Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 13 (1922)

Heft: 6

Artikel: Ein Beitrag zur Messung der Wicklungstemperatur an elektrischen Maschinen und Apparaten

Autor: Täuber-Gretler, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058297

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Erscheint monatlich,
im Januar dazu die Beilage „Jahresheft".

Alle den **Inhalt** des „Bulletin" betreffenden Zuschriften sind zu richten an das

Generalsekretariat
des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins
Seefeldstrasse 301, Zürich 8 — Telephon: Hottingen 7320,
welches die Redaktion besorgt.

Alle Zuschriften betreffend **Abonnement, Expedition** und **Inserate** sind zu richten an den Verlag:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.
Stauffacherquai 36/38 Zürich 4 Telephon Selnau 7016

Ce bulletin paraît mensuellement. — „L'Annuaire" est distribué comme supplément dans le courant de janvier.

Prière d'adresser toutes les communications concernant la **matière** du „Bulletin" au

Secrétariat général
de l'Association Suisse des Electriciens
Seefeldstrasse 301, Zurich 8 — Telephon: Hottingen 7320
qui s'occupe de la rédaction.

Toutes les correspondances concernant les **abonnements, l'expédition** et les **annonces,** doivent être adressées à l'éditeur

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A.
Stauffacherquai 36/38 Zurich 4 Téléphone Selnau 7016

Abonnementspreis (für Mitglieder des S. E. V. gratis)
für Nichtmitglieder inklusive Jahresheft:
Schweiz Fr. 20.—, Ausland Fr. 25.—
Einzelne Nummern vom Verlage Fr. 2.— plus Porto.

Prix de l'abonnement annuel (gratuit pour les membres de l'A. S. E.), y compris l'Annuaire Fr. 20.—
pour la Suisse, Fr. 25.— pour l'étranger.
L'éditeur fournit des numéros isolés à Fr. 2.—, port en plus.

XIII. Jahrgang
XIIIe Année

Bulletin No. 6

Juni
Juin 1922

Ein Beitrag zur Messung der Wicklungstemperatur an elektrischen Maschinen und Apparaten.

Von dipl. Ing. *A. Täuber-Gretler,* Männedorf.

Der ständigen Kontrolle der Wicklungstemperaturen von im Betriebe befindlichen elektrischen Maschinen und Apparaten wurde in den letzten Jahren eine vermehrte Bedeutung beigemessen. Der Umstand, dass in den meisten Fällen in den Wicklungen, also gerade im empfindlichsten Teile, die höchsten Temperaturanstiege zu erwarten sind, erfordert, dass in erster Linie hier Temperatur-Messtellen vorzusehen sind, wenn man das thermische Verhalten einer Maschine oder eines Transformators während des Betriebs verfolgen will.

In Ermangelung einer geeigneten Messeinrichtung hatte man sich früher damit begnügen müssen, etwa die Temperatur im Statoreisen von Generatoren und im Oel von Transformatoren zu messen, um sich daraus ein Urteil zu bilden über den Erwärmungszustand in den betreffenden Wicklungen. Der Nutzen, den dies für eine rationelle Ausnützung der Leistungsfähigkeit brachte, war jedoch nur ein beschränkter, indem die gemessenen Temperaturen infolge der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Isoliermaterials und der thermischen Trägheit der Metallmassen kein Urteil zuliessen über die Grössenordnung der jeweiligen Wicklungstemperaturen.

Die direkte Messung der Wicklungstemperatur wird erschwert durch die Notwendigkeit, das Uebertreten der Betriebsspannung auf die Temperaturmesseinrichtung zu verhindern. Flüssigkeits- oder Gasthermometer lassen sich in besondern Fällen wohl verwenden, etwa in der Weise, dass das Gefäss mit dem expandierenden Medium zwischen zwei Windungen der äussern Wicklung eines Transformators eingebaut und das Anzeigeinstrument auf einem Durchführungsisolator montiert wird, um aus sicherer Entfernung abgelesen zu werden. Eine derartige Anordnung ist von der Firma Brown Boveri & Co., Baden, angegeben worden.[1])

[1]) Siehe z. B. das Franz. Pat. Nr. 528584 vom 14. Dez. 1920.

Da in der Regel die Fernmeldung der zu messenden Temperatur erwünscht ist, so lag es nahe, das elektrische Widerstandsthermometer, welches sich seit Jahren für technische Messungen bewährt hat, ebenfalls zur Messung von Wicklungstemperaturen zu verwenden. Um dasselbe für den vorliegenden Zweck brauchbar zu machen, war erforderlich, die Messeinrichtung in einwandfreier Weise vor dem Uebertritt der Spannung in der Wicklung zu schützen, ohne damit die Zuverlässigkeit der Messung in Frage zu stellen.

Eine grundsätzlich gute Lösung wurde zuerst von der General Electric Co., Schenectady veröffentlicht.[1]) Die beschriebene Messeinrichtung gründet sich auf das Widerstandsthermometer in der Brückenschaltung, mit dem Unterschied, dass zu dessen Speisung Wechselstrom statt Gleichstrom verwendet wird und dass das Messelement nicht direkt einen Zweig der Brücke bildet, sondern über einen kleinen Transformator an diese angeschlossen wird. Der Transformator ist hinsichtlich Isolation der Betriebsspannung angepasst und hat somit den Zweck, die Messeinrichtung gegen das Uebertreten derselben zu schützen.

Ein ähnliches Widerstandsthermometer mit einem derartigen Schutztransformator hat auch die Firma Siemens & Halske, Berlin, ausgebildet.[2]) Das Instrument ist nach der Differentialmethode geschaltet, welche dem Brugerschen Kreuzspul-Ohmmeter zugrunde liegt.

Die zweiterwähnte Messeinrichtung zeichnet sich durch die Unabhängigkeit von Aenderungen der Speisespannung, sowie durch erheblich geringern Effektverbrauch im Messelement aus.

Die Firma Trüb, Täuber & Co., Zürich, hat in den letzten Jahren ebenfalls ein Widerstandsthermometer durchgebildet, welches auf der Brückenschaltung unter Verwendung eines Schutztransformators beruht. Die praktische Ausführung begegnete verschiedenen Schwierigkeiten, welche messtechnisch interessante Probleme darstellten, so dass es sich rechtfertigen dürfte, hierüber ins Einzelne gehend zu berichten.

Für die Wahl der Messmethode im allgemeinen und des Anzeigeinstruments im besondern waren die nachfolgend aufgeführten Anforderungen massgebend, die an eine derartige Messeinrichtung gestellt werden müssen.

