster Linie charakterisiert durch den Verlustwinkel, welcher sich aus der Leistungsaufnahme des Dielektrikums ergibt, wenn sich dasselbe in einem elektrischen Wechselfelde befindet. Die Untersuchung solcher fester Dielektrika (Isolatoren, Kabel) und deren Bewertung umfasst daher die Messung sowohl des Wattverlustes als auch des Leistungsfaktors. Bei der Prüfung ganzer Reihen gleicher Objekte genügt dagegen die Kenntnis des Leistungsfaktors oder des Verlustwinkels (Verlustwinkel $\varepsilon = 90 - \varphi$, wo $\cos \varphi$=Leistungsfaktor) zur Beurteilung vollständig.

Wenn es unternommen wurde, zu den bereits bekannten Messmethoden, vorab der klassischen Brückenmethode nach Schering, eine weitere hinzuzufügen, so geschah dies im Bestreben, eine verhältnismässig wohlfeile Messeinrichtung zu schaffen, welche bei hinreichender Genauigkeit ein rasches Arbeiten gestattet.

Als Vergleichsnormal für Prüfungen bei hohen Spannungen darf ein richtig konstruierter und abgeschirmter Luftkondensator als zweckmässigster und zeitlich unveränderlicher Apparat gelten. Stützt sich die betreffende Messmethode nur auf dessen Verlustlosigkeit, nicht aber auf seinen absoluten Kapazitätswert, so braucht auch dieser nicht bekannt zu sein.

Die neue Messeinrichtung ist gekennzeichnet durch die Verwendung eines hochempfindlichen elektrodynamischen Wattmeters mit 2 festen Wicklungen und einer an einem Bronzeband aufgehängten Drehspule (Fig. 1). Die eine der festen Spulen liegt über passende Vorwiderstände (R_a, L_a, C_a) an den Klemmen der Unterspannungswicklung des Prüftransformators *Tr*, währenddem die andere über einen veränderlichen induktionsfreien Widerstand *R* geschlossen ist. Die erstere, die Feldwicklung *F*, ist mit dieser der Hilfswicklung *H* möglichst stark induktiv gekoppelt. Die Drehspule *M* liegt in Reihe wahlweise (über einen Umschalter *S*) mit dem Luftkondensator C_N und dem Prüfobjekt C_X. Mit der Selbstinduktionsspule L_a und dem Kondensator C_a, deren genaue Werte nicht bekannt sein müssen, wird, je nach Erregung und Belastung des Prüftransformators *Tr*, dessen Fehlwinkel wenn nötig soweit überkompensiert, dass der um 180° elektrische Winkelgrade umgeklappte Feldstrom I_F im Elektrodynamometer der Sekundärspannung E_S zeitlich voreilt.

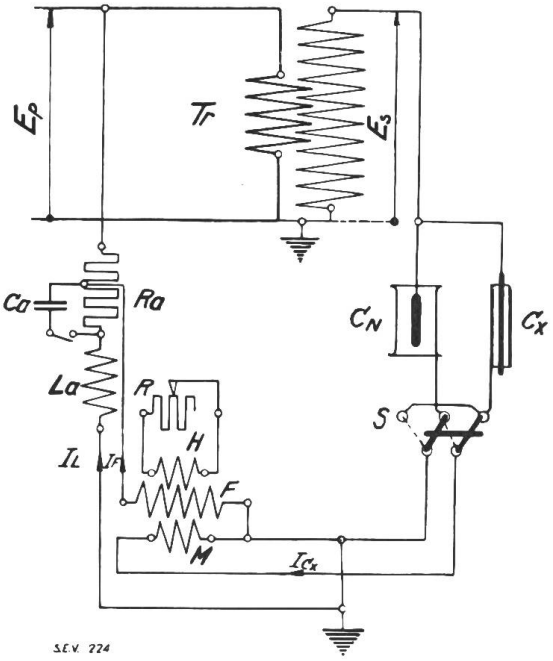

Fig. 1.

