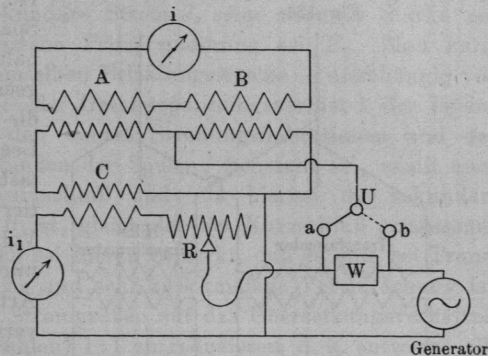


der zu prüfenden Transformatoren in Serie geschaltet. Die Schaltung ist in folgender Weise auszuführen:

Die Transformatoren *A* und *B* sind zu untersuchen (s. Fig. 133). Der Spannungsabfall in den beiden Transformatoren wird durch die Spannung des Zusatztransformators *C* kompensiert. Der Spannungsabfall ist eine Funktion des zirkulierenden Stromes *i*. Durch geeignete Regulierung der Spannung von *C* mittels des Widerstandes *R* kann man den normalen Strom *i* erreichen. Da aber die Spannung von *C* nur die Verluste deckt, so muß man auch, um die richtige (normale) Klemmenspannung zu erhalten, die Spulen in der gezeichneten Weise mit den Klemmen des

Fig. 133.



Generators verbinden. Das Wattmeter *W* mißt in Stellung *a* des Umschalters *U* eine Leistung  $L_1$ , in Stellung *b* eine kleinere Leistung  $L_2$ .  $L_1$  ist der gesamte dem Generator entnommene Effekt,  $L_2$  ist nur der Teil, welcher dem Widerstande *R* und dem Zusatztransformator *C* zugeführt wird. Ist  $i_1^2 \cdot R$

der Wattverlust im Vorschaltwiderstande und  $\eta'$  der Wirkungsgrad des Zusatztransformators, so ist die sekundäre Leistung desselben  $(L_2 - i_1^2 \cdot R) \cdot \eta'$ . Der Generator gibt unmittelbar  $L_1 - L_2$  an die Transformatoren *A* und *B* ab. Der gesamte Verlust in den beiden Transformatoren *A* und *B* ist:

$$L_1 - L_2 + (L_2 - i_1^2 \cdot R) \cdot \eta' = L_v.$$

Ist weiter die normale Leistung je eines Transformators (*A* oder *B*) gleich  $L$ , so ergibt sich aus der Art der Energieübertragung — da  $\eta \cdot L$  die sekundäre Leistung des Transformators *A* (Niederspannungsseite) und zugleich die primäre Leistung des Transformators *B*,  $\eta^2 \cdot L$  die sekundäre Leistung von *B* (Hochspannungsseite) ist — der Wirkungsgrad  $\eta$  eines der Transformatoren *A* und *B*, wie folgt:

$$L_v = L - \eta^2 \cdot L$$

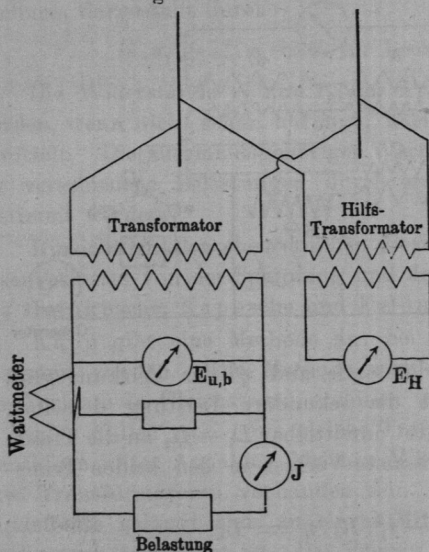
$$\eta = \sqrt{\frac{L - L_v}{L}}.$$

### 3. Bestimmung des Spannungsabfalls.

Der Spannungsverlust in einem Transformator, bedingt durch den die Wickelungen durchfließenden Primär- bzw. Sekundärstrom, ist gegeben durch die Streuungsinduktion (Selbstinduktion) in beiden Wickelungen