1. Das Anzeigeinstrument muss zuverlässig sein; es soll ein hinreichendes Drehmoment aufweisen, um als technisches Instrument gelten zu können. Die zu messenden Temperaturen sollen ohne zeitliche Verzögerung richtig gemessen werden können.

2. Die Messmethode soll so empfindlich sein, dass der Skalenbereich nicht mehr als 120—150° Celsius zu umfassen braucht.

3. Der Effektverbrauch im Messelement soll tunlichst niedrig gehalten werden, damit die Abmessungen desselben so klein gewählt werden können, dass der Einbau des Elements auch in schmale Nuten möglich ist, ohne dabei eine merkliche Eigenerwärmung mit in den Kauf nehmen zu müssen.

4. Die Messresultate sollen unabhängig sein von Schwankungen der Speisespannung und deren Periodenzahl, wie sie in Zentralen etwa vorkommen.

5. Aenderungen der Raumtemperatur dürfen sowohl die Konstante des Instruments als auch den Zustand der Brücke nicht beeinflussen.

6. Der Schutztransformator (der in der Regel in unmittelbarer Nähe der Maschine oder des Transformators aufgestellt wird) soll durch Streufelder und durch stromführende Leitungen nicht derart beeinflusst werden, dass dadurch die Messresultate gefälscht werden.

Um namentlich den Bedingungen *1—3* zu genügen, musste ein Instrument mit eisengeschlossenem Kraftlinienweg und separater Felderregung vorgesehen werden.

---

[1]) Montsinger and Childs, Temperature Indicator for Transformer Windings, General Electric Review. Vol. XXI., Juni 1918.

[2]) Keinath, Temperatur-Ueberwachung in Kraftwerken E. T. Z. 1921, H. 18, S. 459.

In Fig. 1 ist das Prinzipschema dargestellt, nach welchem die Messeinrichtung ausgeführt wird. Zwei der vier Zweige, welche die Wechselstrombrücke bilden, bestehen aus den beiden sekundären Wicklungshälften B_1 und B_2 eines kleinen Transformators (wir wollen ihn Brückentransformator nennen), dessen primäre Wicklung von einer Wechselspannung von beispielsweise 110 Volt bei 50 Perioden pro Sekunde gespeist werde. Die beiden andern Zweige werden aus dem Schutztransformator T und der Drosselspule S gebildet. Beide besitzen eine Sekundärwicklung. An diejenige des Schutztransformators ist das Messelement M, ein induktionsfreier Widerstand, angeschlossen, währenddem die Sekundärwicklung der Drosselspule mit einem ebenfalls induktionsfreien Widerstand R_2 aus einem Material mit verschwindend kleinem Temperaturkoeffizienten verbunden ist. Das Anzeigeinstrument ist ein Wechselstrom-Drehspulgalvanometer nach der Art wie sie H. Abraham, Paris, beschrieben hat.[1]) Da sich über die Wirkungsweise dieser Gattung von Instrumenten in der Literatur nur kurze Mitteilungen finden, welche zudem wenig bekannt sind, so soll in den nachfolgenden theoretischen Betrachtungen auch hierauf näher eingetreten werden. Wir untersuchen zunächst das Verhalten der Brücke, wenn sich der Widerstand des Messelements M ändert. Jede Zu- oder Abnahme desselben beeinflusst die Gesamtimpedanz des Schutztransformators, während die Impedanzen der übrigen Zweige der Brücke in erster Annäherung als konstant angesehen werden können.

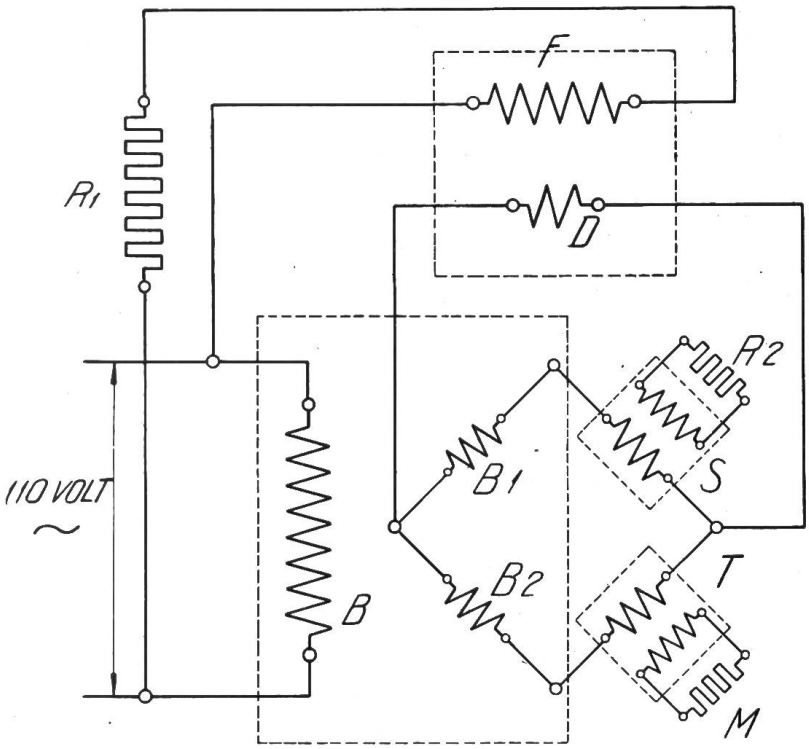

Fig. 1

F = Feldwicklung } des Anzeige-Instrumentes,
D = Drehspule }
B = Brückentransformator,
B_1 u. B_2 = Sekundäre Wicklungshälften des Brückentransformators,
R_1 = Vorschaltwiderstand,
T = Schutztransformator,
S = Drosselspule,
R_2 = Widerstand für die Abstimmung der Brücke,
M = Messelement.

Die Messung der Temperatur beruht also auf der Beobachtung einer mit dieser sich ändernden Impedanz.

Das Anzeigeinstrument, bestehend aus der Drehspule D und der über den Vorschaltwiderstand R_1 direkt an die Speisespannung angeschlossenen Feldwicklung F, sei vorerst abgeschaltet. Um die Potentialdifferenz zwischen den Endpunkten der Brückendiagonale in Funktion der Sekundärspannung des Brückentransformators und der Impedanzen des Schutztransformators und der Drosselspule darzustellen, gehen wir aus vom Potentialdiagramm der Brücke.

In Fig. 2 bedeuten $\overline{AO}$ und $\overline{OB}$ die Spannungen der sekundären Wicklungshälften des Brückentransformators. Sie sind in Phase und Grösse einander gleich.

[1]) H. Abraham, Principe de nouveaux appareils à courants alternatifs, Journal de physique, 5me série, Tome I, p. 264, 1911.

