

aus Manganinblech und können ohne Zuhilfenahme von Drähten usw. an das Instrument angeschlossen werden. Zur Messung von Stromstärken über 300 Amp. mit Nebenschluß ist es erforderlich, den Nebenschlußwiderstand mit entsprechender Kühlung (durch Paraffin) zu versehen.

Zur Spannungsmessung sowie indirekt auch zur Strom- und Energiemessung wird im Laboratorium auch noch das Elektrometer benutzt¹⁾.

Das Instrument eignet sich für die Praxis wenig.

2. Elektrodynamometer, Präzisionsinstrumente für Strom-Spannung und elektrische Energiemessung — Wattmeter, Phasemesser —, transportable Strom- und Spannungstransformatoren.

Im allgemeinen ist, sobald man keinen Präzisionsapparat zur Verfügung hat, das Dynamometer vorzuziehen, zumal mit demselben in einfacher Weise auch Energiemessungen auszuführen sind. Ich will daher im folgenden die Verwendbarkeit des Elektrodynamometers näher untersuchen, und zwar für verschiedene Zwecke.

1. Verwendung des Dynamometers zur Messung von Wechselströmen.

a) Wenn beide Rollen des Instrumentes im Hauptstromkreise liegen und senkrecht zueinander stehen, so gilt die Konstante, welche für Gleichströme bestimmt wurde, auch für Wechselströme. Wir messen dann den Mittelwert des Quadrates der Stromstärke $M(J^2)$, welcher proportional dem Torsionswinkel φ ist, und erhalten:

$$(5) \quad \bar{J} = \sqrt{M(J^2)} = C \cdot \sqrt{\varphi},$$

woselbst C die durch Gleichstrom bestimmte Konstante ist.

b) Wenn beide Rollen des Elektrodynamometers im Nebenschluß liegen und der abgezweigte Strom beide Rollen hintereinander durchfließt, so ist der Koeffizient L_m der gegenseitigen Induktion und die Selbstinduktionskoeffizienten L_1 und L_2 der Widerstände W_1 und W_2 (des festen Widerstandes bzw. der in Serie geschalteten Rollen) in Rechnung zu ziehen.

Bezeichnen wir mit I_{max} , i_{1max} und i_{2max} die Maximalwerte des Hauptstromes bzw. der Nebenströme i_1 und i_2 , so ist:

$$(6) \quad \left\{ \begin{aligned} & \frac{i_{2max}^2}{W_2^2 + \frac{4\pi^2}{T^2} (L_2 - L_m)^2} + \frac{i_{1max}^2}{W_1^2 + \frac{4\pi^2}{T^2} (L_1 - L_m)^2} \\ & = \frac{I_{max}^2}{(W_1 + W_2)^2 + \frac{4\pi^2}{T^2} (L_1 + L_2 - L_m)^2} \end{aligned} \right.$$

Machen wir den Widerstand W_1 induktionsfrei, also $L_1 = 0$ und auch $L_m = 0$ und sorgen dafür, daß der Selbstinduktionskoeffizient L_2

¹⁾ Siehe Kittler, Heinke, Rühlmann.

gegen die Summe $W_1 + W_2$ der Widerstände klein wird, so können die Angaben des Elektrodynamometers im Nebenschluß zur Messung von Wechselströmen gerade wie bei Messung von Gleichströmen benutzt werden. Die Bedingung, daß eine gegenseitige Induktion der in den Widerständen W_1 und W_2 zirkulierenden Ströme nicht stattfindet, wird dadurch erfüllt, daß man das Elektrodynamometer genügend weit von dem Widerstande W_1 entfernt (Fig. 86).

2. Verwendung des Elektrodynamometers zur Messung der elektrischen Energie.

Soll das Dynamometer als Wattmeter benutzt werden, so dient die eine Spule für den Durchgang des Hauptstromes (i_1 oder I), die andere für den Durchgang des Nebenschlußstromes (i_2), der ein Maß für die zu messende Spannung (E) ist. Das Wattmeter kann in zweierlei Schaltungen gebraucht werden, je nachdem die Spannungs-

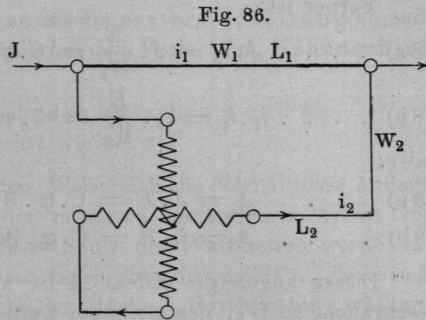


Fig. 86.

Fig. 87 I.

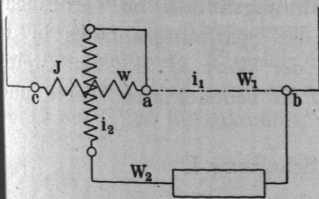
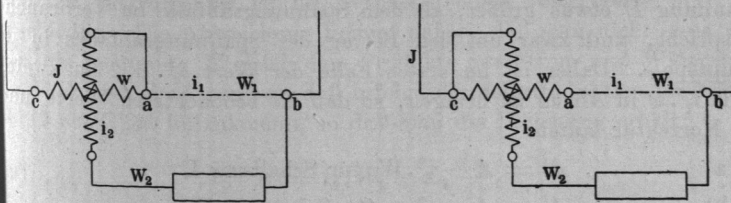


Fig. 87 II.



spule (Nebenschlußspule) vor oder hinter der Stromspule (Hauptspule) abzweigt ist. Die beiden Schaltungen sind aus den Fig. 87 I und 87 II zu ersehen. Die dünnere (Nebenschluß-)Spule ist beweglich, während die dickere (Strom-)Spule feststehend angeordnet ist. Der Nebenschlußspule ist ein hoher Widerstand vorgeschaltet, da dieselbe nur für minimale Ströme bestimmt ist.

