

variabel und kann für bestes Schmiedeeisen gleich 0,0020 bis 0,0025 gesetzt werden.

Die Form der Kurve, welche B bzw. N als Funktion der Zeit darstellt, ist nicht von Einfluß auf den Hysterisisverlust¹⁾. Es gibt sehr viele Kurvenformen, welche alle das gleiche Maximum erreichen. In bezug auf Hysterisisverlust sind dieselben alle gleichwertig, nicht aber in bezug auf die induzierte EMK. Es ist daher wichtig zu wissen, welche Kurvenform der von der Wechselstrommaschine erzeugten EMK das kleinste B bzw. N im Transformator bei gleicher effektiver EMK hervorbringt. Eine Untersuchung in dieser Richtung liefert folgendes Resultat:

Für sinusförmigen Verlauf der EMK gilt bekanntlich die unter (1) schon gegebene Beziehung

$$E = 4,44 \cdot c \cdot n \cdot N \cdot 10^{-8},$$

welche den Zusammenhang zwischen E und N darstellt. Ist die Kurve der EMK spitzer wie die Sinuskurve, so ist der Zahlenfaktor in obiger Gleichung größer als 4,44; bei flacherem Verlaufe der Kurve ist er kleiner. Für die Induktion B bzw. N sind diese Verhältnisse notwendig umgekehrt, und geben somit spitze Kurven der EMK zu geringeren Verlusten im Transformator Anlaß wie abgeflachte.

2. Bestimmung des Wirkungsgrades und der Effektverluste.

Die soeben besprochenen im Transformator auftretenden Effektverluste sowie die durch Ohmschen Widerstand bedingten Verluste lassen sich auf folgende Weise bestimmen:

Der Gesamteffektverlust ergibt sich aus der Differenz der Wattmetermessung des primär zugeführten (E_1) und des sekundär verbrauchten Effektes (E_2). Zieht man von diesem Differenzwerte den berechneten Stromwärmeeffekt der Primärwicklung $i_1^2 \cdot r_1$ und der Sekundärwicklung $i_2^2 \cdot r_2$ ab, so erhält man den Hysterisis- und Wirbelstromverlust.

Der Wirkungsgrad η ist gleich dem Verhältnisse des sekundär verbrauchten zu dem primär zugeführten Effekte, d. h.

$$(3a) \dots \dots \dots \eta = \frac{E_2}{E_1}.$$

Bei sekundärer induktionsfreier Belastung kann man an Stelle einer Wattmetermessung sekundär auch mittels Volt- und Amperemeter die Spannung e_2 und die Stromstärke i_2 feststellen. Es besteht sodann die Relation für den Wirkungsgrad:

$$(3b) \dots \dots \dots \eta = \frac{E_2}{E_1} = \frac{i_2 \cdot e_2}{E_1} = \frac{i_2 \cdot e_2}{i_1 \cdot e_1 \cdot \cos \varphi}.$$

Hierin bedeuten i_1 bzw. e_1 den primären Strom bzw. die primäre Spannung und φ den Winkel der Phasenverschiebung des primären Stromes gegen die primäre Klemmenspannung. Der scheinbar zu-

¹⁾ Siehe Kapp, Transformatoren für Wechselstrom und Drehstrom.

geführte Effekt ist $i_1 \cdot e_1$ und das Verhältnis des wirklichen mit dem Wattmeter bestimmten Effektes E_1 zum scheinbaren Effekt, welches als Leistungsfaktor bezeichnet wird, ist

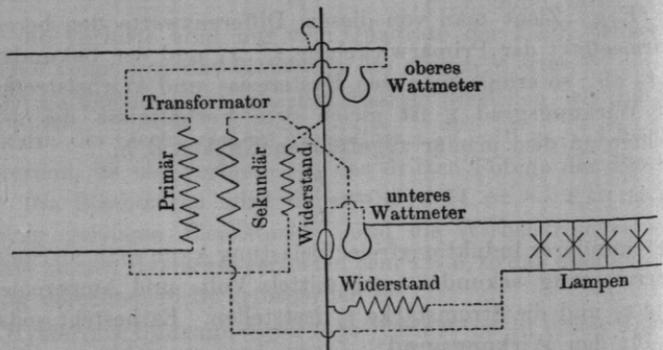
$$(4) \dots \dots \dots \cos \varphi = \frac{E_1}{i_1 \cdot e_1} .$$