$\overline{AC}$ und $\overline{CB}$ seien die Spannungsabfälle des Schutztransformators bezw. der Drosselspule. Dieselben sind im allgemeinen in Phase und Grösse von einander verschieden. Die Strecke $\overline{CO}$ stellt demnach die Potentialdifferenz in der Brückendiagonale dar.

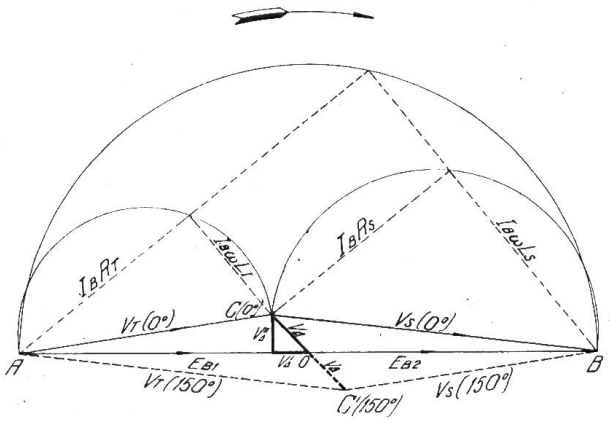

Fig. 2

Aendert sich die Impedanz des Schutztransformators, so verschiebt sich auch die Lage des Punktes C. Die Brücke sei so abgestimmt, dass für eine bestimmte Temperatur innerhalb der in Betracht fallenden Grenzwerte die beiden Impedanzen einander gleich werden; dann geht die Kurve, auf welcher sich C bewegt, durch O. Der Punkt C entspreche dem untern Grenzwert, z. B. 0^0 Celsius, der Punkt C' dem obern, z. B. 150^0 Celsius des Messbereiches.

Es mögen nunmehr bedeuten:

$E_{B1} = E_{B2} = E_B$ die Spannung je einer sekundären Wicklungshälfte des Brückentransformators,

V_T der Spannungsabfall des Schutztransformators,

V_T^I die Komponente von V_T in Richtung von E_B,

V_T^{II} die Komponente von V_T senkrecht zu E_B,

V_S der Spannungsabfall der Drosselspule,

V_Δ die Potentialdifferenz in der Brückendiagonale,

V_Δ^I die Komponente von V_Δ in Richtung von E_B,

V_Δ^{II} die Komponente von V_Δ senkrecht zu E_B,

R_T und L_T der Verlustwiderstand bezw. der Selbstinduktionskoeffizient des Schutztransformators,

R_S und L_S der Verlustwiderstand bezw. der Selbstinduktionskoeffizient der Drosselspule,

I_B der Brückenstrom,

$\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz,

$j = \sqrt{-1}$

In symbolischer Schreibweise ist dann: $V_T = I_B (R_T + j\omega L_T)$ wobei

$$I_B = \frac{2 E_B}{(R_T + R_S) + j\omega (L_T + L_S)} \quad \text{somit} \quad V_T = 2 E_B \frac{R_T + j\omega L_T}{(R_T + R_S) + j\omega (L_T + L_S)}$$

Reelle und imaginäre Glieder getrennt,

$$V_T^I = 2 E_B \frac{R_T (R_T + R_S) + \omega^2 L_T (L_T + L_S)}{(R_T + R_S)^2 + \omega^2 (L_T + L_S)^2} \quad \text{und} \tag{1}$$

$$V_T^{II} = 2 E_B \frac{\omega [L_T (R_T + R_S) - R_T (L_T + L_S)]}{(R_T + R_S)^2 + \omega^2 (L_T + L_S)^2} \tag{2}$$

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass

$$V_\Delta^I = E_B - V_T^I \quad \text{und} \quad V_\Delta^{II} = V_T^{II} \quad \text{also} \quad V_\Delta = (E_B - V_T^I) + j V_T^{II}$$

Die Werte von (1) und (2) darin eingesetzt ergibt

$$V_{\Delta} = 2\,E_B \left\{ \frac{1}{2} - \frac{R_T(R_T + R_S) + \omega^2 L_T (L_T + L_S)}{(R_T + R_S)^2 + \omega^2 (L_T + L_S)^2} + j\,\omega\, \frac{L_T(R_T + R_S) - R_T(L_T + L_S)}{(R_T + R_S)^2 + \omega^2 (L_T + L_S)^2} \right\} \tag{3}$$

Aus der Struktur dieses Ausdruckes lässt sich zunächst erkennen, dass V_{Δ} um so grösser wird, je ungleicher R_T und R_S bezw. L_T und L_S sind. Im besondern wird $V_{\Delta} = 0$ wenn $R_T = R_S$ und $L_T = L_S$. Um sich ein vollständigeres Bild über den Einfluss einer Aenderung des Widerstandes des Messelementes auf die Potentialdifferenz V_{Δ} machen zu können, werden R_T und L_T in Funktion des Messelement-Widerstandes R_M ausgedrückt.

Der Verlustwiderstand R_T setzt sich zusammen aus einem den Eisenverlusten äquivalenten Teilbetrag R_{Fe}, dem Widerstand der primären Wicklung R_{Cu} und einem von R_M abhängigen Restbetrag, den wir einstweilen als $f_1(R_M)$ einführen. Das analoge gilt für die Zusammensetzung des Selbstinduktionskoeffizienten L_T. Wir können denselben definieren als Summe zweier Glieder L_0 und $f_2(R_M)$. Demnach ist:

$$R_T = R_{Fe} + R_{Cu} + f_1(R_M) \quad \text{und} \tag{4}$$

$$L_T = L_1 + f_2(R_M) \tag{5}$$

Da V_T verschiedene Werte annehmen kann, so wird auch die Induktion im Eisenkern variieren und R_{Fe} sowohl als L_1 sind strenggenommen keine konstanten Grössen. Es handelt sich jedoch bei dem in Betracht gezogenen Messbereich um sehr kleine Aenderungen von V_T und der zugehörigen Induktionen, so dass wir diese Ungenauigkeit im Interesse einer klareren Uebersicht bestehen lassen dürfen. Aus demselben Grunde wollen wir auch vom Einfluss der Streuung absehen. Wir gehen aus von den allgemeinen Zustandsgleichungen des Transformators *I*, welche in symbolischer Schreibweise lauten:

$$V_T = J_B (R_{Fe} + R_{Cu} + j\,\omega\, L_1) + j J_M\, \omega\, M_T \tag{6}$$

$$-j\, J_B\, \omega\, M_T = J_M (R_2 + R_M + j\,\omega\, L_2) \tag{7}$$

Im Diagramm Fig. 3 sind diese Beziehungen graphisch erläutert. Es bedeuten:

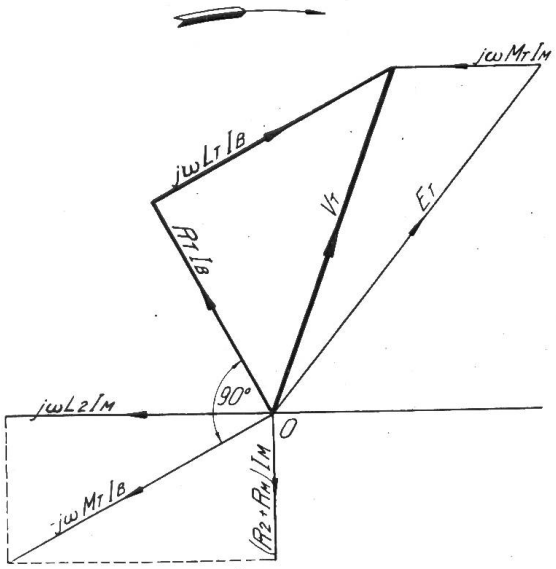

Fig. 3

J_M der Strom im Messelement,

L_1 der Selbstinduktionskoeffizient der Primärwicklung,

R_2 der ohmsche Widerstand der Sekundärwicklung,

L_2 der Selbstinduktionskoeffizient der Sekundärwicklung und

M_T der Koeffizient der gegenseitigen Induktion.

Aus Gleichung (6) werde J_M eliminiert:

$$J_M = \frac{-j\, J_B\, \omega\, M_T}{R_2 + R_M + j\,\omega\, L_2}$$

im zweiten Glied von (6) eingesetzt:

$$j\, J_M\, \omega\, M_T = \frac{J_B\, (\omega\, M_T)^2}{R_2 + R_M + j\,\omega\, L_2}$$

$$= J_B \left\{ \frac{(R_2 + R_M)\,(\omega\, M_T)^2}{(R_2 + R_M)^2 + (\omega\, L_2)^2} - j\, \frac{(\omega\, M_T)^2\, \omega\, L_2}{(R_2 + R_M)^2 + (\omega\, L_2)^2} \right\}$$

und schliesslich

$$V_T = J_B \left\{ R_{Fe} + R_{Cu} + \frac{(R_2 + R_M)(\omega M_T)^2}{(R_2 + R_M)^2 + (\omega L_2)^2} + j \left[\omega L_1 - \frac{(\omega M_T)^2 \omega L_2}{(R_2 + R_M)^2 + (\omega L_2)^2} \right] \right\} \quad (8)$$

folglich werden

$$R_T = R_{Fe} + R_{Cu} + \frac{(R_2 + R_M)(\omega M_T)^2}{(R_2 + R_M)^2 + (\omega L_2)^2} \quad \text{und} \quad (9)$$

$$L_T = L_1 - \frac{(\omega M_T)^2 L_2}{(R_2 + R_M)^2 + (\omega L_2)^2} \quad (10)$$

Aus Gleichung (9) und (10) ist ersichtlich, dass der Einfluss von R_M auf R_T um so grösser wird, je weniger die primären Verlustwiderstände R_{Fe} und R_{Cu} ins Gewicht fallen und je kleiner die Reaktanz ωL_2 gegenüber dem Widerstand R_M ist. R_2 kann ohne Schwierigkeit so niedrig gewählt werden, dass er nur einen Bruchteil von einigen Prozenten von R_M ausmacht. Dagegen wird R_{Fe} selbst bei Verwendung von hochlegiertem Blech und sorgfältigster Herstellung des Kerns nicht unter gewisse Beträge reduziert werden können, welche hauptsächlich bestimmt werden durch die Induktion und die für die Isolation erforderlichen Abmessungen.

Die Verwendung eines Schutztransformators vermindert somit die Empfindlichkeit der Messeinrichtung und veranlasst dadurch den Effektverbrauch im Messelement entsprechend höher zu wählen.

Wir gehen nun dazu über das Zusammenwirken des Anzeigeinstruments mit der Brücke zu untersuchen. Es sei vorausgeschickt, dass das bewegliche System keinen nennenswerten mechanischen Richtkräften unterworfen ist. (Das von den beiden Stromzuführungsbändchen ausgeübte Drehmoment ist ausserordentlich gering und kann vernachlässigt werden.) Es weist daher im stromlosen Zustande keine bestimmte Ruhelage auf. Der Zeiger steht senkrecht zur Ebene der Drehspule, dieselbe hat die Richtung der Feldkraftlinien wenn der Zeiger über der Skalenmitte steht.

Um den Rechnungsgang einfach zu gestalten soll angenommen werden, dass sich V_Δ durch das Anschliessen der Drehspule nicht ändere.

Wir bezeichnen mit:

R_B und L_B den Widerstand und den Selbstinduktionskoeffizienten der Brücke bezogen auf die Endpunkte der Brückendiagonale,

M_D den Koeffizienten der gegenseitigen Induktion zwischen Feld und Drehspule bezogen auf die Lage, in welcher die Ebene der Drehspule senkrecht steht zur Richtung der Feldkraftlinien,

R_F und L_F den Widerstand und den Selbstinduktionskoeffizienten des Feldstromkreises,

I_F den Strom in der Feldwicklung,

Φ_F den wirksamen magnetischen Kraftfluss,

φ_F den Phasenverschiebungswinkel zwischen I_F und E_B,

V_Δ^{III} die Komponente von V_Δ in Richtung von I_F,

V_Δ^{IV} die Komponente von V_Δ senkrecht zu I_F,

I_D den Strom in der Drehspule,

I_D^{I} die Komponente von I_F in Richtung von I_F,

I_D^{II} die Komponente von I_F senkrecht zu I_F.

Die Zahl der die Drehspule durchsetzenden Feldkraftlinien ist für den in Betracht fallenden Ausschlagsbereich proportional dem Winkel α den die Spulenebene mit

deren Richtung einschliesst. (Die Drehspule bewegt sich in einem gleichförmigen Luftspalt.) Ist $a = 0$ so wird M_D ebenfalls zu Null. $M_D \cdot a$ ist somit der dem Ablenkungswinkel a zugehörige Koeffizient der gegenseitigen Induktion.

Die in der Drehspule induzierte EMK ist dann:

$$E_D = \pm \omega M_D a \cdot \Phi_F \tag{11}$$

E_D wechselt das Vorzeichen beim Durchgang der Drehspule durch die Mittellage.