Bezeichnen wir mit:

- I den ungeteilten Strom, der durch das Wattmeter fließt,
- E den Spannungsabfall im Nebenschlusse, d. h. zwischen den Punkten a und b , bzw. c und b ,
- i_1 den Strom im Stromverbraucher,
- i_2 den Strom im Nebenschluß,
- W_1 bzw. W_2 die Widerstände des Stromverbrauchers bzw. des Nebenschlusses,
- w den Widerstand der Hauptstromspule,
- φ den Ausschlag des Instrumentes,
- C die Konstante des Instrumentes,

so ist bei Gleichstrom der Effekt, der durch das Elektrodynamometer gemessen wird:

$$(7a) \dots A = J \cdot E = J \cdot i_2 \cdot W_2 \text{ (in Schaltung I),}$$

$$(7b) \dots A = i_1 \cdot E = i_1 \cdot i_2 \cdot W_2 \text{ (in Schaltung II).}$$

Ferner ist:

$$(8a) \dots J \cdot i_2 = J \cdot \frac{E}{W_2} = C \cdot \varphi \text{ (in Schaltung I),}$$

$$(8b) \dots i_1 \cdot i_2 = i_1 \cdot \frac{E}{W_2} = C \cdot \varphi \text{ (in Schaltung II),}$$

oder:

$$(9a) \dots A = J \cdot E = C \cdot \varphi \cdot W_2 \text{ (in Schaltung I),}$$

$$(9b) \dots A = i_1 \cdot E = C \cdot \varphi \cdot W_2 \text{ (in Schaltung II).}$$

Dieser angezeigte Effekt A ist nun etwas verschieden von dem Verbräuche in W_1 , der gemessen werden soll. Um diesen zu erhalten, ist eine Korrektur erforderlich.

Bei Schaltung I ist nämlich der in der Messung ($A = J \cdot E$) enthaltene Strom J zu groß, und zwar um den allerdings kleinen Betrag i_2 des Nebenschlusses; bei Schaltung II ist die in der Messung enthaltene Spannung E etwas größer, als dem Spannungsabfalle im Verbraucher entspricht, und zwar um den Betrag des Spannungsabfalles in der Hauptspule. Daher ist im ersten Falle der Wert $i_2^2 \cdot W_2$, im zweiten Falle $i_1^2 \cdot w$ in Abzug zu bringen, so daß die beobachteten Werte nach der Korrektur lauten:

$$(10a) \dots A' = A - i_2^2 \cdot W_2 \text{ für Schaltung I,}$$

$$(10b) \dots A' = A - i_1^2 \cdot w \text{ für Schaltung II.}$$

Handelt es sich nicht um die Messung des Verbrauches in einem Leiterstück ab , sondern um die Messung des abgegebenen Effektes einer Stromquelle zwischen c und b , so sind die Angaben A des Wattmeters zu klein; bei der ersten Schaltung ist zu dieser Angabe noch der Effektverlust in der Hauptspule ($J^2 \cdot w$), bei der zweiten derjenige in der Nebenschlußspule ($i_2^2 \cdot W_2$) zu addieren; somit lauten die korrigierten Werte in diesem Falle:

$$(11a) \dots (A') = A + J^2 \cdot w,$$

$$(11b) \dots (A') = A + i_2^2 \cdot W_2.$$

Die Ungenauigkeit der Wattmeterangabe hängt für die beiden Schaltungen von den jeweiligen Strom- und Spannungsverhältnissen ab. Die Korrektur kann in vielen Fällen vermieden werden durch die geeignete Wahl der Schaltung des Wattmeters.

Ob die eine oder andere Schaltungsweise des Elektrodynamometers angewandt werden muß, um Korrekturen überflüssig zu machen, entscheidet man nach folgender Regel:

a) „Messung des Effektverbrauches zwischen a und b .

Bei hohen Spannungen und niedrigen Stromstärken wende man die Schaltung II an, da man dann den Energieverlust in der festen Spule des Dynamometers vernachlässigen kann; bei hohen Stromstärken und niedrigen Spannungen dagegen ist die erstere Schaltung vorteilhaft und kann man hierbei den Verlust im Nebenschluß vernachlässigen.

b) Messung der Effektabgabe zwischen c und b .

