

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 24 (1933)  
**Heft:** 23

**Artikel:** Die Flussverteilung beim fünfschenkigen Transformator  
**Autor:** Goldstein, J.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1059548>

### **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:** 02.10.2025

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

Zum Schluss möchten wir noch eine allgemeine Frage aufwerfen. Bekanntlich ist es noch nicht sehr lange her, dass Schutzfragen bei Entwurf und Führung von Kraftwerkbetrieben als Nebensache behandelt wurden. Diese Einstellung hat sich bei den meisten Betriebsleitungen gründlich geändert. Man ist zur Einsicht gekommen, dass für die Behandlung solcher Fragen Spezialisten, und zwar hochqualifizierte Leute, benötigt werden. Wir möchten die Richtigkeit dieser Tendenz dadurch unterstreichen, dass wir nicht nur auf die theoretischen Schwierigkeiten der genannten Fragen hinweisen, sondern wiederholen, dass die Lösung kon-

kreter Schutzfragen eingehende Kenntnis des Betriebes und der verfügbaren Schutzmittel voraussetzt. Beides dürfte unsere Studie zur Genüge belegen. Wegen dieses Zusammenhanges haben aber auch die konstruierenden Firmen eine eingehende Orientierung über Schwierigkeiten und Bedürfnisse der Betriebe nötig, wenn sie vollwertige Schutzmittel sollen schaffen können. Dass eine richtige Zusammenarbeit von Betriebsmann und Konstrukteur auf dem Gebiet der Schutztechnik auch volkswirtschaftlich von grossem Wert wäre, braucht wohl nur angedeutet zu werden.

## Die Flussverteilung beim fünfschenkigen Transformator.

Von Dr. J. Goldstein, Zürich.

621.314.21

*Bei Grosstransformatoren macht das Einhalten der durch die Bahnverwaltungen vorgeschriebenen maximalen Bauhöhe Schwierigkeiten. Man fand dadurch eine Lösung, dass Drehstromtransformatoren grosser Leistung fünfschenklig ausgeführt werden, wodurch die Höhe der Joche wesentlich reduziert werden kann.*

*Im folgenden werden Betrachtungen über die Vorausberechnung der Induktionen und die Aufteilung der Schenkelflüsse auf die Joche und die Aussenschenkel (die nur magnetischer Rückschluss sind und keine Wicklungen tragen) angestellt. Es werden ferner Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an fünfschenkigen Grosstransformatoren der AEG verwertet und mit den errechneten Werten verglichen.*

### Allgemeines.

Bekanntlich hat die Fünfschenkel-Type im Grosstransformatorenbau eine grosse praktische Bedeutung für Drehstromtransformatoren erlangt. Durch die Anordnung des vierten und fünften Schenkels war man in der Lage, das Hauptjoch schwächer zu dimensionieren und in der Bauhöhe des Grosstransformators nicht unwesentliche Ersparnisse zu erzielen. Auf diese Ersparnisse in der Bauhöhe ist man angewiesen, wenn man den Transformator komplett im Kasten mit Oelfüllung bei nur abmontierten Durchführungen bahntransportfähig bauen will. So ist die Bauhöhe dem Konstrukteur als Höchstmass vorgeschrieben und er muss sich wohl oder übel mit der Bemessung der Joche und Jochsäulen (eine von Vidmar für den vierten und fünften Schenkel eingeführte Bezeichnung) befassen. Es handelt sich um eine Aufteilung der Schenkelflüsse in Teilflüsse. Dabei ist die Bestimmung der Sättigung, der Verluste und eine Einschätzung der Flusskurvenform in den Jochen und Jochsäulen, besonders aber eine Vorausberechnung der Verluste von grosser Wichtigkeit.

Es sind bereits einige Arbeiten über den fünfschenkigen Transformator veröffentlicht worden<sup>1)</sup>. Eine erschöpfende Erforschung der schwierigen magnetischen Probleme findet man im Aufsatz von Vidmar<sup>1)</sup>.