An den Endpunkten der Brückendiagonale wirken jetzt die Potentialdifferenz V_Δ und die EMK der Drehspule E_D, welche im allgemeinen nach Grösse und Phase von einander verschieden sind. Sie bilden eine resultierende Spannung E_R, welche den Strom I_D verursacht. (Siehe das Diagramm Fig. 4)

Für eine beliebige Lage der Drehspule wird

$$I_D = \frac{V_\Delta^{III} + j\,(V_\Delta^{IV} - \omega M_D a \Phi_F)}{R_B + j\,\omega L_B}$$

oder, nach Trennung der reellen und imaginären Glieder

$$I_D = \frac{R_B V_\Delta^{III} + \omega L_B V_\Delta^{IV} - \omega^2 M_D a L_B \Phi_F + j\,(R_B V_\Delta^{IV} - \omega L_B V_\Delta^{III} - R_B \omega M_D a \Phi_F)}{R_B^2 + \omega^2 L_B^2} \tag{12}$$

worin

$$V_\Delta^{III} = V_\Delta^{I} \cos \varphi_F - V_\Delta^{II} \sin \varphi_F \qquad \text{und} \qquad V_\Delta^{IV} = V_\Delta^{II} \cos \varphi_F + V_\Delta^{I} \sin \varphi_F$$

Die elektrodynamische Kraftwirkung wird dann zu Null wenn I_D^I, die Stromkomponente in Richtung von I_F verschwindet. Aus dieser Bedingung leitet sich die Grösse des jeweiligen Ablenkungswinkels a ab. Es gilt somit die Gleichgewichtsbedingung

$$R_B V_\Delta^{III} + \omega L_B V_\Delta^{IV} - \omega^2 M_D a L_B \Phi_F = 0 \tag{13}$$

aus welcher folgt

$$a = \frac{R_B V_\Delta^{III} + \omega L_B V_\Delta^{IV}}{\omega^2 M_D L_B \Phi_F} \tag{14}$$

$$a = \frac{(R_B V_\Delta^{I} + \omega L_B V_\Delta^{II}) \cos \varphi_F + (\omega L_B V_\Delta^{I} - R_B V_\Delta^{II}) \sin \varphi_F}{\omega^2 M_D L_B \Phi_F} \tag{14a}$$

Aus dem Diagramm Fig. 4 ist ohne weiteres ersichtlich, dass der Ausschlag solange zunehmen muss, bis E_R eine solche Lage und Grösse hat, dass der dadurch bedingte Strom I_D senkrecht steht zur Feldrichtung. Jede Ablenkung des beweglichen Systems aus dieser Lage, etwa durch eine äussere mechanische Kraft, verändert Grösse und Phase von E_R, so dass eine von Null verschiedene Stromkomponente I_D^I auftritt. Diese Komponente bildet mit Φ_F ein Drehmoment, welches das Bestreben hat, das bewegliche System in die vorige Gleichgewichtslage zurückzuführen. Aendert sich der Zustand in der Brücke, so nehmen V_Δ^{III} und V_Δ^{IV} entsprechende Werte an und der Winkel a nimmt, wie aus (14) hervorgeht, zu oder ab. Befindet sich die Brücke im Gleichgewicht, so dass $V_\Delta^{III} = V_\Delta^{IV} = 0$ so wird auch $a = 0$, das bewegliche System geht in die Mittellage zurück. Aendert V_Δ das Vorzeichen, so erfolgt die Ablenkung, bezogen auf die Mittellage, nach der entgegengesetzten Seite. Die

Empfindlichkeit bei gegebenem V_Δ wird um so grösser je kleiner der Kraftfluss im Feld ist. Man hat es also bequem in der Hand, durch Verändern des Vorschaltwiderstandes R_1 die erforderliche Empfindlichkeit einzustellen. Mitbestimmend sind jedoch auch die Faktoren, welche im Zähler enthalten sind. Man wird durch geeignete Wahl der Konstanten der Brückenzweige und der Drehspule von vorneherein hierauf Bedacht zu nehmen haben. Wie aus (14*a*) ersichtlich ist, spielt dabei auch der Phasenwinkel φ_F eine wesentliche Rolle.

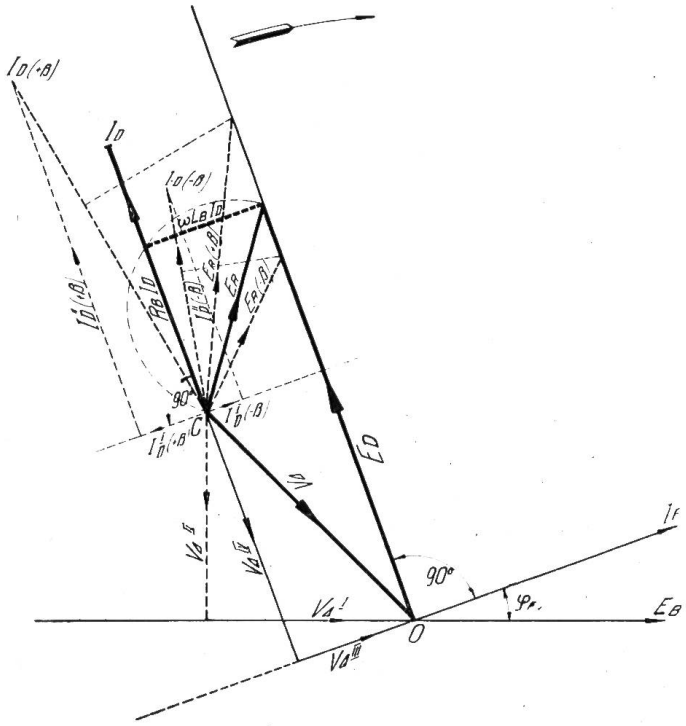

Fig. 4

Von besonderem Interesse sind zwei Grenzfälle, auf die noch hingewiesen sei.

Da L_B in (14) im Nenner enthalten ist und es möglich ist, etwa durch Anwendung einer passenden Kapazität L_B zu Null zu machen, so entsteht die Frage nach dem Verhalten des Instruments wenn $L_B = 0$, denn dann verliert der Ausdruck (14) seine mathematische Bedeutung. Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass in diesem Falle I_D in Phase mit E_R ist. Ist E_R um einen von 90° verschiedenen Winkel gegen I_F verschoben, so kann die Komponente I_D^I bei keiner Lage des beweglichen Systems zu Null werden. Es bleibt somit ein Drehmoment bestehen, welches die Drehspule so lange zu drehen sucht, bis bewegliches und festes Feld dieselbe Richtung haben. Das Instrument verliert seine charakteristische Eigenschaft und verhält sich wie ein gewöhnliches Elektrodynamometer. Steht im besonderen E_R senkrecht auf I_F, so wird allerdings das Drehmoment zu Null und zwar für jede Lage der Drehspule; das Gleichgewicht wird somit indifferent.