Die Methode der direkten Messung von primärer und sekundärer Energie hat indes den Nachteil, daß Fehler von etwa 2 Proz. in den gemessenen Größen und Ungenauigkeiten nie ausgeschlossen sind. Schon bei Prüfung von Gleichstrommaschinen wurde konstatiert, daß man zu genaueren Resultaten kommt, wenn die Verluste unmittelbar bestimmt werden und daraus der Wirkungsgrad berechnet wird. Der Vorteil der letzteren Bestimmungsart ist um so augenscheinlicher, je größer der Wirkungsgrad, d. h. je kleiner im Verhältnisse die Verluste sind. Der Transformator hat nun unter den in der Technik gebräuchlichen Energieumwandlern den höchsten Wirkungsgrad, und ist es somit besonders wünschenswert, die Verluste bei demselben direkt zu ermitteln. Es ist daher ratsam, den Wirkungsgrad durch folgende Relation

$$(5) \dots \dots \dots \eta = 1 - \frac{E_1 - E_2}{E_1} = 1 - \frac{E_d}{E_1}$$

festzustellen. E_d bedeutet hier den Verlust im Transformator; das Verhältnis $\frac{E_d}{E_1}$ ist von der Größenordnung von etwa 0,03; somit ergibt sich bei einem Fehler von etwa 1 Proz. für die Größe E_d oder E_1 ein solcher für den Wirkungsgrad η im Betrage von etwa 0,03 Proz.

Fig. 131.



Dieses Ergebnis führt naturgemäß zu der Anwendung der Differentialwattmetermethode von Kenelly¹⁾. Wie aus der obenstehenden Schaltung (Fig. 131) hervorgeht, mißt das obere Wattmeter die eingeleitete, das untere die abgegebene elektrische Energie. Die beweglichen Spulen beider Wattmeter sind nun starr verbunden. Bei gleicher

¹⁾ Siehe E. T. Z. 1893, S. 164.

Empfindlichkeit beider Wattmeter entspricht sodann die Ablenkung des Torsionskopfes der Differenz der Effekte, d. h. dem gesamten Verluste E_d . Um die gegenseitige Induktion der oberen festen auf die untere bewegliche und der oberen beweglichen auf die untere feste Spule zu eliminieren, werden die Spulen der Wattmeter rechtwinkelig gegeneinander aufgestellt und außerdem Hilfsspulen eingeschaltet, durch welche eine Kompensation (der Induktion) bewirkt wird. Die Kompensation sowohl als auch die Abgleichung der Wattmeter durch eingefügte induktionsfreie Widerstände müssen vor jeder Messung erfolgen.

Stehen zwei gleiche Transformatoren zur Verfügung — was in der Praxis ja seltener, in einer elektrotechnischen Fabrik jedoch fast immer der Fall sein wird —, so kann man in folgender Weise vorgehen. Man schaltet die beiden Hochspannungswicklungen gegeneinander (Fig. 132) und mißt an den Niederspannungswicklungen den zugeführten bzw. den geleisteten elektrischen Effekt. Das Verhältnis des geleisteten zum zugeführten Effekte, d. h. der gesamte Wirkungsgrad η_g ist dann dem Produkt der einzelnen Wirkungsgrade (η_1, η_2) der beiden Transformatoren gleich, d. h.

$$\eta_g = \eta_1 \cdot \eta_2,$$

η_1 und η_2 sind als nahezu gleich anzunehmen. Ist ein kleiner Unterschied vorhanden, so ergibt die Wurzel aus η_g als Wirkungsgrad der einzelnen Transformatoren einen Mittelwert aus η_1 und η_2 ,

$$\eta = \sqrt{\eta_1 \cdot \eta_2} = \sqrt{\eta_g}.$$

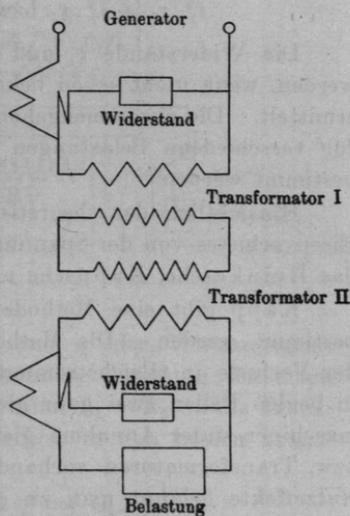
Der Meßfehler wird durch dieses Verfahren wesentlich reduziert. Bei etwa erforderlichen Wattmeterkorrekturen ist zu beachten, daß der Effektverbrauch der Spannungsspule (ϵ_1 bzw. ϵ_2) vom aufgenommenen Effekte E_1 abziehen bzw. zu dem abgegebenen Effekte E_2 zu addieren ist, wenn die Schaltung wie nebenstehend ausgeführt wird. Der Wirkungsgrad η ergibt sich aus der Beziehung

$$\eta = \sqrt{\frac{E_2 + \epsilon_2}{E_1 - \epsilon_1}}.$$

Wie schon erwähnt, führt die direkte Ermittlung der Verluste behufs Bestimmung des Wirkungsgrades zu genaueren Resultaten als die eben beschriebene Methode; es seien daher diese Methoden hier behandelt.