Die Regel ist umgekehrt wie bei a).“

Es fragt sich nun, in welcher Weise sich die Verhältnisse ändern, wenn es sich um die Messung der mittleren sekundlichen Arbeit von Wechselströmen handelt. Die feste Spule des Wattmeters werde von einem Wechselstrom mit der momentanen Stromintensität i_1 , die bewegliche Spule von einem solchen von der Stärke i_2 durchflossen, während gleichzeitig die momentane zu messende Spannung E sei. Dann ist die momentane Leistung $i_1 \cdot E$ und die mittlere Leistung $M(i_1 \cdot E)$, d. h. der Mittelwerte aus den Produkten der Momentanwerte. Die Angabe des Wattmeters dagegen entspricht einem Mittelwerte $M(i_1 \cdot i_2)$. Diese Angabe des Instrumentes ist bei Wechselströmen vom Werte $M(i_1 \cdot E)$ verschieden. Die Abweichung kommt daher, daß man nicht ohne weiteres die Spannung E gleich dem Produkte aus Strom und Widerstand ($i_2 \cdot W_2$) setzen darf, sondern daß infolge der Selbstinduktion im Nebenschluß ein Glied hinzukommt, so daß man die Beziehung erhält:

$$(12) \dots \dots \dots E = i_2 \cdot W_2 + L_2 \frac{di_2}{dt},$$

L_2 ist dabei der Selbstinduktionskoeffizient der beweglichen Spule, t die Zeit.

Multiplizieren wir die Gleichung mit i_1 , so erhalten wir:

$$E \cdot i_1 = i_1 \cdot i_2 \cdot W_2 + L_2 \cdot i_1 \cdot \frac{di_2}{dt}$$

oder, wenn wir die Mittelwerte der einzelnen Produkte bilden,

$$(13) \dots \dots M(E i_1) = M(i_1 \cdot i_2 \cdot W_2) + L_2 \cdot M\left(i_1 \cdot \frac{di_2}{dt}\right).$$

Die linke Seite der Gleichung ist die zu messende Leistung A , das erste Glied der rechten Seite ist gleich $C \cdot \varphi \cdot W_2$, d. h. gleich der Angabe des Instrumentes. Es gilt somit für die im Leiterstück W_1 geleistete Arbeit:

$$(14) \dots \dots a = C \cdot \varphi \cdot W_2 + L_2 \cdot M\left(i_1 \cdot \frac{di_2}{dt}\right),$$

worin $L_2 \cdot M\left(i_1 \cdot \frac{di_2}{dt}\right)$ das Korrektionsglied ist.

Benutzt man demnach zur Messung der mittleren Arbeit von Wechselströmen ein Wattmeter, so wird durch die direkten Angaben $C \cdot \varphi \cdot W_2$ des Instrumentes nicht die wahre mittlere Arbeit bestimmt, sondern diese ist größer oder kleiner als die Angaben des Wattmeters, je nachdem der Wert des Korrektionsgliedes positiv oder negativ ist.

Wir haben hierbei vorausgesetzt, daß:

1. in der Nebenschließung vom Widerstande W_2 außer der Selbstinduktion L_2 keine andere EMK tätig ist, d. h. es soll die Nebenschließung durch die Vorgänge im Hauptstromkreise nicht beinflusst werden, es soll keine gegenseitige Induktion der beiden Stromkreise statthaben;
2. in der Nebenschließung außer der beweglichen Spule des Wattmeters nur noch induktionsfreie Zusatzwiderstände verwendet werden, so daß der Selbstinduktionskoeffizient L_2 als konstant zu betrachten ist, und
3. die eventuell auftretende Kapazitätswirkung vernachlässigt werden kann.

Die allgemeine Lösung der Gleichung

$$a = C \cdot \varphi \cdot W_2 + L_2 \cdot M \left(i_1 \cdot \frac{d i_2}{dt} \right)$$

hängt von dem periodischen Verlaufe der Ströme i_1 und i_2 ab und wird im allgemeinen sehr schwierig. Legen wir Sinusgesetze für den Verlauf der beiden Ströme zugrunde, so läßt sich die mittlere Arbeit in der Form schreiben:

$$(15) \dots \dots \dots a = C \cdot \varphi \cdot W_2 \cdot \frac{1 + \lambda_2^2}{1 + \lambda_1 \cdot \lambda_2},$$

wobei λ_1 und λ_2 die Bedeutung haben:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{Z \cdot \pi \cdot L_1}{W_1} \\ \lambda_2 &= \frac{Z \cdot \pi \cdot L_2}{W_2} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Hierin bezeichnet } Z \text{ die} \\ \text{Zahl der Stromwechsel.} \end{array}$$

Je nachdem nun die Größe

$$\frac{1 + \lambda_2^2}{1 + \lambda_1 \cdot \lambda_2}$$

größer oder kleiner als 1 ist, müssen die Angaben des Instrumentes erhöht oder verkleinert werden.

Sind zwischen die beiden Punkte, zwischen denen der Effekt gemessen werden soll, Glühlampen eingeschaltet, so ist L_1 sehr klein und kann daher auch $\lambda_1 = 0$ gesetzt werden; der Korrektionsfaktor wird sodann

$$(1 + \lambda_2^2)$$

und

$$(16) \dots \dots \dots a = C \cdot \varphi \cdot W_2 \cdot (1 + \lambda_2^2),$$

W_2 kann klein gemacht werden dadurch, daß W_2 gegen L_2 sehr groß gewählt wird; dies wird erreicht, wenn wir der beweglichen Spule nur wenig Windungen geben und so viel, wie zulässig, induktionsfreien Widerstand vorschalten.

In diesem Falle können die Angaben des Wattmeters ($C \cdot \varphi \cdot W_2$) als genau gelten.