Die Messung der Leistungsaufnahme des Prüfobjektes und daran anschliessend die Bestimmung des Verlustwinkels geschieht nun in grundsätzlicher Abweichung von der nach Shanklin [1]) benannten und von der Firma Brown, Boveri & Cie. A.-G. in Baden [2]) vervollkommneten Methode durch Verändern des Widerstandes R. In der Hilfswicklung H wird durch den Strom I_F ein Strom I_H induziert, welcher nahezu 90^0 gegen jenen phasenverzögert ist. Die zugehörigen elektromagnetischen Felder Φ_F und Φ_H setzen sich zu einem resultierenden Feld $\Phi_{F,H}$ zusammen, welches gegen Φ_F nacheilt. Durchfliesst die Drehspule der Strom I_{CN}, so kann der Ausschlag, welcher zunächst infolge der nur in grossen Stufen mittelst L_a und C_a veränderlichen Phase des Stromes I_F gegen E_S beobachtet wird, durch Aendern des Widerstandes R genau auf Null gebracht werden. Der Fehlwinkel des Prüftransformators ist dann kompensiert. Nach Umlegen des Schalters S durchfliesst der Strom I_{CX} die Drehspule. I_{CX} eilt I_{CN} um den Verlustwinkel ε nach. Am Wattmeter wird ein Ausschlag a_{CX} beobachtet, welcher ein Mass ist für die vom Prüfobjekt aufgenommene elektrische Leistung. Wird a_{CX} durch Verkleinern des Widerstandes R zum Verschwinden gebracht, so kann der Verlustwinkel aus dem eingestellten Wert für R und den Instrumentenkonstanten berechnet werden.

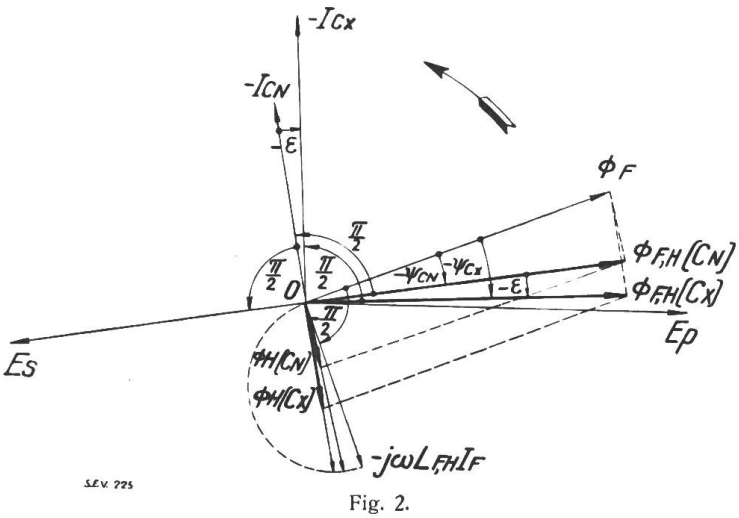

Fig. 2.

Die Beziehung zwischen dem Verlustwinkel ε, den Konstanten des Wattmeters und dem veränderlichen Widerstand R findet man wie folgt (siehe Diagramm Fig. 2):

Besitzt R einen von 0 verschiedenen, endlichen Wert R_{CN}, so wirken auf die Drehspule zwei Drehmomente T_1 und T_2:

$$T_1 = k_1 (I_F \; I_{CN}) \qquad (1)\ ^{3})$$

$$T_2 = k_2 (I_H \; I_{CN}) \qquad (2)\ ^{3})$$

worin k_1 und k_2 die elektrodynamischen Konstanten für Feldwicklung und Drehspule, beziehungsweise für Hilfswicklung und Drehspule bedeuten. k_1 und k_2 sind Funktionen des Winkels, den die betreffenden Spulenaxen miteinander bilden. Für jede Gleichgewichtslage gilt:

$$T_1 + T_2 = T_3 = aT_f. \qquad (3)$$

T_3 ist das Drehmoment des Bronzebandes, an welchem die Drehspule aufgehängt ist. Dasselbe kann gleichgesetzt werden dem Produkt aus dem Drehmoment für den Ausschlagswinkel 1 und dem Ausschlagswinkel a für die betreffende Gleichgewichtslage.