Vorliegende Arbeit behandelt nur einen kleinen Ausschnitt der Flussaufteilung auf Grund vereinfachter, auch für den nicht ganz Eingeweihten

*Les hauteurs maximum prescrites par les entreprises de transports ferroviaires sont une source de difficultés pour la construction de gros transformateurs. Une solution de ce problème consiste à prévoir cinq colonnes pour les transformateurs triphasés, ce qui permet de réduire sensiblement la hauteur des culasses.*

*Dans cet article, l'auteur traite de la prédétermination de l'induction et de la répartition du flux dans les culasses et dans les deux colonnes supplémentaires (qui ne servent qu'à fermer le circuit magnétique et ne portent pas d'enroulements) et compare aux valeurs calculées les valeurs déterminées par des essais sur de gros transformateurs à cinq colonnes de l'AEG.*

zugänglicher Vorstellungen. Ferner werden Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an fünfschenkigen Grosstransformatoren verwertet und mit den errechneten Werten verglichen. Nach dieser Methode kann man in erster Annäherung die Sättigung und Verluste im fünfschenkigen Transformator vorausberechnen. Wegen der Vorausberechnung der Flussverzerrungen in den Jochen und Jochsäulen kann auf die Arbeit von Stein<sup>1)</sup> verwiesen werden. Diese Fragen werden im Aufsatz nur durch oszillographische Aufnahmen erläutert.

### 1. Das Flussdiagramm und die Flussaufteilung.

Wir legen den weiteren Betrachtungen eine für Fünfschenkel-Transformatoren schon aus anderen Gründen praktisch allein in Frage kommende in Dreieck geschaltete Erregerwicklung zugrunde. Dadurch sind zunächst einmal die Flüsse in den drei Hauptschenkeln des fünfschenkigen Drehstromtransformators eindeutig festgelegt. Für die Flussverteilung in den Jochen und Jochsäulen sind die Kirchhoffschen Verzweigungsgleichungen anzuwenden. Dabei gelten die Betrachtungen für Momentanwerte und es ist die Phasenlage der Flüsse noch durch vektorielle Beziehungen zu ermitteln.

Wie im folgenden gezeigt werden soll, kann man durch eine Komponentenzerlegung<sup>2)</sup> die Rechnung in Anlehnung an einphasige Verhältnisse noch einfacher als oben angedeutet gestalten. Die drei Schenkelflüsse  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  (Fig. 1) lassen sich

<sup>2)</sup> Die Anregung zu diesem Verfahren verdanke ich Herrn Dr. Willheim.

<sup>1)</sup> Siehe Literaturverzeichnis am Schluss.

als ein geschlossenes Dreieck darstellen. Die Flüsse sind an die aufgedrückten Spannungen gebunden, und da wir die  $\Delta$ -Schaltung für das erregende System angenommen haben, ist hierdurch auch das

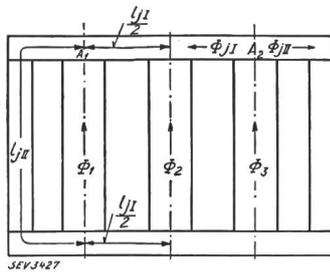


Fig. 1. Fünfschenkler Kern.

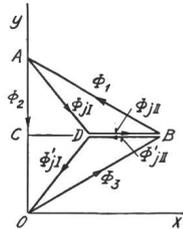


Fig. 2. Flussdiagramm des fünfschenkler Transformators.

Flussdiagramm festgelegt. Diese Annahme entspricht in der Regel der praktischen Ausführung, da man bei Grosstransformatoren aus bekannten Gründen mindestens eine Wicklung als  $\Delta$ -Wicklung ausführt, sei es eine der Hauptwicklungen oder die Tertiärwicklung. Betrachtet man im Vektordiagramm Fig. 2 getrennt die vertikalen und horizontalen Komponenten der Flüsse, so ergeben sich die folgenden magnetischen Teilbilder. Zunächst sei noch bemerkt, dass die Jochsäulenflüsse  $\Phi_{jII}$  keine vertikalen Komponenten von  $\Phi_2$  enthalten können. Es wird nämlich wegen der vorgeschriebenen Spannungen in dem ersten und dritten Schenkel je  $\frac{\Phi_2}{2}$  absorbiert, daher muss  $\Phi_{jII}$  senkrecht zur Richtung  $\Phi_2$  stehen. Dem Knotenpunkt  $A_1$  ist im Vektordiagramm das  $\Delta ADB$  zugeordnet. Analog ist dem Knotenpunkt  $A_2$  das  $\Delta ODB$  zugeordnet. Die Flüsse in den Jochsäulen sind entgegengesetzt gerichtet.