Wie schon früher erwähnt, eignet sich das Elektrodynamometer nicht für Messungen im Betriebe und bei Prüfungen in Zentralen. Für diese Zwecke werden lediglich Präzisionsinstrumente von Hartmann u. Braun, Siemens u. Halske, Weston und anderen Firmen benutzt. Da diese Instrumente hauptsächlich in Frage kommen, so will ich hier etwas näher auf die Ausführung derselben eingehen. Es werden zunächst für Gleichstrom aperiodische Präzisionsmesser gebraucht, welche auf dem Prinzip von Thomson bzw. Deprez und d'Arsonval aufgebaut sind. Das Gewicht des beweglichen Systems — Rahmen und Wickelung, Achse, Zeiger usw. — ist sehr gering, etwa 2 bis 3 g. Die Wahl und Anordnung der Magnete ist so getroffen, daß die Angaben der Instrumente dauernd richtig und unabhängig von fremden Magnetfeldern sind. Die Systeme sind gut ausbalanciert, so daß die Lagenänderung auf die Angaben des Instrumentes nur von geringem Einfluß ist, und die durch sie bedingten Fehler nur etwa $\pm \frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{4}$ Proz. des größten Skalenwertes betragen. Die von einigen Firmen angebrachte Reguliervorrichtung führt den Zeiger wieder auf den Nullpunkt und bewirkt so die Richtigkeit der Eichung wieder, falls nicht eine große Überlastung den Zeiger stark vom Nullpunkte abgelenkt hatte. Bei mehreren Meßbereichen ist bei den besseren Apparaten dafür gesorgt, daß die Meßbereiche unter Berücksichtigung der Anzahl der Skalenzwischenräume einen bequemen Faktor erhalten, so daß eine Teilung ausreicht. Dauernde Einschaltung der Apparate ist zulässig, jedoch nicht erforderlich und auch nicht empfehlenswert; die Einschaltung bei den Spannungsmessern erfolgt durch Niederdrücken und Drehen eines Kontaktknopfes. Bei Strommessern mit Shunts für einige Empfindlichkeiten besteht ein Umschalter im Nebenzweige, der zugleich Ausschalter ist. Die Shunts sind für die maximale Stromstärke für Dauerbelastung bemessen. Dieselben bestehen aus thermostromfreiem Material; der Temperaturkoeffizient ist vernachlässigbar. Zur Kühlung sind die Shunts und Vorschaltwiderstände in Kästen mit durchlöcherter Deckel und Boden untergebracht. Die Vorschalt- und Nebenschlußwiderstände sind auf etwa $\pm \frac{1}{9}$ bis $\pm \frac{1}{10}$ des Sollwertes abgeglichen. Der Einfachheit halber werden vielfach Doppelinstrumente in einem Kasten — aus je einem elektrisch und magnetisch voneinander isolierten Strom- und Spannungsmesser — zusammengebaut; sie eignen sich gut bei Vor- nahme zahlreicher Messungen, wie z. B. Prüfen von Bogenlampen, Zahlern usw. Sehr häufig können diese Doppelinstrumente auch zur Widerstandsmessung direkt oder indirekt unter Hinzuziehung einer

Wheatstoneschen Brücke, wobei das Amperemeter als Galvanometer benutzt wird, verwendet werden. Alles weitere über Widerstandsmessungen s. sub P. 2, S. 382 u. f.: „Messungen von Widerstand und Leitungsfähigkeit“. Der Genauigkeitsgrad der einfacheren Präzisionsinstrumente schwankt von $\pm 1/4$ bis $\pm 1/3$ Proz. des Maximalwertes des Meßbereiches. Die Millivoltmeter werden mit den zugehörigen Shunts und Vorschaltwiderständen geeicht.

Die zur Energiemessung bei der Prüfung in Zentralen meistens benutzten Instrumente sind transportable, aperiodische Präzisionswattmeter für Gleichstrom und ein- und mehrphasigen Wechselstrom. Der Aufbau der Instrumente beruht auf dem elektrodynametrischen Prinzip — eine bewegliche Spannungsspule wird gedreht durch den Strom einer fest angeordneten Starkstromspule. Die Spannungsspule besteht aus dünnem, mit Seide umsponnenem Draht; sie ist auf einer Stahlachse angebracht, deren Spitzen in harten Edelsteinen gelagert sind; der Reibungswiderstand wird hierdurch auf ein Minimum beschränkt. Das Gewicht der Zuführungsfedern, Zeiger und Dämpferflügel für die Luftdämpfung wird ebenfalls von der Achse aufgenommen. Das Gesamtgewicht ist tunlichst gleichmäßig verteilt und wird, falls erforderlich, ausbalanciert durch kleine Laufgewichte. Eine gute Luftdämpfung dient zur schnellen aperiodischen Einstellung. Die Starkstromspule besteht aus mehreren oder vielen — je nach der Höhe der Stromstärke — parallelgeschalteten, dünnen Kupferbändern; hierdurch wird die Entstehung der Wirbelstrombildung in den Kupfermassen vollständig vermieden. Die meisten Instrumente können dauernd um 5 bis 10 Proz. und vorübergehend bis zu 20 bis 30 Proz. über die Normalwerte, für welche die Instrumente gebaut sind, belastet werden. Die Unabhängigkeit der Angaben der Instrumente von der Temperatur und der Selbstinduktion der beweglichen Spulen ist bei guten Instrumenten gewahrt. Mehrere Stromempfindlichkeiten bei dynamometrischen Präzisionswattmetern herzustellen ist nur durch Parallel- oder Serienschaltung einiger gleichwertiger Starkstromwickelungen zu erreichen; hingegen sind viele Spannungsmessbereiche durch Unterteilung des Nebenschlußwiderstandes einfach zu bewirken. Die Parallel- oder Serienschaltung kann durch Schleif- oder Stöpselkontakte, besser jedoch mit Kupferschienen und Klemmschrauben bewirkt werden. Für die Starkstromspule ist eine Kurzschlußvorrichtung, am besten durch Stöpsel vorzusehen.