Der Fehlwinkel des Transformators ist kompensiert, wenn:

$$T_1 + T_2 = 0\,. \qquad (4)$$

Bedeutet $L_{F,H}$ den Koeffizienten der gegenseitigen Induktion zwischen Feldspule und Hilfspule, Z_H die Impedanz der letzteren und $\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz, so gilt in symbolischer Schreibweise, $(j = \sqrt{-1})$:

---

[1]) General Electric Review 1916, S. 842.

[2]) BBC Mitteilungen X Nr. 8, S. 152.

[3]) Der Klammerausdruck ist als skalares Produkt der Vektoren I_F und I_{CN} bezw. I_H und I_{CN} zu verstehen, somit ist z. B.:

$$(I_F \; I_{CN}) = [I_F] \; [I_{CN}] \cos (I_F, \; I_{CN})\,.$$

$$I_H = -\frac{j\omega L_{F,H} I_F}{Z_H + R_{CN}}. \tag{5}$$

Gleichung (4) lautet dann ausführlich:

$$T_1 + T_2 = k_1 (I_F\ I_{CN}) - \left| j \frac{\omega L_{F,H}}{Z_H + R_{CN}} \right| k_2 (I_F\ I_{CN})$$

$$= k_1 (I_F\ I_{CN}) \left| \left\{ 1 - \frac{k_2}{k_1} \frac{j\omega L_{F,H}}{R_H + R_{CN} + j\omega L_H} \right\} \right|. \tag{6}$$

Da nach Voraussetzung $(I_F\ I_{CN}) \neq 0$, so ist Gleichung (6) nur erfüllt, wenn der Ausdruck in der geschweiften Klammer Null ist. Nachdem der Nenner des komplexen Summanden reell gemacht und der ganze Klammerausdruck auf gleichen Nenner gebracht ist, lautet dieser:

$$\frac{(R_H + R_{CN})^2 + (\omega L_H)^2 - \frac{k_2}{k_1} \left\{ \omega^2 L_{F,H} L_H + j\omega L_{F,H} (R_H + R_{CN}) \right\}}{(R_H + R_{CN})^2 + (\omega L_H)^2} = 0.$$

Imaginärer durch reeller Teil ergibt die Tangente des Winkels ψ_{CN}, um welchen das resultierende Feld $\Phi_{F,H}$ gegen Φ_F verschoben erscheint.

Es ist somit:

$$\operatorname{tg} \psi_{CN} = -\frac{\frac{k_2}{k_1} \omega L_{F,H} (R_H + R_{CN})}{(R_H + R_{CN})^2 + (\omega L_H)^2 - \frac{k_2}{k_1} \omega^2 L_{F,H}\ L_H}. \tag{7}$$

Nach dem Umschalten der Drehspule auf das Prüfobjekt C_X durchfliesst der Strom I_{CX} die Drehspule. I_{CX} ist aber um den Verlustwinkel ε gegen I_{CN} verspätet; das Wattmeter zeigt daher einen gewissen Ausschlag, welcher durch Verkleinern des Widerstandes R zum Verschwinden gebracht werden kann. Ist R_{CX} sein Wert, so gilt analog nach Gleichung (7):

$$\operatorname{tg} \psi_{CX} = -\frac{\frac{k_2}{k_1} \omega L_{F,H} (R_H + R_{CX})}{(R_H + R_{CX})^2 + (\omega L_H)^2 - \frac{k_2}{k_1} \omega^2 L_{F,H}\ L_H} \tag{8}$$

und der gesuchte Verlustwinkel ε wird: $\varepsilon = \psi_{CX} - \psi_{CN}$, oder für kleine Winkel mit genügender Genauigkeit:

$$\underline{\sin \varepsilon = \cos \varphi \cong \operatorname{tg} \psi_{CX} - \operatorname{tg} \psi_{CN}.} \tag{9}$$