Betrachten wir zuerst die vertikalen Komponenten ( $y$ -Richtung). Der Fluss  $\Phi_2$  hat seinen vollen Wert  $\Phi$ ; im ersten und dritten Schenkel fließt je  $\frac{\Phi}{2}$  (Strecke  $AC$  in  $\Delta ABC$ ). Die Jochsäulen führen keinen Fluss, die Joche je  $\frac{\Phi}{2}$ . Fig. 3 zeigt schematisch diesen Flussverlauf.

Die horizontalen ( $x$ -Richtung) Komponenten sind für den ersten und dritten Schenkel  $\frac{\Phi \sqrt{3}}{2} = BC$ , für den zweiten Schenkel ist die Horizontalkomponente Null. Der Fluss  $\frac{\Phi \sqrt{3}}{2}$  muss sich in zwei Teilflüsse  $CD + DB$  aufteilen. Ein Teil fließt über die Joche, der restliche Teil über die Jochsäulen. Bezeichnen wir den ersten Fluss (Horizontalkomponente) mit  $\Phi_{jIH} = CD$  und den zweiten Fluss mit  $\Phi_{jII} = DB$ , so besteht noch für den gesamten Jochfluss  $\Phi_{jI}$  die Beziehung

$$AD = \Phi_{jI} = \sqrt{\left(\frac{\Phi}{2}\right)^2 + \Phi_{jIH}^2} \quad (1)$$

Der Verlauf der horizontalen Flusskomponenten ist in Fig. 4 dargestellt. Man erkennt hier den wahren Sinn der Fünfschenkel-Konstruktion bzw. die Parallelschaltung der Joche und der Jochsäulen.

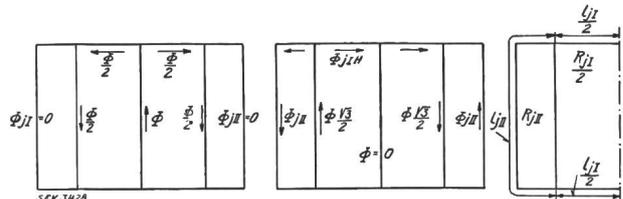


Fig. 3. Verlauf der vertikalen Flusskomponenten.

Fig. 4. Verlauf der horizontalen Flusskomponenten.

Fig. 5. Schema der magnetischen Widerstände.

Die Aufteilung des Flusses  $\frac{\Phi \sqrt{3}}{2}$  kann an Hand des Ersatzschemas Fig. 5 vorgenommen werden. Zu diesem Zweck führen wir noch folgende Bezeichnungen ein:

- $l_{jI}$  doppelte Jochweglänge in cm;
- $l_{jII}$  Jochsäulenweglänge in cm;
- $q_{jI}$  Jochquerschnitt in  $\text{cm}^2$ ;
- $q_{jII}$  Jochsäulenquerschnitt in  $\text{cm}^2$ ;
- $Q$  Schenkelquerschnitt in  $\text{cm}^2$ ;
- $l$  Schenkellänge in cm;
- $\mu$  entsprechende Permeabilität;
- $R_{jI}$  magnetischer Widerstand des oberen und unteren Jochteilstückes;
- $R_{jII}$  magnetischer Widerstand einer Jochsäule.

Die Teilflüsse  $\Phi_{jIH}$  und  $\Phi_{jII}$  sind dann durch folgende Ausdrücke gegeben:

$$\Phi_{jIH} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} \Phi}{R_{jI} + R_{jII}} \cdot R_{jII} \quad (2)$$

$$\Phi_{jII} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} \Phi}{R_{jI} + R_{jII}} \cdot R_{jI}$$

Wird der Kern ohne Stossfugen, also als eingeschichteter Kern ausgeführt, so sind die Widerstände aus den Abmessungen wie folgt zu ermitteln:

$$R_{jI} = \frac{l_{jI}}{\mu_{jI} q_{jI}} \quad R_{jII} = \frac{l_{jII}}{\mu_{jII} q_{jII}}$$

Danach erhält man

$$\Phi_{jIH} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} \Phi}{\frac{l_{jI}}{\mu_{jI} q_{jI}} + \frac{l_{jII}}{\mu_{jII} q_{jII}}} \cdot \frac{l_{jII}}{\mu_{jII} q_{jII}} \quad (3)$$

$$\Phi_{jII} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} \Phi}{\frac{l_{jI}}{\mu_{jI} q_{jI}} + \frac{l_{jII}}{\mu_{jII} q_{jII}}} \cdot \frac{l_{jI}}{\mu_{jI} q_{jI}}$$

und  $\Phi_{jI}$  nach Gleichung (1).