Die einfachste dieser Methoden beruht auf der getrennten Ermittlung der Eisen- und Kupferverluste. Die ersteren sind so gut wie un-

Fig. 132.



abhängig von der Größe der Belastung, sofern nur die primäre Spannung konstant ist; die Eisenverluste können also durch Bestimmung des Leerlaufeffektes gewonnen werden. Allerdings enthält der Leerlaufeffekt auch noch den Ohmschen Verlust durch den Leerlaufstrom, doch ist dieser Teil bei magnetisch geschlossenen Transformatoren gegenüber den tatsächlichen Eisenverlusten verschwindend klein und braucht nicht besonders berücksichtigt zu werden; bei magnetisch offenen Transformatoren ist der Verlust durch Leerlaufstrom (i_e) in die Rechnung einzuführen. Der Leerlaufeffekt wird zweckmäßig von der Niederspannungsseite aus mit einem Wattmeter gemessen. Die Kupferverluste, d. h. der zweite Teil der Effektverluste, sind mit der Belastung variabel; sie sind, wenn i_1 und i_2 die primäre und sekundäre Stromstärke bezeichnen, dargestellt durch:

$$i_1^2 \cdot r_1 + i_2^2 \cdot r_2 \text{ bzw. für Leerlauf durch } i_2^2 \cdot r_1.$$

Die Widerstände r_1 und r_2 der Primär- und Sekundärwicklung werden, wenn nicht schon bekannt, nach einer der üblichen Methoden ermittelt. Die zusammengehörigen Werte der Ströme i_1 und i_2 können für verschiedene Belastungen durch entsprechende Amperemessungen bestimmt werden.

Hinsichtlich der theoretischen Beziehungen der Abhängigkeit des Eisenverlustes von der Spannung und der Wechselzahl verweise ich auf das Heinkesche, Kappsche und Feldmannsche Werk¹⁾.

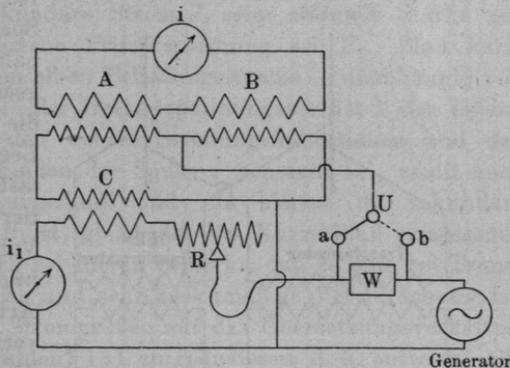
Kapp gibt eine Methode an, bei der die Gesamtverluste direkt bestimmt werden. Die Methode wird analog auch zur Bestimmung der Verluste in Gleichstrommaschinen angewandt. Allerdings müssen in beiden Fällen zwei ganz gleiche Transformatoren bzw. Gleichstrommaschinen unter Annahme gleichen Wirkungsgrades beider Maschinen bzw. Transformatoren vorhanden sein. Bei kleinen Unterschieden im Nutzeffekte gelangt man zu einem Mittelwerte des Nutzeffektes, was häufig auch erwünscht ist. Das Prinzip der Methode ist für die Transformatoren folgendes: Die beiden gleichen Transformatoren werden hintereinander geschaltet, derart, daß die sekundär abgegebene elektrische Energie des ersten Transformators zum Betriebe des zweiten Transformators verwandt wird. Die sekundär abgegebene Energie des zweiten Transformators wird zum Betriebe des ersten benutzt. Ein derartiger Umlauf der elektrischen Energie ist aber nur möglich, wenn zur Deckung der Verluste in den beiden Transformatoren eine weitere Energiequelle (jedoch nur in der Größenordnung der Verluste) in den Kreis eingefügt wird. Zu dem Zwecke wird die sekundäre Wicklung eines kleinen Transformators mit den beiden Hochspannungswickelungen

¹⁾ Heinke, Wechselstrommessungen und magnetische Messungen. — Gisbert Kapp, Transformatoren für Wechselstrom und Drehstrom. — Feldmann, Wirkungsweise, Prüfung und Berechnung der Wechselstromtransformatoren.

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 η' 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 η 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