Die Anwendung der Gleichungen (7) und (8) ist etwas umständlich; eine wesentliche Kürzung ergibt sich, wenn die Wirkung der Selbstinduktion L_H der Hilfsspule durch eine passende Kapazität C_H aufgehoben wird. Schaltet man etwa einen Papierkondensator (beispielsweise $1\ \mu F$) parallel zu einem induktionsfreien Widerstand R_{CH}, so erhält man für die Gesamtimpedanz Z'_H des Hilfsspulkreises:

$$Z'_H = R_H + R_{CX} + j\omega L_H + \frac{R_{CH}\left(-\frac{j}{\omega C_H}\right)}{R_{CH} - \frac{j}{\omega C_H}}$$

$$= R_H + R_{CX} + \frac{R_{CH}}{1 + (\omega C_H R_{CH})^2} + j\omega \left\{ L_H - \frac{C_H R^2_{CH}}{1 + (\omega C_H R_{CH})^2} \right\}. \tag{10}$$

Bestimmt man R_{CH} aus der Bedingungsgleichung:

$$L_H - \frac{C_H R^2_{CH}}{1+(\omega C_H R_{CH})^2} = 0$$

so wird
$$Z'_H = R_H + R_{CX} + \frac{R_{CH}}{1+(\omega C_H R_{CH})^2} \cong R_H + R_{CH} + R_{CX}, \tag{11}$$

da im vorliegenden Fall $(\omega C_H\ R_{CH})^2 \ll 1$.

In den Gleichungen (7) und (8) fallen dann die Glieder, welche L_H enthalten fort und man erhält:

$$\operatorname{tg} \psi_{CN} = -\frac{k_2}{k_1}\,\omega L_{F,H}\,\frac{1}{R_H + R_{CH} + R_{CN}} \quad \text{und}$$

$$\operatorname{tg} \psi_{CX} = -\frac{k_2}{k_1}\,\omega L_{F,H}\,\frac{1}{R_H + R_{CH} + R_{CX}}.$$

Setzt man zu weiterer Abkürzung unter Annahme einer bestimmten Frequenz $\frac{k_2}{k_1}\,\omega L_{F,H} = K$ und $R_H + R_{CH} = R'_H$ so wird schliesslich:

$$\operatorname{tg} \psi_{CN} = -K\,\frac{1}{R'_H + R_{CN}} \quad \text{und} \tag{12}$$

$$\operatorname{tg} \psi_{CX} = -K\,\frac{1}{R'_H + R_{CX}}, \tag{13}$$

woraus für Winkel $\varepsilon < 3^0$ mit einem Fehler $< 1\,\%$ sich ergibt:

$$\operatorname{tg} \varepsilon \cong \operatorname{tg} \psi_{CX} - \operatorname{tg} \psi_{CN} = -K\left\{\frac{1}{R'_H + R_{CX}} - \frac{1}{R'_H + R_{CN}}\right\}. \tag{14}$$

Wie eingangs bemerkt, ist der Ausschlag am Instrument nach vorangegangener Kompensation des Fehlwinkels des Transformators proportional der Leistungsaufnahme von C_X. Um ihren Wert in Watt zu bestimmen, ist die Kenntnis des Uebersetzungsverhältnisses für jeden Belastungsfall notwendig. Die Erregerspannung (gleichzeitig die Speisespannung des Feldstromkreises des Wattmeters) wird mit einem elektrodynamischen Voltmeter gemessen, die Oberspannung, sofern der Transformator durch das Prüfobjekt nicht so belastet wird, dass ein merklicher Spannungsabfall auftritt, berechnet sich hinreichend genau aus Primärspannung und Uebersetzungsverhältnis für Leerlauf. Bei grösserer Belastung muss natürlich oberspannungsseitig gemessen werden (Kugelfunkenstrecke, statisches Voltmeter, oder Spannungswandler mit dynamometrischem Voltmeter).