Die Berücksichtigung einer Stossfuge  $\delta$  erfordert eine Korrektur im Ausdruck  $R_{jII}$ , und zwar wird

$$R_{jII} = \frac{l_{jII}}{\mu_{jII} q_{jII}} + \frac{2 \delta}{q_{jII}}$$

Nun sind die Permeabilitäten  $\mu_{jI}$  und  $\mu_{jII}$  unbekannte Grössen und bei der entsprechenden Magnetisierung, die wir auch nicht kennen, aus den Permeabilitätskurven zu entnehmen. Macht man aber zur Vereinfachung die Annahme gleicher Permeabilität in den Jochen und Jochsäulen, also  $\mu_{jI} = \mu_{jII}$ , so werden die Beziehungen (3) wesentlich einfacher.

Man erhält nämlich

$$\Phi_{jIH} = \frac{\sqrt{3} \Phi}{2} \frac{q_{jI} l_{jII}}{l_{jI} q_{jII} + l_{jII} q_{jI}}$$

und da nach Gleichung (1)

$$\Phi_{jI} = \sqrt{\left(\frac{\Phi}{2}\right)^2 + \Phi_{jIH}^2},$$

so wird

$$\Phi_{jI} = \frac{\Phi}{2} \sqrt{1 + k^2}, \text{ wo } k = \frac{\sqrt{3} q_{jI} l_{jII}}{l_{jI} q_{jII} + l_{jII} q_{jI}}$$

und schliesslich

$$\Phi_{jII} = \frac{\sqrt{3} \Phi}{2} \frac{q_{jII} l_{jI}}{l_{jI} q_{jII} + l_{jII} q_{jI}} \tag{4}$$

Wie ersichtlich, kann man nach diesen Gleichungen die Teilflüsse  $\Phi_{jI}$  und  $\Phi_{jII}$  ermitteln, wenn der Schenkelfluss bzw. sein Scheitelwert  $\Phi$  und die Abmessungen des Kernes bekannt sind. Diese angenäherte Rechnung muss noch eine Korrektur erfahren, die der Verschiedenheit der Permeabilität in den Jochen und Jochsäulen Rechnung trägt. Man kann zu den in erster Annäherung ermittelten Flusswerten die entsprechenden Permeabilitäten aus der Magnetisierungskurve ermitteln und mit den so erhaltenen Werten nach den Gleichungen (3) die Flussermittlung wiederholen. Es zeigt sich aber, dass auch bei mehrfacher Wiederholung mit diesem Verfahren nicht immer eine konvergierende Reihe zu erzielen ist.

2. Die Berichtigung unter Berücksichtigung der wahren Permeabilität und der Vergleich mit praktischen Ausführungen.

Man kann auf Grund der Abmessungen und der Flussverteilung leicht einsehen, in welcher Richtung die Annahme gleicher Permeabilität im Joch und den Jochsäulen zu berichtigen sein wird. Die Jochsäulen bieten dem Rückfluss wegen ihrer grösseren Länge einen wesentlich höheren magnetischen Widerstand als die Joche. Nun aber bedeutet die Annahme gleicher Permeabilität für die Joche und die Jochsäulen für letztere eine zu hohe Einschätzung ihres magnetischen Widerstandes. In Wirklichkeit wird das den Fluss  $\Phi_{jI}$  führende Hauptjoch stärker gesättigt und dadurch eine Erhöhung des magnetischen Widerstandes erfahren. Es schützt