und durch den primären und sekundären Ohmschen Spannungsabfall, der sich jeweils durch das Produkt aus Stromstärke und Widerstand ausdrückt. Der sekundäre Spannungsabfall zwischen Vollast und Leerlauf darf eine gewisse Grenze nicht überschreiten, damit die sekundär angeschlossene Beleuchtungsanlage bei Konstanthaltung der Primärspannung ohne weitere Regulierung keinen zu großen Spannungsschwankungen unterworfen ist. Der Gesamtspannungsverlust im Transformator, der als gleichbedeutend mit dem sekundären Spannungsabfall zwischen Vollast und Leerlauf angesehen werden kann, da der Spannungsverlust bei Leerlauf praktisch gleich Null ist, beträgt bei guten Konstruktionen und sekundär induktionsfreier Belastung etwa 3 Proz.

Fig. 134.



kleinen Transformator von gleichem Übersetzungsverhältnis zu Hilfe (s. Fig. 134). Der zu untersuchende und der Hilfstransformator werden mit ihren Hochspannungswicklungen parallel an das Primärnetz angeschlossen und an ersterem sekundär die Belastungsstromstärke  $J$ , die Spannung  $E$  und der Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  durch die entsprechenden Instrumente bestimmt. Ist die Ablesung der sekundären Spannung am Versuchstransformator  $E_u$  im unbelasteten und  $E_b$  im normal belasteten Zustande, sowie  $E_H$  die sekundäre Spannung am Hilfstransformator, bezeichnet  $d_1$  den Unterschied der Ablesungen  $E_u$  und  $E_H$ ,  $d_2$  denjenigen von  $E_b$  und  $E_H$ , so ist  $d_2 - d_1$  gleich dem Spannungsabfall des Versuchstransformators infolge Belastung. Es ist nur erforderlich, die beiden Voltmeter jeweils zu gleicher Zeit abzulesen. Die Werte des Spannungsabfalles können als Funktion der Belastungsstromstärke für induktionsfreie und induktive Belastung ermittelt und dargestellt werden.

Ist es möglich, die primäre Spannung konstant zu erhalten, so genügt es, mit einem geeigneten genauen Voltmeter die sekundäre Spannung bei Leerlauf und bei voller Belastung zu messen, und resultiert aus der Differenz beider Voltmeterablesungen der Spannungsabfall. Jedoch ist diese Art der Messung wenig zuverlässig, da man meist für die Konstanz der Primärspannung keine Garantie hat, und außerdem eine genaue direkte Messung der Hochspannung im allgemeinen Schwierigkeiten bereitet. Man nimmt daher zur Bestimmung des Spannungsabfalles, wenn möglich, einen

Die Methode von Scattergood ist auch zu empfehlen, sobald man einen Normaltransformator zur Verfügung hat. Es möge genügen, auf den betreffenden Aufsatz in der Zeitschrift „Electrician“, 1893, bzw. der „Elektrot. Zeitschr.“ 1894, S. 104 hinzuweisen.

In sehr einfacher Weise läßt sich der Spannungsabfall zwischen Vollast und Leerlauf für verschiedene Phasenverschiebung nach der Kappschen Methode graphisch darstellen. Der große Vorteil dieser Darstellung beruht darin, daß nur ein einfacher Kurzschlußversuch durchzuführen ist. Die sekundäre Wickelung des Transformators wird durch ein Amperemeter kurz geschlossen, wobei naturgemäß die Primärspannung entsprechend niedrig zu halten ist. Die letztere wird sodann so eingestellt, daß der sekundäre Strom  $J_s$  seine normale Stärke annimmt. Die hierbei gemessene Primärspannung sei  $E_p$ . Man kann nun annehmen, daß bei demselben Belastungsstrome — unabhängig von der Größe der Spannung — der Gesamtspannungsverlust  $\varepsilon$  der beiden Spulen, herrührend von den beiden Streuungsinduktionen und den beiden Ohmschen Widerständen der Spulen, konstant sei, somit auch gleich demjenigen bei Kurzschluß und, da hierbei die sekundäre Klemmenspannung  $E_s = 0$  ist, gleich der bei Kurzschluß gemessenen Primärspannung  $E_p$  sei. Es sei hierzu bemerkt, daß es eine bei Transformatorproblemen übliche und sehr zweckmäßige Vereinfachung ist, sämtliche Spannungs- und Stromgrößen auf das Übersetzungsverhältnis (Verhältnis der Windungszahlen) 1:1 zu reduzieren, d. h. entweder alle Größen in Hochspannung oder alle in Niederspannung auszudrücken; man kann dann primäre und sekundäre Größen rechnerisch und graphisch zusammensetzen. In diesem Sinne kann man auch sagen, daß die primär gemessene Spannung  $E_p$  gleich der Summe aus primärem und sekundärem Spannungsverluste sei, wobei die Niederspannungsgrößen auf Hochspannung reduziert seien durch Vergrößerung im Verhältnisse  $\frac{h}{n}$ ; hierbei be-