Der zweite Grenzfall tritt ein, wenn $V_\Delta^{III} = 0$, d. h. wenn V_Δ gegenüber I_F um 90° phasenverschoben ist. Setzen wir den Ausdruck (14) für a in (12) ein, so erhalten wir:

$$I_D^{II} = \frac{R_B V_\Delta^{IV} - \omega L_B V_\Delta^{III} - \frac{R_B}{\omega L_B}(R_B V_\Delta^{III} + \omega L_B V_\Delta^{IV})}{R_B^2 + \omega^2 L_B^2} \tag{15}$$

woraus für $V_\Delta^{III} = 0$ folgt:

$$I_D^{II} = 0 \tag{16}$$

Die Drehspule ist in jeder Gleichgewichtslage stromlos, V_Δ wird durch E_D kompensiert.

Für die praktische Bewertung des Instruments bleibt noch dessen Drehmoment zu untersuchen. Ist K_1 die Konstante des Instruments, so ist das Drehmoment

$$\mathfrak{M} = K_1 I_D^I \Phi_F = K_1 \Phi_F (R_B V_\Delta^{III} + \omega L_B V_\Delta^{IV} - \omega^2 M_D a L_B \Phi_F) \tag{17}$$

Denkt man sich das bewegliche System aus seiner Gleichgewichtslage um den Winkel β abgelenkt, so kann die Drehmomentgleichung wie folgt geschrieben werden:

Es ist zunächst für die Gleichgewichtslage nach (13)

$$R_B V_\Delta^{III} + \omega L_B V_\Delta^{IV} = \omega^2 M_D a L_B \Phi_F$$

Dieser Ausdruck ist für ein und denselben Zustand der Brücke konstant. Der totale Ablenkungswinkel aus der Mittellage ist nun $a \pm \beta$. (Die beiden Vorzeichen vor β bedeuten, dass das bewegliche System in gleicher oder entgegengesetzter Richtung wie der Ausschlag a erfolgte, abgelenkt werden kann. Somit wird:

$$\mathfrak{M} = \pm K_1 \omega^2 M_D L_B \Phi_F^2 \beta$$

oder, wenn wir in die Konstante K auch $\omega^2 M_D L_B$ einbeziehen:

$$\mathfrak{M} = \pm K \Phi_F^2 \beta \tag{18}$$

d. h. bei gegebenem Ablenkungswinkel β ist das Drehmoment proportional dem Quadrat der Induktion im Feld. Dagegen ist die Empfindlichkeit, wie oben gezeigt wurde Φ_F umgekehrt proportional. Wir können also dieselbe nicht beliebig steigern, ohne das Drehmoment in unzulässiger Weise zu schwächen.

Der Einfluss von Aenderungen der Speisespannung und deren Periodenzahl auf die Angaben des Instrumentes lässt sich analytisch nicht übersichtlich darstellen. Unter Berücksichtigung des Umstandes, dass die Brückenzweige Eisen enthalten, ist zu ersehen, dass sowohl bei Spannungs- als Periodenänderungen die Verlustwiderstände und Reaktanzen nicht konstant sind. Diese ändern sich vielmehr nicht linear mit der Induktion im Eisen. Durch zweckmässig gewählte Induktionen im Schutztransformator und in der Drosselspule, kann eine für alle praktisch vorkommenden Verhältnisse vollauf genügende Unempfindlichkeit gegen solche Aenderungen erzielt werden. Von besonderer Bedeutung ist dabei, dass Schutztransformator und Drosselspule genau gleich beschaffene Eisenkerne und Wicklungen besitzen.

Von den äusseren Einflüssen, die das Messresultat fälschen können, sei in erster Linie die Raumtemperatur erwähnt. Da das Kupfer der Wicklungen seinen Widerstand mit der Temperatur stark ändert, so wird der Zustand der Brücke hierdurch beeinflusst. Der dadurch bedingte Messfehler ist geringfügig, wenn sich Schutztransformator und Drosselspule beisammen in einem geschlossenen Raum befinden. In Fällen, wo grosse Temperaturschwankungen zu erwarten sind (z. B. in Freiluftstationen, wo mit $\pm$ 30° C Aenderung der mittleren Temperatur zu rechnen ist), muss eine Temperaturkompensation vorgesehen werden. Dies kann auf folgende Weise geschehen: Dem Schutztransformator und der Drosselspule werden induktionsfreie Widerstände vorgeschaltet, wobei in einem Zweig ein gewisser durch den Versuch zu bestimmender Teil aus Kupfer besteht, der im gleichen Raum wie der Schutztransformator montiert wird. Seine Wirkung beruht auf einer von der Temperatur abhängigen Störung des Zustandes der Brücke, welche den sonst entstehenden Messfehler aufhebt.

Die Drehspule ist direkt, ohne temperaturfreien Vorschaltwiderstand an die Brücke angeschlossen. Infolge des hohen Temperaturkoeffizienten des Kupfers kann bei Temperaturänderungen im Instrumentengehäuse dadurch ebenfalls ein Messfehler entstehen. Dieser ist bedingt einmal durch die Verlustwärme der Feldwicklung und wird als Anwärmefehler bezeichnet. Er geht in die Eichung ein und bedeutet, da die Feldwicklung in der Regel dauernd angeschlossen bleibt, keine Störung. Im weiteren ändern jedoch auch grössere Schwankungen der Raumtemperatur den ohmschen Widerstand der Drehspule. Durch das Einbauen eines Teiles der obgenannten Vorschaltwiderstände (welche aus Kupferdraht gewickelt werden) in das Instrument selbst, wird dieser Temperaturfehler auf einen unerheblichen Rest vermindert.

Alle bis dahin besprochenen Messfehler sind für denjenigen Skalenwert am kleinsten, welcher dem Gleichgewichtszustand der Brücke entspricht, und nehmen nach den beiden Endwerten hin zu. Die Gebrauchszone des Messbereiches liegt normalerweise symmetrisch zur Mittellage des Zeigers. Es liegen, selbst bei nicht kompensierter Brücke, die in derselben auftretenden Fehler innerhalb solcher Grenzen, wie sie für technische Instrumente als zulässig gelten.