sich gewissermassen selbst vor magnetischer Ueberlastung und verschiebt einen Teil der horizontalen Komponente des Rückflusses nach den Jochsäulen. So kommt es, dass der durch diese gehende Fluss höher ausfällt, als er nach den Formeln (4) sich ergibt. Für die Jochflüsse gilt das gegenteilige. Nun kann man die tatsächliche Flussverteilung auf folgende Weise bestimmen. Wir wenden uns wieder dem Vektordiagramm der Flüsse in Fig. 2 zu. Es ist daraus zu ersehen, dass für die Flussverteilung in den Jochen und Jochsäulen die vektoriellen Gleichungen

$$\begin{aligned} \Phi_{jI} + \Phi_{jII} &= \Phi_1 = \Phi_3 \\ \Phi_{jI} + \Phi'_{jI} &= \Phi_2 \end{aligned} \tag{5}$$

erfüllt sein müssen.

Jeder Lage des Punktes  $D$  auf der Geraden  $BC$  entspricht eine «mögliche» Flussverteilung. Unter den «möglichen» wird es eine und nur eine geben, die wir als «tatsächliche» Flussverteilung bezeichnen. Für letztere gilt nämlich eine Nebenbedingung, die man am besten aus dem Schema der horizontalen Flusskomponenten in Fig. 4 ableiten kann. Da für diese Achsenrichtung die «magnetische Durchflutung» im mittleren Schenkel 2 gleich Null ist, so gilt für die magnetomotorischen Kräfte eine Beziehung, der die «tatsächliche» Flussverteilung Genüge leisten muss.

Bezeichnen wir mit

- $H_{jII}$  die Feldstärke in AW/cm<sub>eff</sub> in den Jochsäulen,
  - $H_{jIH}$  die Horizontalkomponente der Feldstärke in AW/cm<sub>eff</sub> in den Jochen,
  - $w_1$  die Windungszahl,
  - $I_1 w_1$  die Horizontalkomponente der Durchflutung im Schenkel 1,
  - $H_1$  die Horizontalkomponente der Feldstärke in Schenkel 1,
- so gilt offensichtlich

$$\begin{aligned} I_1 w_1 &= H_{jII} \cdot l_{jII} + H_1 l_1 \\ I_1 w_1 &= H_{jIH} \cdot l_{jI} + H_1 l_1 \end{aligned}$$

und hieraus

$$\underline{H_{jII} \cdot l_{jII} = H_{jIH} \cdot l_{jI}} \tag{6}$$

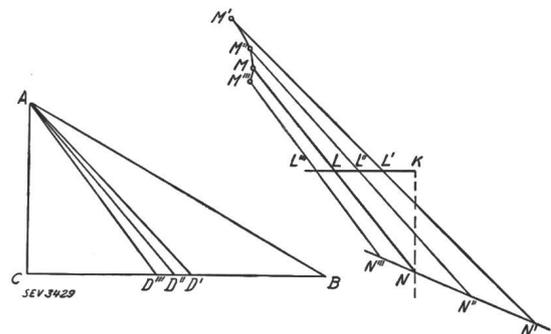


Fig. 6. Flussdiagramm.

Fig. 7. Diagramm der magnetomotorischen Kräfte.

Der praktische Gang des Verfahrens wird sich so gestalten:

Unter Annahme von Induktionswerten in den Jochsäulen für eine Anzahl möglicher Fälle (etwa

3) werden die Flüsse  $\Phi_{jII}$  ermittelt. Im Flussdiagramm Fig. 6 sind diese Flüsse mit  $BD'$ ,  $BD''$ ,  $BD'''$  gekennzeichnet. Die entsprechenden Jochflüsse sind  $AD'$ ,  $AD''$  und  $AD'''$ . Diesen Flüssen entsprechen bei bekannten Querschnitten Induktionen, zu denen man aus der Wechselstrommagnetisierungskurve die Feldstärken  $H_{jI}$  bestimmen kann. Nun kann man das Diagramm der magnetomotorischen Kräfte zeichnen (Fig. 7). Für die drei möglichen Fälle sind die Werte  $H_{jII}$  aus der Magnetisierungskurve entsprechend den Induktionen zu entnehmen. Man erhält auf diese Weise  $H_{jII} \cdot l_{jII} = KL'$ ,  $KL''$  und  $KL'''$ . Jedem dieser Werte entspricht ein Wert  $H_{jI} \cdot l_{jI}$ . Unter Beibehaltung der Richtung aus dem Flussdiagramm werden die Strecken  $H_{jI} \cdot l_{jI} = L'M'$ ,  $L''M''$  und  $L'''M'''$  konstruiert und zugleich auf den Verlängerungen als  $L'N'$ ,  $L''N''$  und  $L'''N'''$  aufgetragen. Auf der Verbindungslinie der drei Punkte  $N'$ ,  $N''$  und  $N'''$  findet sich durch Herabloten vom Punkte  $K$  offenbar der gesuchte Punkt  $N$ , für den die Bedingung 6 erfüllt ist. Die Abschnitte