Die transportablen Prüfapparate für Gleichstrom und einphasigen Wechselstrom enthalten meistens bis zu etwa 200 bis 300 Volt die nötigen Widerstände im Instrument, während bei hohen Spannungen einzelne Vorschaltwiderstände — aus mit Seide umsponnenem Drahte in dünnen Lagen auf sorgfältig isolierendem Rahmen gewickelt — in Frage kommen; statische Kapazitäten in den Widerständen sind nahezu ganz vermieden. Der Anschluß der Widerstände geschieht durch Stöpsel

oder besser durch Klemmen. Bestehen bei Drehstromanlagen drei Außenleiter und kein neutraler Leiter, so kann die Energiemessung mit zwei gleichen Einphasenwattmetern bei jeder Belastung vorgenommen werden; die Größe derselben muß der maximalen Stromstärke in einem Außenleiter und der zwischen zwei Außenleitern bestehenden Dreiecksspannung entsprechen. Besteht ein neutraler Leiter, so sind bei verschiedener Belastung der drei Phasen drei Einphasenwattmeter, deren Starkstromspulen bzw. Spannungskreise den maximalen im Außenleiter fließenden Stromstärken bzw. den Sternspannungen entsprechen müssen, anzuwenden. Bei ungleicher Belastung der drei Zweige in Drehstromanlagen ohne neutralen Leiter und nicht schwankendem Betriebe können drei Einzelmessungen mit einem Wattmeter nacheinander durch Umschaltung auf die drei Phasen ausgeführt werden; dieses wird am besten mit einem ev. zwei mit Kurzschlußvorrichtung ausgeführten Umschaltern bewirkt. Die Summe der Resultate der drei Einzelmessungen ergibt die Gesamtdrehstromleistung. Besteht gleiche Belastung der drei Phasen, so ist der Umschalter überflüssig und kommt man mit einer Wattmeterablesung in einer Phase aus; das Dreifache dieses Resultats entspricht der Gesamtdrehstromleistung. Falls ein neutraler Leiter vorhanden oder der neutrale Punkt erreichbar ist, so kann mit einem einfachen Einphasenwattmeter, welches für die im Außenleiter maximale durchfließende Stromstärke und die zwischen Außen- und Neutraleiter bestehende Spannung dimensioniert ist, die Messung erfolgen. Sind die Sternspannungen nicht erreichbar, so sind Sternwiderstände notwendig, welche inkl. Spannungsspule aus drei gleichen Widerständen — für Sternspannung gewickelt und in Stern geschaltet — bestehen, die entsprechend den Stern- bzw. Dreiecksspannungen gewählt sind und für niedrigere Spannungen meistens im Instrumente enthalten bzw. für höhere Spannungen als Vorschaltwiderstände angeordnet sind. Bevor die Messungen vorgenommen werden, muß man sich über die oben gegebenen Momente klar werden, um hiernach das entsprechende Instrument wählen zu können (s. hierzu S. 263 u. 264, sub K 3).

Bei den Prüfungen sind häufig transportable Strom- und Spannungstransformatoren notwendig; dieselben werden für einen, zwei oder drei Meßbereiche hergestellt. Der Sekundärkreis dieser Transformatoren muß stets geerdet werden können. Die Isolationsprüfung geschieht meistens — mit sinusförmiger Spannung — mit der doppelten Spannung, falls die Betriebsspannung nicht über etwa 25 000 Volt geht und mit etwa $1\frac{1}{2}$ facher Spannung bei noch höheren Betriebsspannungen. Die Genauigkeit des Übersetzungsverhältnisses beträgt etwa $\frac{1}{2}$ bis $\frac{3}{4}$ Proz. unter normalen Betriebsverhältnissen. Die Eichung der Instrumente gemeinsam mit den Transformatoren vorzunehmen, empfiehlt sich nur, wenn größere Genauigkeit verlangt, als oben angegeben oder wenn die Betriebsverhältnisse anormal sind. Die Phasenverschiebungen zwischen Primärstrom bzw. -spannung und Sekundärstrom