Schliesslich bleibt noch eine Störungsursache zu nennen: die Beeinflussung der Brücke durch fremde Felder und Streuflüsse. Werden die Wicklungen des Schutztransformators oder der Drosselspule von fremden magnetischen Kraftlinien gleicher Frequenz wie diejenige der Speisespannung durchsetzt, so kann die Reaktanz des betreffenden Brückenzweiges verändert und dadurch der Zustand der Brücke gestört werden. Die Grösse des dadurch verursachten Messfehlers hängt ausserdem ab vom räumlichen und zeitlichen Winkel, den das Fremdfeld mit dem Feld des bezüglichen Brückenzweiges bildet. Die Beeinflussung verschwindet vollständig, sobald die fremden Felder beziehungsweise deren Resultierende senkrecht zur Axe der Wicklungen verlaufen. Werden Schutztransformator und Drosselspule so angeordnet, dass das resultierende Fremdfeld die Wicklungen im gleichen Sinne (bezogen auf die Richtung der Induktionen) durchsetzt, so wird die Störung zunächst ganz erheblich vermindert. Ausserdem macht sich die abschirmende Wirkung des Eisenkessels, in welchem Schutztransformator und Drosselspule eingebaut werden, in günstigem Sinne geltend.

Man wird diesen Einflüssen im allgemeinen nur dann Rechnung tragen müssen, wenn der Schutztransformator in unmittelbarer Nähe der Messstelle zu montieren ist.

Zur Vervollständigung der bis dahin gemachten Darlegungen sollen über die besonders interessierenden Grössen zahlenmässige Angaben folgen, welche an einer ausgeführten Messeinrichtung mit einem Spiegelinstrument gemessen wurden.

Speisespannung		110 Volt
Effektverbrauch des Feldstromkreises		7 Watt
Effektverbrauch der Brücke		ca. 3 Watt
Effektverbrauch im Messelement bei	0° C	ca. 0,080 Watt
bei	150° C	ca. 0,086 Watt

Resultierende Spannung in der Brückendiagonale			Der die Drehspule durchfliessende wattlose Strom		
E_R	bei 0° C	ca. + 0,9 Volt	I_D^{II}	bei 0° C	ca. + 2,9 M Amp.
	bei 60° C	ca. ± 0 Volt		bei 60° C	ca. ± 0 M Amp.
	bei 150° C	ca. − 1 Volt		bei 150° C	ca. − 3 M Amp.

Das Drehmoment $\mathfrak{M}$, bezogen auf eine Ablenkung von $\beta = 30°$ aus der Gleichgewichtslage

$$\mathfrak{M} \text{ ca. } 0{,}25 \text{ cmgr}$$

Spannungs- und Periodenabhängigkeit: bei ± 10 % Aenderung der Nennwerte maximaler Fehler je ca. ± 1 % des Skalenendwertes.

Einfluss von Temperaturänderungen des Schutztransformators: Mittlerer Fehler bei einer Temperaturerhöhung von ca. 28° C

a) bei nicht kompensierter Brücke − 2 % bezogen auf den Skalenendwert,

b) bei kompensierter Brücke − 0,5 % bezogen auf den Skalenendwert.

Zum Schluss sei auf einige konstruktive Einzelheiten der Temperaturmesseinrichtung hingewiesen. In Fig. 5 ist das Montageschema für eine Messstelle, in Fig. 6 ein solches für drei Messstellen dargestellt. Da wo ein Uebertritt der Betriebsspannung auf das Messelement ausgeschlossen ist, z. B. im Oel von Transformatoren oder im Statoreisen von Generatoren, kann der Schutztransformator und somit auch die Drosselspule in Wegfall kommen. An ihre Stelle treten passende induktionsfreie Widerstände.

Die oben abgeleiteten Beziehungen behalten dabei ihre Gültigkeit. Man übersieht leicht, dass durch das Verschwinden der Reaktanzen aus den beiden Brückenzweigen die Verhältnisse sich erheblich vereinfachen. Da nunmehr die verbleibenden induktionsfreien Widerstände Konstante im strengen Sinne darstellen, so wird die Brücke von beliebigen Spannungsänderungen unabhängig. Die Unabhängigkeit wird praktisch begrenzt, nach unten durch die verminderte Einstellkraft, nach oben durch die Erwärmung. Dagegen tritt der Einfluss von Periodenänderungen in stärkerm Masse in Erscheinung. Der Ausdruck (14a) nimmt die Form an:

$$a = \frac{R_B V_\Delta^1 + \omega L_B V_\Delta^1}{\omega^2 M_D L_B \Phi_F}$$

woraus zu entnehmen ist, dass, da die Frequenz in der zweiten Potenz im Nenner vorkommt, die Winkel a (stets von der Mittellage aus gerechnet) für steigende Frequenz abnehmen und umgekehrt.