Gleichung (6) ermöglicht ein Urteil über die Zulässigkeit der Verwendung des Dynamometers als Ausschlagsinstrument. Der Ausschlag α_{CX} bestimmt sich für den Strom I_{CX} nach Gleichung (6):

$$\alpha_{CX} T_t = T_1 + T_2 = k_1 (I_F\ I_{CX}) \left| \left\{ 1 - \frac{k_2}{k_1}\,\frac{j\omega L_{F,H}}{R'_H + R_{CN}} \right\} \right|.$$

Die Konstante k_1 erscheint um den absoluten Betrag des Ausdruckes in der geschweiften Klammer verkleinert. Es ist, ausführlich geschrieben:

$$\left| \left\{ 1 - \frac{k_2}{k_1}\,\frac{j\omega L_{F,H}}{R'_H + R_{CN}} \right\} \right| = \sqrt{1 + \left\{ \frac{k_2 \omega L_{F,H}}{k_1 (R'_H + R_{CN})} \right\}^2}.$$

Das Verhältnis der Wattmeterkonstanten ohne und mit Kompensierung des Fehlwinkels des Transformators orientiert über den zu erwartenden Messfehler; dieses Verhältnis lautet:

$$\frac{k_1}{k_1\sqrt{1+\left\{\frac{k_2}{k_1}\,\frac{\omega L_{F,H}}{(R'_H+R_{CN})}\right\}^2}}=\frac{1}{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\psi_{CN}}}=\underline{\cos\psi_{CN}}. \tag{15}$$

Da ψ_{CN} stets klein ist, so wird $\cos\psi_{CN}\sim 1$, d. h. der Fehler bei der Leistungsmessung, verursacht durch die Fehlwinkelkompensation, bleibt stets vernachlässigbar klein. Für die Richtigkeit der Messung ist aber auch erforderlich, dass:

$$\frac{k_2}{k_1}=\text{konstant} \tag{16}$$

für jeden möglichen Ausschlagswinkel. Diese Forderung ist durch entsprechende Anordnung der Wicklungen von Feld- und Hilfsspule leicht zu verwirklichen.

Schliesslich ist die Rückwirkung der stromdurchflossenen Hilfsspule auf die Impedanz des Feldstromzweiges zu beachten. Bezeichnet man mit Z'_F die Gesamtimpedanz des Feldstromzweiges ($Z'_F=R_F+R_a+j\omega L_F$) und mit E_F den Spannungsabfall im Feldstromzweig, so ist:

$$E_F=I_F Z'_F+j\omega L_{F,H} I_H \quad \text{und} \tag{17}$$

$$0=I_H Z'_H+j\omega L_{F,H} I_F \quad \text{woraus} \tag{18}$$

$$I_H=-\frac{j\omega L_{F,H} I_F}{Z'_H}$$

in Gleichung (16) eingesetzt:

$$E_F=I_F\left\{Z'_F+\frac{(\omega L_{F,H})^2}{Z'_H}\right\}.$$

Unter der Bedingung, dass $\frac{\omega L_{F,H}}{Z'_H}$ gegenüber Z'_F sehr klein ist, kann auch die Rückwirkung auf die Impedanz des Feldstromzweiges vernachlässigt werden.

Bei grösseren Prüfobjekten, z. B. langen Kabelstücken, darf I_{Cx} nicht mehr unverzweigt durch die Drehspule geschickt werden; es sind daher Nebenwiderstände vorzusehen, für welche zur Vermeidung zusätzlicher Messfehler besonders zu beachten ist:

1. Kompensation der Wirkung der Selbstinduktivität der Drehspule durch eine passende Kapazität C_M parallel zu einem Widerstand R_{CM}. (In gleicher Weise wie bei der Hilfsspule.)

2. Die Temperaturkoeffizienten von Drehspulzweig und Nebenwiderständen sollen möglichst gleich gross sein, um durch Temperaturänderungen keine zusätzlichen Fehler zu erhalten. Der in der Drehspule durch das Feld $\Phi_{F,H}$ induzierte Strom, der über den Nebenwiderstand fliessen kann, ist zufolge Bedingung (1) gegen $\Phi_{F,H}$ um genau $\frac{\pi}{2}$ phasenverschoben. Um jeglichen Einfluss elektrostatischer Natur zu verhindern, sind sämtliche stromführenden Teile und Leitungen abzuschirmen.

Zur weiteren Erläuterung seien nachstehend die Hauptdaten einer ausgeführten Messeinrichtung[4]) nach dem eben abgeleiteten Prinzip angegeben, wobei noch auf einige für den praktischen Gebrauch wichtige Einzelheiten hingewiesen sei:

[4]) Fabrikat der Firma Trüb, Täuber & Cie., Zürich.

a) Das elektrodynamische Wattmeter.