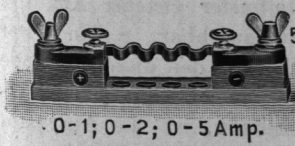
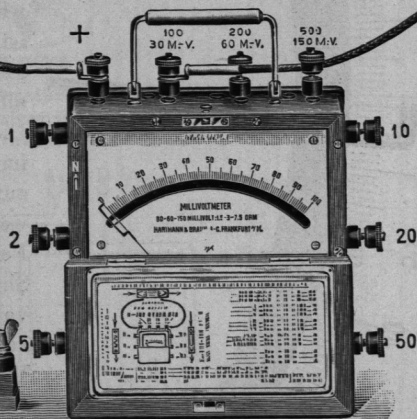
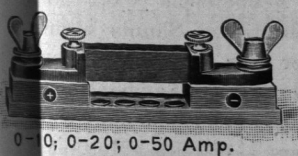
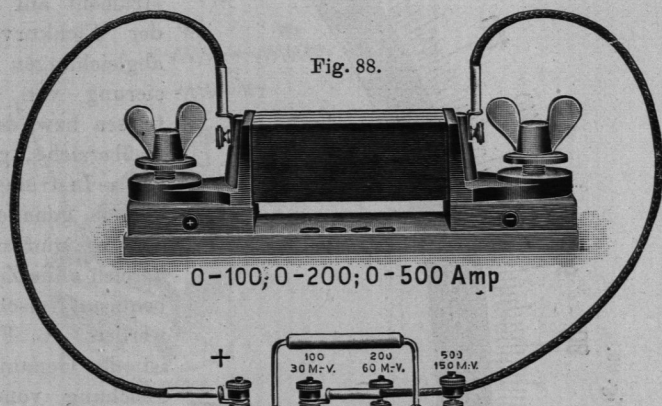
bzw. -spannung weichen meistens unter normalen, oben angegebenen Verhältnissen — Klemmenspannungen — nur sehr gering von 180° ab, so daß sich die Transformatoren besonders zur Schaltung mit Phasennessern, Wattmetern usw. eignen. Gute Spannungstransformatoren vertragen eine momentane Spannungserhöhung von etwa 10 bis 15 Proz.

Bei den Stromtransformatoren ist darauf zu achten, sobald in der Primärspule Strom fließt, daß die Existenz des Transformators oder der an der Prüfung Beteiligten durch hohe Sekundärspannungen nicht gefährdet werden. Bei den Prüfungen in Zentralen sind häufig transportable, direkt zeigende Phasennesser für ein- und mehrphasigen Wechselstrom zur direkten Ermittlung der Phasenverschiebung des Stromes gegen die Spannung einer Ein- oder Mehrphasenstromanlage sehr wertvoll, weshalb ich hier mit wenigen Worten auf dieselben eingehen will. Die Phasennesser sind meistens eisenfreie, elektrodynamometrische Apparate mit festem Hauptstromfeld und zwei gekreuzten beweglichen, parallelgeschalteten Spannungsspulen; der einen Spule ist eine entsprechende Vorwärts- und der anderen eine entsprechende Rückwärtsverschiebung gegen die Spannung gegeben. Der Ausschlag des Zeigers am Instrument ist nur eine Funktion des Verschiebungswinkels und somit vollständig unabhängig von Spannung und Stromstärke, so daß die Angaben des Phasennessers bei konstantem Phasenwinkel selbst bei 30 bis 40 Proz. veränderlichem Strom und 10 bis 20 Proz. veränderlicher Spannung immer dieselben bleiben. Da die Instrumente in ihren Angaben nicht unabhängig von der Periodenzahl sind, so ist es ratsam, einen Frequenzregler vorzusehen, wenn es sich um Messungen bei verschiedenen Periodenzahlen handelt. Die Spannungsspulen sind mit einem solchen induktionsfreien Vorschaltwiderstand versehen, dessen Temperaturkoeffizient unberücksichtigt gelassen werden kann. Die Ablesungen erfolgen meistens direkt in Werten von $\cos. \phi$. Bei höheren Stromstärken, etwa über 50 bis 60 Amp. und Spannungen etwa über 400 bis 500 Volt, müssen Strom- und Spannungstransformatoren — wie bei den Wattmetern — verwendet werden. Höhere Spannungen erfordern besondere Vorschaltwiderstände. Bei Drehstromanlagen sind Sternwiderstände bzw. Drehstromspannungstransformatoren notwendig; für höhere Spannungen, etwa über 400 bis 500 Volt, kommen auch hier besondere Widerstände in Frage.

Nachdem ich im vorhergehenden allgemein die Präzisionsapparate bei Prüfungen in Zentralen für Strom-, Spannungs- und Energiemessungen in Ausführung und im Gebrauche besprochen habe, will ich hier einige Apparate von Hartmann u. Braun anführen, welche ich für die eben besprochenen Prüfungen für sehr zweckmäßig halte und welche mir bei solchen gute Dienste geleistet haben. Sobald mehrere Stufenfolgen von Strommeßbereichen bei den Prüfungen in Frage kommen, so ist es sehr vorteilhaft, Multiplex-Instrumente bzw. -Shunts von Hart-