$$(6) \dots \dots \dots E_p = \sqrt{\varepsilon_s^2 + \varepsilon_r^2} = \varepsilon.$$

deuten  $h$  und  $n$  die entsprechenden Windungszahlen der Hochspannungs- bzw. Niederspannungswickelungen. Ist  $\varepsilon_s$  die EMK der Streuungsinduktionen (primär plus sekundär) und  $\varepsilon_r$  der gesamte Ohmsche Spannungsabfall (primär plus sekundär), so kann man, wie oben schon erwähnt, setzen:

Die Größen  $\varepsilon_s$  und  $\varepsilon_r$  sind geometrisch zusammensetzen, indem  $\varepsilon_s$  stets normal zum Belastungsstrome gerichtet ist,  $\varepsilon_r$  dagegen in Richtung desselben fällt. Hierbei ist die Annahme gemacht, daß Primär- und Sekundärstrom um  $180^\circ$  gegeneinander verschoben seien, was für Vollbelastung zulässig ist. Somit fallen auch die primären und sekundären Teilbeiträge von  $\varepsilon_r$  bzw.  $\varepsilon_s$  praktisch in gleiche Richtung und addieren sich algebraisch.

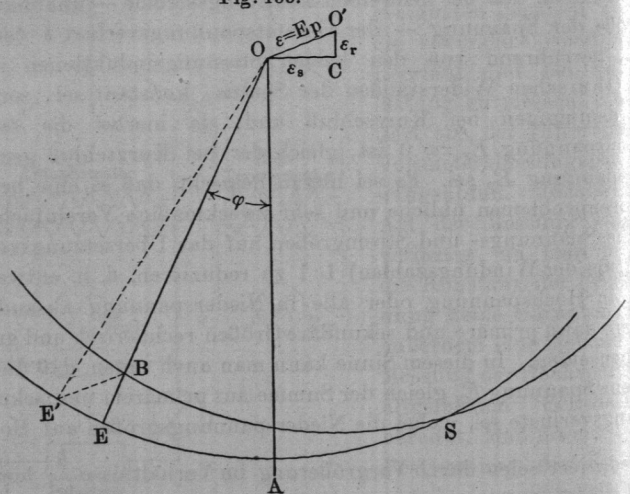
Es sei in dem Diagramme  $OA$  (Fig. 135) die sekundäre Stromstärke nach Größe und Richtung,  $OB$  die sekundäre Klemmenspannung, unter

dem Winkel  $\varphi$  gegen den Strom verschoben. Das Dreieck des Spannungsverlustes  $OCO'$  — in Hochspannung ausgedrückt — ist vollständig bestimmt durch  $E_p$  und  $\varepsilon_r$ . Der letztere Wert ergibt sich aus den schon bekannten oder noch zu ermittelnden Widerständen der beiden Wickelungen  $r_p$  und  $r_s$  und den bei Kurzschluß gemessenen normalen Belastungsstromstärken  $J_p$  und  $J_s$  zu

$$(7) \dots \dots \dots \varepsilon_r = J_p \cdot r_p + \frac{h}{n} \cdot J_s \cdot r_s.$$

Ist das Übersetzungsverhältnis  $\frac{h}{n}$  nicht schon aus den Dimensionen des Transformators bekannt, so läßt es sich leicht durch einen Leerlaufversuch als Verhältnis der beiden Klemmenspannungen mit großer

Fig. 135.