Feldwicklung:	Ohmscher Widerstand	= 480 Ohm bei 20° C
	Selbstinduktivität	= 0,636 H
Hilfswicklung:	Ohmscher Widerstand	= 99 Ohm bei 20° C
	Selbstinduktivität	= 0,029 H
Drehspule:	Ohmscher Widerstand	= 42 Ohm bei 20° C
	Selbstinduktivität	= 0,0025 H
	Gegeninduktivität zwischen Feldwicklung u. Hilfswicklung $L_{F,H}$	= 0,11 H

Verhältnis der elektrodynamischen Konstante von Hilfswicklung und Feldwicklung je mit der Drehspulwicklung:

$$\frac{k_2}{k_1} = 0{,}244$$

Skalateilung: 30 – 0 – 150 Teilstriche.

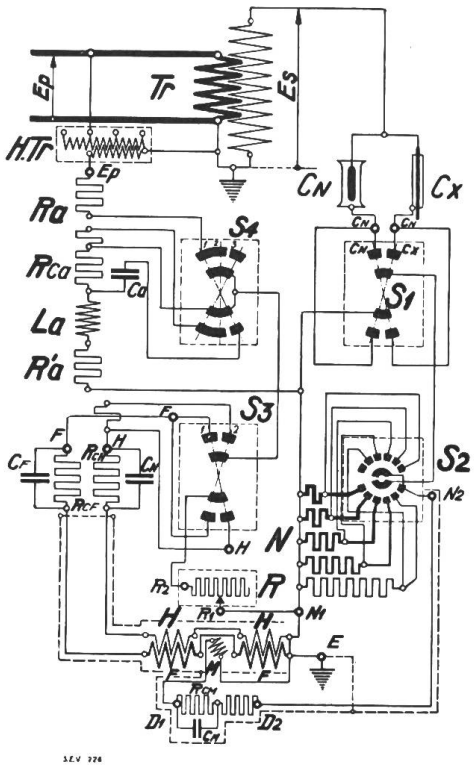

Fig. 3.

Bei aperiodischer Luftdämpfung beträgt die Einstelldauer für den halben Endwert ca. 12 Sekunden.

Aus Fig. 3, welche das vollständige innere Schaltungsschema darstellt, ist ersichtlich, dass die Induktivitäten aller Instrumentenwicklungen durch Kapazitäten – Kondensatoren mit abgestimmten Nebenwiderständen – kompensiert sind. Demzufolge waren bei gegebenen Kapazitätswerten von Papierkondensatoren folgende Nebenwiderstände notwendig:

Für die Feldwicklung:

$$R_{CF} = 457\,\Omega \text{ bei } C_F = 4{,}05\ \mu F$$

Für die Hilfswicklung:

$$R_{CH} = 119\,\Omega \text{ bei } C_H = 2{,}04\ \mu F$$

Für die Drehspulwicklung:

$$R_{CM} = 31{,}8\,\Omega \text{ bei } C_M = 1{,}96\ \mu F$$

Die Aenderungen der Kapazitätswerte mit der Temperatur verursachen keine merklichen zusätzlichen Fehler. Auch der Verlustwinkel dieser Kondensatoren, welcher verhältnismässig hoch ist, darf in der hier angewandten Schaltung unbedenklich in Kauf genommen werden. Diese Kompensationswiderstände und Kondensatoren sind im Instrumentenkasten eingebaut.

b) Nebenwiderstände.

Die mittelst Messbereichwähler S_2 ohne Stromunterbrechung einschaltbaren Nebenwiderstände sind bemessen für folgende Nennströme: 1,5; 4,5; 15; 45 und 150 mA. Dieselben besitzen bei den angegebenen Nennstromstärken einen Spannungsabfall von ca. 200 mV. Natürlich steht der Anwendung anderer Nebenwiderstände für höhere Stromstärken nichts im Wege.

c) Vorwiderstände zur Feldwicklung.