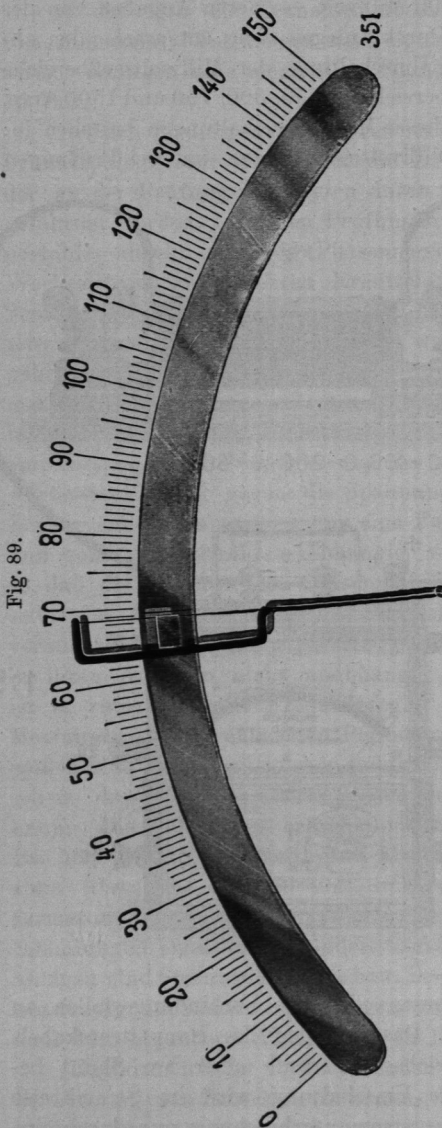
mann u. Braun zu verwenden. Diese Instrumente, wie z. B. das einohmige Multiplex-Millivolt-Amperemeter, erhalten mehrere Meßbereiche — beispielsweise 30, 60, 150, 300 Millivolt —, deren Angaben von der Temperatur unabhängig sind. Durch Anlegen eines entsprechenden abgeglichenen Shunts und durch Umschaltung der Millivoltmeßbereiche werden gerade so viele Strommeßbereiche — 150, 300, 750 und 1500 Amp. — erreicht. Die Hauptvorteile dieser Multiplexschaltungen bestehen in:

1. Mehrere, z. B. drei bis vier, Millivoltmeßbereiche sind bei Prüfungen



von Spannungsabfällen in Leitungen oder von Verbindungsstellen an Leitungen sehr zweckmäßig. 2. Das Umlegen des Hauptstromkabels fällt beim Wechsel des Meßbereiches innerhalb einer am Shunt bestehenden Stufenfolge fort. Die Umschaltung wird im Stromkreise des Instrumentes selbst ohne Hauptstromunterbrechung nur durch einseitiges Umlegen eines Meßkabels (von Klemme zu Klemme), welches den Shunt mit dem Instrument verbindet, bewirkt. Bei vielen Instrumenten ist ein Präzisionsumschalter in dem Instrumente eingebaut und wird die Umschaltung durch Drehen desselben bewirkt. Das hier in Fig. 88 nebst Shunts dargestellte aperiodische Normal-Triplex-Millivolt-

meter¹⁾ eignet sich besonders für Prüfungen in mittleren Zentralen; die Meßbereiche sind bei der Fig. 88 angegeben. Einen Präzisions-



umschalter besitzt das Instrument nicht. 3. Die Shunts sind sehr reichlich bemessen, so daß eine Überlastung schadlos verläuft. 4. Der Apparat kann ohne weiteres Instrument auf die Richtigkeit der Eichkurve, der Endabgleichungen und Kompensierung von Temperatureinflüssen bzw. der Angaben der Meßbereiche, geprüft werden. 5. Das Instrument kann in dem oberen genauesten, $\frac{3}{5}$ der Teilung umfassenden Skalenbereich ohne Zeitverlust durch bequeme Umschaltung benutzt werden. 6. Für alle Shunts ist die Genauigkeit der Abgleichung vom Sollwert für alle Meßbereiche $\pm 0,1$ Proz. Die Multiplex-Shunts können immer nur mit einer Stromzuführungsstelle angeschlossen werden, ohne Entstehung eines Fehlers. 7. Die Multiplex-Shunts sind für Multiplex-Millivoltmeter gleicher Art direkt austauschbar. 8. Ein weiterer Vorteil, den diese und andere Instrumente derselben Firma besitzen, ist die Ausrüstung mit einem Fadenzüger mit transparentem Beleuchtungsschirmchen. „Der Faden und sein Spiegelbild heben sich scharf und schwarz von dem einen hellen Hintergrund dar-

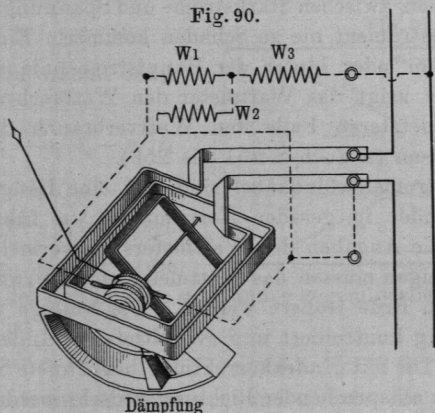
stellenden Spiegelbild des zarten Beleuchtungsschirmchens ab und erwirken so eine scharfe nicht für das Auge ermüdende Ablesung.“

¹⁾ Für einige Klischees und Drucksachen, welche mir von der Aktiengesellschaft Hartmann u. Braun überlassen wurden, spreche ich hier meinen besten Dank aus.

Da der Fadenzeiger von besonderer Wichtigkeit ist, so lasse ich hier in Fig. 89 eine Abbildung folgen, welche das Wesentliche erkennen läßt.