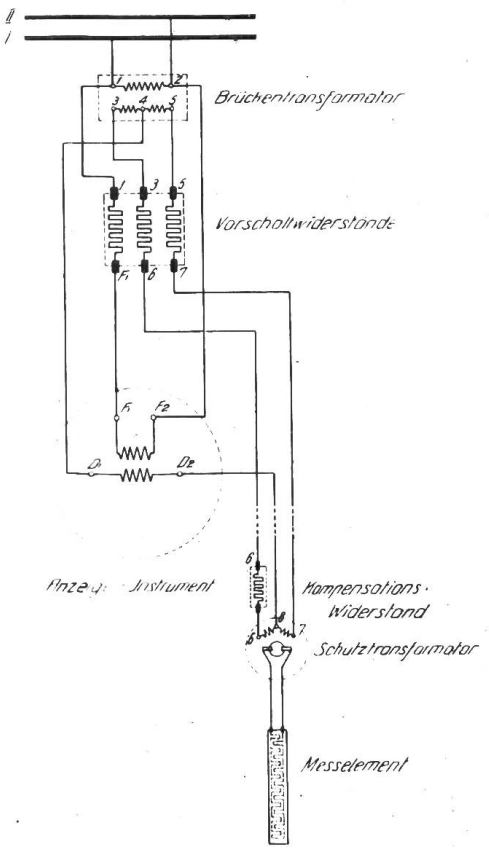

Fig. 5

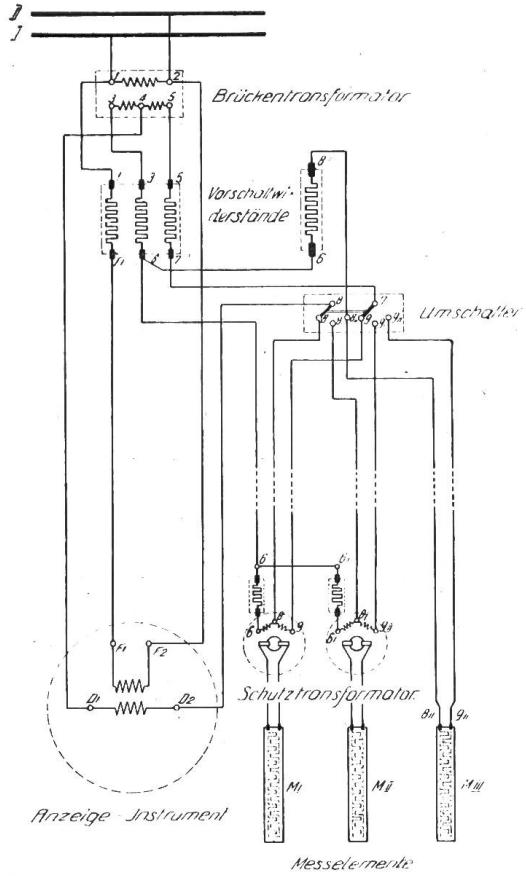

Fig. 6

Für $a = 0$ ist der Frequenzfehler Null und wird für zunehmendes a prozentual immer grösser. Diese grössere Abhängigkeit von der Frequenz fällt jedoch für die praktische Verwendung nicht sehr ins Gewicht, da die Frequenz der in Frage kommenden Stromquellen in der Regel nur um einige Promille vom Nennwert abweicht. Wenn der Schutztransformator wegfällt, so kann der Effektverbrauch im Messelement um ca. $^2/_3$ verkleinert werden. Da die Empfindlichkeit derjenigen des Drehspulinstruments für Gleichstrom nicht nachsteht, so fand das mit Wechselstrom gespeiste Widerstandsthermometer seither auch vorteilhaft Verwendung zur Fernmeldung von Raumtemperaturen. Seine Unempfindlichkeit gegen Spannungsschwankungen gestattet den Anschluss an jedes Licht- oder Kraftnetz. Erforderlich ist dazu nur ein Transformator von der Leistung eines Klingeltransformators für die Speisung der Brücke. Die Wartung einer Akkumulatorenbatterie, wie sie beim Widerstandsthermometer für Speisung mit Gleichstrom meistens erforderlich ist, fällt hier also dahin.

Jedes Messelement besitzt seinen eigenen Schutztransformator mit Drosselspule. Die Umschaltung erfolgt auf der vor der Betriebsspannung geschützten Seite durch einen zweipoligen Umschalter. Die Kompensationswiderstände werden je in unmittelbarer Nähe der zugehörigen Schutztransformatoren montiert, oder auch im Kessel des Schutztransformators selbst untergebracht.

Die Fig. 7*a* und 7*b* stellen einen Schutztransformator mit seiner Drosselspule dar, bestimmt zur Montage in einem gemeinsamen Kessel mit Oel oder Masseisolation und bemessen für eine Prüfspannung von 50 kV.

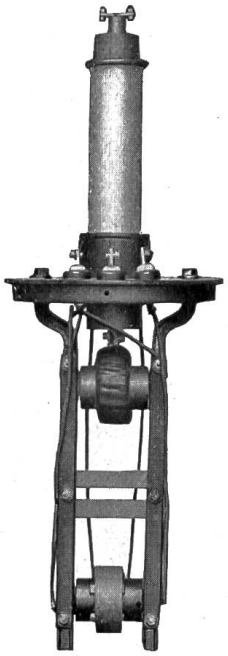

Fig. 7a

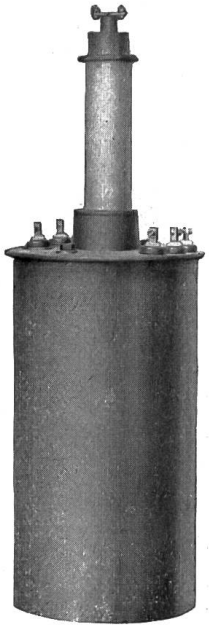

Fig. 7b

Das Anzeigeinstrument kann in Dosen- oder Profilform ausgeführt werden. Für die Profiltype ist des grössern Systemsgewichts wegen die Montage mit vertikal gelagerter Axe vorzuziehen.

Die Skala zeigt den Charakter einer Verhältnisteilung. Am Anfang sind die Intervalle am grössten und verjüngen sich etwas gegen das Ende zu. (Siehe Fig. 8.)

Das Messelement besteht aus einer bifilaren Wicklung eines Metalls mit unveränderlichen Temperaturkoeffizienten. Die Wicklung ist auf einer biegsamen isolierenden Unterlage befestigt und wird durch eine Glimmerfolie vom Kupfer der zu messenden Wicklung isoliert. Die kleinstmöglichen Abmessungen des Elements werden bestimmt durch seinen Effektverbrauch. Die aktive Fläche der Wicklung kann ohne merkliche Eigenerwärmung auf 20 cm² bemessen werden. Im übrigen werden Grösse und Form des Messelements den jeweiligen Verhältnissen angepasst.

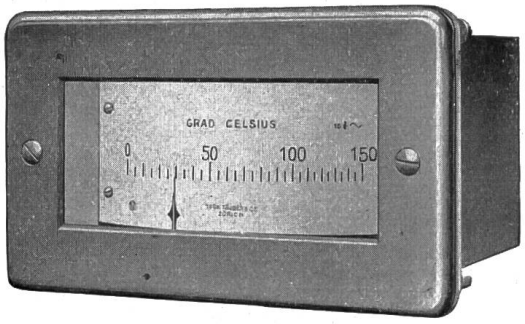

Fig. 8

Zusammenfassung.

Es wird ein mit Wechselstrom gespeistes elektrisches Widerstandsthermometer beschrieben, das sich zur Messung der Wicklungstemperatur von elektrischen Maschinen und Apparaten eignet. Seine Wirkungsweise wird analytisch erörtert, und die wichtigsten Daten einer ausgeführten Messeinrichtung sind angegeben.

Das Vereinsgebäude des S. E. V.

mit besonderer Berücksichtigung der

Materialprüfanstalt und **Eichstätte.**

Vom Generalsekretariat und den Technischen Prüfanstalten.

(Fortsetzung und Schluss.)

Die Einrichtungen der Materialprüfanstalt und Eichstätte.

Von dem neuen Vereinsgebäude versprach man sich insbesondere für die Materialprüfanstalt und Eichstätte besondere Vorteile. Während in dem früheren Mietlokale sozusagen das ganze Laboratorium ein grosser Parterreraum war, in welchem man sich nur zu oft bei den Arbeiten gegenseitig störte, sind im Vereinsgebäude die Laboratorien ihrem Zwecke entsprechend unterteilt, so dass ein ungehindertes Arbeiten in den einzelnen Lokalen gewährleistet ist. Wenn auch zuzugeben ist, dass man bei einem vollständigen Neubau infolge der grösseren Freiheit in der