Dieselben sind bemessen für eine Nennspannung von $E_p = 200$ Volt. Es wurde schon auf die Notwendigkeit hingewiesen, den Strom in der Feldwicklung gegen die um 180° umgeklappte Sekundärspannung E_s voreilen zu lassen, da nur bei solcher Phasenlage eine Kompensation des Fehlwinkels des Versuchstransformators möglich ist. Diese künstliche Voreilung braucht jedoch nicht mehr als zwei

Winkelgrade zu betragen. Weist der Versuchstransformator an sich schon einen solchen Fehlwinkel auf, der die künstliche Verschiebung des Stromes in der Feldwicklung überflüssig macht, so kann diese wieder aufgehoben werden. Mit Hilfe des Schalters S_3 kann den Versuchsbedingungen entsprechend, die eine oder andere Schaltung ausgeführt werden. In Stellung „1" liegt zu einem Teilbetrag des der Feldwicklung vorgeschalteten Widerstandes R_{Ca} parallel die Kapazität C_a, wobei R_{Ca} so abgestimmt ist, dass der Feldstrom I_F in Phase ist mit der Spannung E_p. In Stellung „2" des Schalters S_3 wird die Kapazität C_a abgeschaltet und gleichzeitig auch ein solcher Widerstandsbetrag von R_{Ca}, dass der effektive ohmsche Widerstand des Feldstromzweiges wiederum derselbe ist wie bei Stellung „1". Die Selbstinduktivität L_a des Parallelzweiges zur Feldwicklung veranlasst nun eine Voreilung α des Stromes I_F, welche sich aus den Konstanten des gesamten Feldstromkreises nach folgender angenäherter Formel berechnen lässt:

$$\operatorname{tg}\alpha \cong -\frac{\omega L_a}{R_2\left(1 + R_2\dfrac{R_a + R_3}{R_a R_3}\right)} \tag{19}$$

wo R_2 und R_3 die effektiven ohmschen Widerstände der beiden Zweige und R_a den gemeinsamen Vorwiderstand bedeutet. In Stellung „3" wird der Feldstromkreis unterbrochen.

d) Die Messbereiche für den Verlustwinkel ε.

Nach Gleichung (12) findet man den grösstmöglichen Winkel ψ_{max}, welcher kompensiert werden kann, wenn der variable Widerstand R Null wird. Unter Berücksichtigung des ohmschen Widerstandes der Hilfswicklung und des Widerstandes R_{CH} von zusammen 218 Ohm bei 50periodigem Wechselstrom ist:

$$\operatorname{tg}\psi_{max} = 0{,}244\,\frac{314 \cdot 0{,}11}{218} = 0{,}0387$$

woraus $$\psi_{max} = 2^0 12'.$$

Aendert also der Widerstand R seinen Wert zwischen Unendlich und Null, so verschiebt sich das resultierende Feld $\Phi_{F,H}$ um $2^0 12'$. Einen zweiten, grösseren Messbereich erhält man nach Vertauschung der Feldwicklung mit der Hilfswicklung. In Gleichung (12) tritt alsdann an Stelle des Faktors $\frac{k_2}{k_1} = 0{,}244$, dessen reziproker Wert $\frac{k_1}{k_2} = 4{,}1$. Man erhält somit für $\operatorname{tg}\psi_{max}$, wenn $R_F + R_{CF} = 937\,\Omega$:

$$\operatorname{tg}\psi_{max} = 4{,}1\,\frac{314 \cdot 0{,}11}{937} = 0{,}152$$

woraus $$\psi_{max} = 8^0 37'.$$

Dieser Messbereich wird in allen vorkommenden Fällen genügen. Mittelst Umschalter S_4 kann vom einen zum anderen Messbereich übergegangen werden.