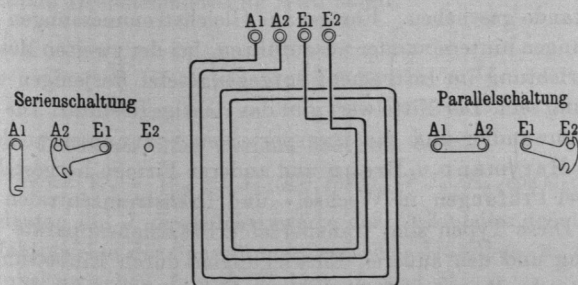
Ein weiterer wertvoller Apparat bei Energiemessungen in Zentralen ist das transportable, aperiodische Präzisionswattmeter von derselben Firma. Dasselbe beruht auf dem elektrodynamischen Prinzip. Die Hauptstromspule ist — um Wirbelströme zu vermeiden — unterteilt und mit zwei Stromempfindlichkeiten aus zwei gleichwertigen Abteilungen

Fig. 90.



Schematische Darstellung:

1. eines elektrodynamischen Wattmeters für einen Strommeßbereich;



2. der Hauptstromspule eines Wattmeters für zwei Stromempfindlichkeiten.

hergestellt, welche vermittelt Umschaltvorrichtung hinter- oder parallelgeschaltet werden können. Der Wattmeterstromkreis kann eine Stromstärke von 0,03 Amp. aufnehmen; die Spannung, bei welcher diese Stromstärke auftritt, ist auf dem Instrument vermerkt. Eine dauernde Überlastung — sowohl in bezug auf Stromstärke als auch Spannung — von etwa 10 Proz. ist angängig. Das Instrument ist frei von Eisen und die Selbstinduktion der beweglichen Spule ist sehr klein und somit sind die Angaben des Instruments bei jeder Phasenverschiebung, Periodenzahl und Kurvenform des Wechselstromes normal, so daß keine Korrekturen

erforderlich sind. Die Wattmeteraufstellung muß so gewählt werden, daß eine Einwirkung durch fremde magnetische Felder auf das Instrument ausgeschlossen ist. Die einzelnen erforderlichen Anschlüsse zwischen Wattmeter, Widerständen und Hauptleitungen ergibt beifolgendes Schema (Fig. 90). Zwischen Wattmeter und demjenigen Hauptstromleiter, in welchem die Starkstromspule sich nicht befindet, muß ein Vorschaltwiderstand eingeschaltet werden; auf diese Weise wird eine zu hohe Spannungsdifferenz zwischen Starkstrom- und Spannungsspule vermieden und kann das Instrument nie zu Schaden kommen. Ein Pol des Nebenschlusses kann vor oder hinter der Hauptstromspule angelegt werden; im ersteren Falle zeigt das Wattmeter den Wattverbrauch der Hauptstromspule, im letzteren Falle den Wattverbrauch des Nebenschlußstromkreises mit an (s. auch S. 251 bis 253).

Die Hauptstromanschlußkabel sind auf eine Länge von etwa 2 m dicht nebeneinander in gerader Horizontalen zu führen, um Beeinflussungen auf die Angaben des Wattmeters zu vermeiden. Bei Hochspannungsmessungen müssen das Wattmeter und die zugehörigen Widerstände gut gegen Erde isoliert werden. Die Nullage des Zeigers muß vor jeder Messung kontrolliert und ev. mittels der Indexkorrektur eingestellt werden. Die mit „Indexkorrektur“ bezeichnete Schraube muß zu diesem Behufe in entsprechender Richtung gedreht werden bis der Zeiger wieder in der Nullage ist, hierbei ist der Apparat von allen Polen des zu messenden Stromkreises durch mehrpolige Ausschalter zu lösen. Die Umschaltung von einer Stromempfindlichkeit auf die andere darf nur im stromlosen Zustande geschehen. Für genaue Gleichstrommessungen sind zwei Beobachtungen hintereinander auszuführen; bei der zweiten Messung muß die Stromrichtung im Instrument entgegengesetzt derjenigen der ersten Beobachtung sein. Der Mittelwert gibt das richtige Resultat. Die umschaltbaren Stromwandler und die transportablen Spannungswandler — wie solche von Hartmann u. Braun und anderen Firmen hergestellt werden — sind bei Prüfungen in Wechsel- und Drehstromzentralen oft sehr wertvoll. Diese Typen sind transportable Präzisionsapparate in solider Ausstattung und den äußeren Einwirkungen durch Einbettung in sehr gut isolierende Masse enthoben. Das Übersetzungsverhältnis ist für einen maximalen Sekundärstrom von 5 Amp. abgeglichen und bis zu $\frac{1}{10}$ des Meßbereiches herab auf $\frac{1}{2}$ Proz. richtig, sobald die Klemmenspannung sämtlicher angeschlossenen Apparate inkl. Verbindungsleitungen bei 50 Perioden die den Typen entsprechenden Klemmenspannungen nicht überschreiten. Bei den Spannungswandlern wird das Übersetzungsverhältnis bei etwa 10 Voltamp. Leistungsentnahme auf im Minimum $\frac{1}{2}$ Proz. abgeglichen.

3. Effektenmessung bei Mehrphasenströmen.

Auf die Effektenmessung bei Mehrphasenströmen will ich im Anschluß an das auf S. 251 u. ff. Gesagte hier näher eingehen.