$$KL = H_{jII} \cdot l_{jII}$$

$$LM = LN = H_{jI} \cdot l_{jI}$$

liefern dann die «tatsächlichen» Feldstärken und schliesslich unter Zuhilfenahme der Magnetisierungskurve die tatsächlichen Induktionen und Flüsse. Bei gestossenem Kern wird den Luftfugen  $\delta$  in den Jochsäulen auf folgende Weise Rechnung getragen: Man erhält anstatt Gleichung (6) die Gleichung

$$H_{jII} \cdot l_{jII} + 2 B_{jII} \cdot \delta = H_{jIH} \cdot l_{jI} \quad (6a)$$

Die an AEG-Fünfschenkel-Transformatoren grösster Leistungen (40 000 bis 100 000 kVA) ausgeführten Messungen ergeben Resultate, an denen man die Brauchbarkeit der zuletzt ausgeführten Berichtigungsmethode bestätigen kann. Die Messungen wurden an Kernen mit Hilfswicklungen ausgeführt.

Ueber die Flussmessung muss folgendes gesagt werden: Es genügt nicht, um den entsprechenden Jochteil eine Hilfswicklung zu legen und daran die Spannung zu messen, was nur bei sinusförmigem Flussverlauf zulässig wäre. Nun führen aber die Joche und Jochsäulen, wie aus den Oszillogrammen Abb. 8 ersichtlich ist, Flüsse verzerrter Kurvenform. In diesen Fällen ist das Spannungsozillogramm kein Abbild für den Fluss. Es gilt vielmehr nach der Beziehung:

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8}$$

$\Phi$  durch ein Integrationsverfahren zu ermitteln. In den Oszillogrammen Fig. 8 sind jeweils die betreffenden Spannungs- und Flusskurven aufgenommen. Zur Fixierung der Phasenlage ist jeweils auch die Spannungskurve  $e_s$  des betreffenden Hauptschenkels aufgenommen worden. Die in dieser Kurve enthaltenen Oberwellen rühren von Nutzenharmonischen des verwendeten 15 000 kVA-Generators her. Es ist interessant festzustellen, dass der Joch- und Joch-

säulenfluss wegen der Knotenpunktsbedingung in  $A$  sich zu einem sinusförmigen Fluss zusammensetzen.

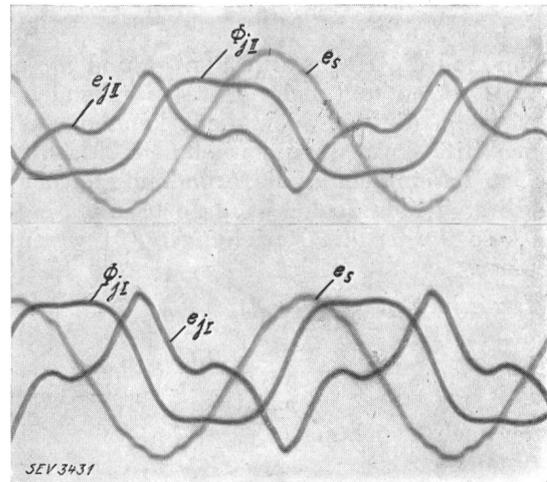


Fig. 8. Oszillogramme:

- |                               |                         |
|-------------------------------|-------------------------|
| Oben:                         | Unten:                  |
| $\Phi_{jII}$ Jochsäulenfluss. | $\Phi_{jI}$ Jochfluss.  |
| $e_s$ Schenkelspannung.       | $e_s$ Schenkelspannung. |
| $e_{jII}$ Jochsäulenspannung. | $e_{jI}$ Jochspannung.  |