Annäherung gewinnen.  $\varepsilon_s$  ergibt sich als dritte Seite des rechtwinkligen Dreiecks. Natürlich muß auch  $OB$  mit dem auf Hochspannung reduzierten Werte in das Diagramm eingezeichnet werden ( $OB = \frac{h}{n} \cdot E_s$ ).

Aus  $OB$  und  $OO'$  ergibt sich die Primärspannung  $O'B$ . Trägt man  $BE = OO'$  nach Größe und Richtung bei  $B$  an, so ist  $O'B$  auch gleich  $OE' = OE$ . In praktischen Fällen ist nun die Primärspannung  $OE$  als konstant zu betrachten, und fragt es sich nun, wie sich die sekundäre Spannung  $OB$  mit dem Phasenwinkel  $\varphi$  verändert. —  $E$  liegt auf einem Kreise um  $O$ . Da  $\varepsilon$  bei konstantem (normalem) Belastungsstrom nach Größe und Richtung konstant ist, so liegt  $B$  offenbar auf einem zweiten Kreise mit demselben Radius  $OE = OE'$  um  $O'$ .  $BE$  stellt für variables  $\varphi$  jeweils den arithmetischen Spannungsabfall im Transformator oder zwischen Vollast und Leerlauf (ausgedrückt in Hochspannung) dar.

Liegt  $OB$  rechts von der Linie  $OA$ , so bedeutet dies, daß der sekundäre Strom gegen die sekundäre Spannung voreilt.

Die beiden Kreise schneiden sich im Punkte  $S$ , der im Gebiete der Phasenvoreilung des Stromes liegt. Für den diesem Punkte entsprechenden Wert der Phasenverschiebung ist der Spannungsabfall  $= 0$ ; jenseits dieses Punktes übersteigt (bei wachsender Phasenverschiebung) die sekundäre Klemmenspannung die primäre, d. h. der Spannungsabfall wird negativ.

#### 4. Rechnerische Untersuchung eines Transformators.

Die Durchführung der Experimente behufs Untersuchung eines Transformators ist einfach, solange genau geeichte Apparate in der erforderlichen Zahl und Größe zur Verfügung stehen; dies ist jedoch in der Praxis nicht immer der Fall; man sucht häufig mit den vorhandenen Meßinstrumenten ein Resultat zu erzielen und hegt alsdann den Wunsch, dieses Ergebnis, falls die Daten des Transformators zu ermitteln sind, rechnerisch zu kontrollieren. Häufig muß man sich auch mit der Rechnung<sup>1)</sup> allein zufrieden geben.

Es seien daher die Hauptformeln und weiter unten ein Beispiel zur rechnerischen Bestimmung eines Transformators im folgenden gegeben.

Es bezeichnen:

- $n_1$  die Zahl der Windungen primär,
- $n_2$  die Zahl der Windungen sekundär,
- $r_1$  Widerstand der Wickelung primär,
- $r_2$  Widerstand der Wickelung sekundär,
- $i_1$  Stromstärke primär in Ampere,
- $i_2$  Stromstärke sekundär in Ampere,
- $i_0$  wattloser (Erreger-) Strom in Ampere,
- $i_0 \cdot \sqrt{2}$  Maximalwert desselben,
- $i_e$  Wattkomponente des Leerlaufstromes (zur Deckung der Hysteresis- und Wirbelstromverluste und der Kupferverluste),
- $l_m$  mittlere magnetische Länge des Kraftlinienweges in cm,
- $H$  Maximalwert der magnetisierenden Kraft,
- $\alpha$  Koeffizient der Hysteresis für Eisen (derselbe beträgt bei guten Eisenblechen etwa 0,0025 bis 0,0027, sonst etwa 0,0031 bis 0,0034),
- $\mu$  Permeabilität des Eisens,
- $B$  Maximalwert der Kraftliniendichte pro  $\text{cm}^2$ ,
- $N$  Maximalwert der Kraftlinienzahl,
- $E_{max}$  Maximalwert der in einer Wickelung induzierten EMK,
- $E$  den mittels Voltmeter bestimmten (effektiven) Mittelwert der EMK,
- $c$  die Periodenzahl,
- $\omega = 2\pi c$  die Polwechselgeschwindigkeit,

<sup>1)</sup> Siehe hierüber auch Cl. P. Feldmann, Wechselstromtransformatoren.