Der Vorwiderstand zur Feldwicklung und der variable Widerstand R, sowie die 4 Umschalter sind in einem besonderen Kasten eingebaut (siehe Fig. 4). Der variable Widerstand selbst ist auf einen dünnen, zylindrisch gebogenen Träger gewickelt. Mit einem isolierten Griff kann jeder beliebige zwischen Null und ca. 4000 Ohm liegende Wert ein-

Fig. 4.

gestellt werden. Ueber dem Widerstand selbst befindet sich eine in Winkelgrade geteilte Doppelskala so, dass, extreme Fälle ausgenommen, die Bestimmung des Verlustwinkels sich auf eine einfache Subtraktion der beiden Einstellwerte ψ_{Cx} und ψ_{CN} beschränkt. Fig. 5 stellt das Anzeigeinstrument dar, welches in einen bei tragbaren Laboratoriumsinstrumenten üblichen Holzkasten eingebaut ist.

e) Die Messempfindlichkeit.

Dieselbe ist proportional dem Ladestrom des Luftkondensators und auch der Speisespannung. Ist beispielsweise der Ladestrom 0,6 Milliampere, die Speisespannung 200 Volt, gleich dem Nennwert des Spannungs-Messbereiches, so kann ein Winkelbetrag von $\pm 2'$, welcher einem Zeigerausschlag von $\pm$ 0,1 Teilstrich entspricht, noch mit Sicherheit erkannt werden. Um die Empfindlichkeit auch bei niedrigeren Speisespannungen als 200 Volt tunlichst hoch zu halten, ist ein kleiner Hilfstransformator (*H Tr* in Fig. 3) vorgesehen mit einer genügenden Anzahl Abzweigungen auf der Primärseite, so dass es in allen vorkommenden Fällen möglich sein wird, den Feldstromkreis mit einer nicht wesentlich unter 200 Volt liegenden Spannung zu speisen.

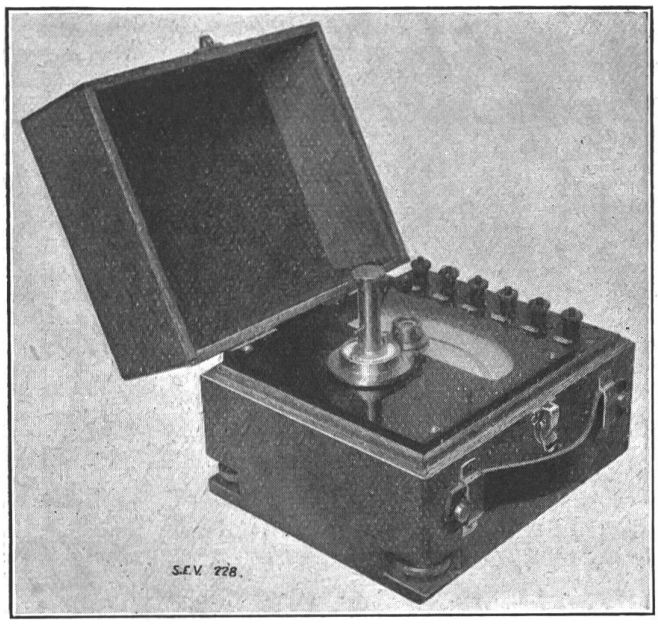

Fig. 5.

Die Messgenauigkeit selbst ist, wie bei allen Methoden die demselben Zwecke dienen, abhängig von der Konstanz der Speisespannung und zu einem gewissen Teil auch von Kurvenverzerrungen, welche namentlich bei hochgesättigten Transformatoren in der Sekundärspannung in Erscheinung treten und dann irreführende Resultate zeitigen, wenn gleichzeitig auch die primäre Speisespannung verzerrt ist. Ist letztere dagegen praktisch sinusförmig, so sind auch diese Fehler geringfügig, weil die nur oberspannungsseitig auftretenden höheren Harmonischen dynamometrisch wirkungslos bleiben.

Ein Hauptvorzug der beschriebenen Messmethode dürfte in der Verwendung einfacher ohmscher Widerstände liegen unter Zugrundelegung der Konstanten eines elektrodynamischen eisenfreien Instrumentes, deren zeitliche Unveränderlichkeit auch hier eine sehr weitgehende ist.

Zum Schluss soll noch darauf hingewiesen werden, dass elektrodynamische Instrumente nach der oben beschriebenen Art auch bei anderen Wechselstrommessungen, wo kleine zeitliche Verschiebungswinkel gemessen werden sollen, mit Vorteil angewendet werden können.