Es gilt für die Momentanwerte:

$$\varphi_s = \varphi_{jI} + \varphi_{jII}$$

Die Addition der Kurven  $\varphi_{jI}$  und  $\varphi_{jII}$  ergibt, wie aus Fig. 9 ersichtlich, tatsächlich einen sinusförmigen Fluss. Dieser Fluss ist ja an die sinusförmige Spannungskurve des Schenkels gebunden. Hingegen bestehen für die Jochteile einzeln — Joch und Jochsäule — keine direkten zwangsmässigen

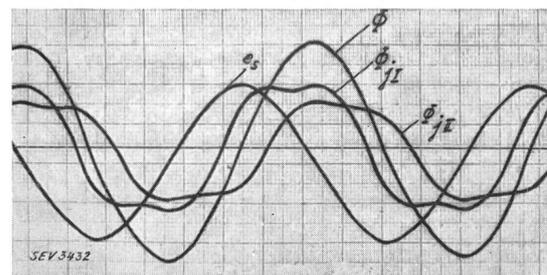


Fig. 9. Oszillogramm:

- |              |                  |
|--------------|------------------|
| $\Phi_{jI}$  | Jochfluss.       |
| $\Phi_{jII}$ | Jochsäulenfluss. |
| $\Phi$       | Summenfluss.     |

Bedingungen. Erst nach der Aufstellung und Behandlung der Durchflutungsgleichungen unter Zuhilfenahme der Magnetisierungskurve gelangt man zu den Flusskurven im Joch und in den Jochsäulen. Zur Aufnahme der Flusskurven bedient man sich zweckmässig eines Flussmeters<sup>3)</sup> — einer Drosselspule mit Luftspalt, die an eine Hilfswicklung des zu untersuchenden Transformators ange-

<sup>3)</sup> Stein, Ein neues Flussmeter, E. u. M. 1929, Heft 50.

geschlossen wird — und kann dann durch die oszillo-graphische Aufnahme eines Stromes direkt die Flusskurve des zu untersuchenden Kernteiles er-mitteln. Die Flussaufnahme muss der Bestimmung der Flussverteilung vorausgehen.

Bei der Auswertung der Flüsse muss noch fol-gendes beachtet werden: Der Rechnung wird immer ein Flußsichelwert zugrunde gelegt. Für den Schenkelfluss ist der Sichelwert eindeutig be-stimmt. Für die Jochflüsse müsste die betreffende Flusskurve erst in ihre Harmonischen zerlegt wer-den. Nun begeht man bei dem Flusskurvenverlauf nach Fig. 8 keinen grossen Fehler, wenn man den maximalen Wert des Flusses bestimmt. Zur zahlen-mässigen Auswertung benötigt man noch eine Fluss-eichung, die man am besten durch Aufnahme eines sinusförmigen Flusses bei bekannter Sättigung am Hauptschenkel vornimmt. Zu diesem Fluss werden dann die Teilflüsse in Beziehung gesetzt. Es ist übersichtlicher, wenn man die Teilflüsse  $\Phi_{j1}$  und  $\Phi_{j11}$  direkt in % des Schenkelflusses  $\Phi$  ausdrückt.

Die Gegenüberstellung der nach den Gl. (4) er-rechneten, bzw. der unter Zuhilfenahme des graphi-schen Verfahrens ermittelten und der tatsächlich bei einer Induktion von 13 000 Linien gemessenen Werte hat folgende Resultate ergeben, wobei die Abmessungen der Kerne bzw. die magnetischen Widerstände durch folgende Relationen charaktéri-siert waren:

$$0,9 q_{j1} \dots q_{j1} = q_{j11}; \frac{l_{j11}}{l_{j1}} = 1,6 \dots 1,7$$

$$\frac{q_{j1}}{Q} = 0,58 \dots 0,62$$

Werte	$\frac{\Phi_{j1}}{\Phi} 100 \%$	$\frac{\Phi_{j11}}{\Phi} 100 \%$
Errechnet nach Gl. (4) . .	74,6	31,2
Errechnet nach Gl. (5) u. (6)	64,0	46,6
Gemessen . . . . .	62,0	44,0

3. Die Verluste.

Nachdem die Flussverteilung ermittelt ist, kann man an Hand des Kernentwurfes auf Grund der Querschnitte und eines angenommenen Eisenschül-faktors die entsprechenden Induktionen in den Jochen und Jochsäulen ermitteln. Sind die Induk-tionen bekannt, so macht es keine Schwierigkeit, die Eisenverluste zu errechnen. Wegen der Fluss-form muss noch folgendes gesagt werden: Jeder

Eisenverlust-Rechnung liegt in der Regel sinusfö-rmige Flusskurvenform zugrunde. Wie wir gesehen haben, trifft diese Voraussetzung nur für die Schen-kel des fünfschenkligen Transformators zu. Wegen der Verzerrung der Flussform in den Jochen und Jochsäulen treten Mehrverluste auf. Die höheren Flussharmonischen verursachen eine Erhöhung des Wirbelstromanteiles der Verluste. Nun ist aber be-kanntlich bei den heute zur Verwendung kommen-den hochlegierten Transformatorblechen der An-teil der Wirbelstromverluste am gesamten Eisen-verlust nur ca. 20 %. Es würde sich bei der Er-höhung der Wirbelstromverluste infolge der ver-zerrten Kurvenform um eine Korrektur dieses An-teiles handeln. Rund 80 % der Eisenverluste sind Hysteresis-Verluste, die in erster Linie vom Sichel-wert der Induktion abhängen. Die rechnerische Berücksichtigung der Mehrverluste infolge der Kurvenform ist daher von untergeordneter Bedeu-tung. Man muss sich mit der Vorausberechnung unter Zugrundelegung der Maximalinduktion in den einzelnen Kernteilen begnügen. Bekannt-weise wird der Eisenverlust unter der Annahme einer bestimmten Verlustziffer (W/kg) für die ent-sprechende Eisensorte ermittelt. Es ist im Interesse genauerer Umrechnung zweckmässig, diese Verlust-ziffer bei 13 000 Linien zu kennen. Dann wird für den entsprechenden Kernteil  $x$  mit dem Gewicht  $G_x$  in kg der Verlust bei 50periodigem Wechsel-strom

$$P_x = G_x \cdot v_{13} \cdot \left( \frac{B_x}{13\ 000} \right)^2,$$

wo  $v_{13}$  die Verlustziffer bei 13 000 Linien und  $B_x$  die ermittelte Induktion für diesen Kernteil be-deuten.

Schliesslich gibt eine Summation

$$P = \Sigma \cdot G_x \cdot v_{13} \cdot \left( \frac{B_x}{13\ 000} \right)^2$$

über alle Kernteile den Gesamtverlust für den Kern.

Literatur.

1. Vidmar: Der fünfschenklige Eisenkern des dreiphasi-gen Grosstransformators. Arch. Elektrot. 1931, Heft 5.
2. Stein: Ueber die Flussverteilung und den zeitlichen Verlauf der Magnetisierungsströme in drei- und fünfschen-kligen Drehstromtransformatoren. ETZ 1929, Heft 33.
3. Küchler und Stallmann: Die Feldkurven und Verluste des fünfschenkligen Grosstransformatorenkernes, ETZ 1927, Heft 10.
4. Klein: Die magnetische Flussverteilung im fünfschen-kligen Transformatorenkern. ETZ 1923, Heft 46.

Technische Mitteilungen. — Communications de nature technique.

Bericht über die Teiltagung der Weltkraftkonferenz (WPC) in Skandinavien vom 26. Juni bis 10. Juli 1933.

62(06)

Die Teiltagung der Weltkraftkonferenz in Skandinavien, welche in Verbindung mit dem 1. internationalen Talsperren-kongress abgehalten wurde, vereinigte die Vertreter aller

Länder, welche sich mit der Frage der Energieversorgung der Grossindustrie und des Transportwesens befassen.

Die Beteiligung an der Konferenz war über alles Er-warten gross; ca. 1000 Teilnehmer (von welchen 200 Damen) aus 41 Staaten folgten der Einladung des Schwedischen Nationalkomitees, ein Beweis, dass das Ziel der Weltkraft-konferenz, in internationaler Zusammenarbeit die technischen und wirtschaftlichen Fragen der Energieverwertung, um-