

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 27 (1936)  
**Heft:** 4

**Artikel:** Transformatoren mit magnetischen Nebenschlüssen  
**Autor:** Wirz, E.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1061472>

### **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:** 03.04.2026

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

Unter den Kenntnissen nehmen natürlich diejenigen der *Sprache* eine wichtige, jedoch nicht immer die wichtigste Stelle ein. Wer allerdings aufs Pflaster ins fremde Land geht, kann nicht auf eine Anstellung zählen, bevor er die Landessprache geläufig spricht und schreibt. Massgebend ist aber vor allem der unbeugsame Wille, die Sprachenfrage rasch und restlos zu lösen.

Diese lange Liste von Anforderungen (die z. T. auch für die Gattin des verheirateten Auswanderers gelten) kann man vielleicht kürzer zusammenfassen in dem Satze: «Nur gute, mutige Leute sollen sich für Ueberseestellen melden.» Aber woher kommt es, dass gerade jetzt, wo es im Inland an Arbeit hapert, gewisse Ausschreibungen überseeischer technischer Stellen in der Schweiz nur spärliche seriöse Anmeldungen hervorrufen und dass beispielsweise das Einwanderungskontingent der USA von den Schweizern unbenutzt bleibt? Dem Personalchef einer grossen Fabrik ist innerhalb von wenigen Wochen bei der Besprechung bestimmter Auslandsstellen von zwei tüchtigen jungen Leuten der gleiche Einwand entgegengehalten worden, nämlich: «Ja wissen Sie, ich habe unsere Berge so gern und fahre so gerne Ski». Ist das das Ergebnis der Ertüchtigung durch den Sport? Und vor

allem, ist diese sentimentale Anhänglichkeit zu den Bergen die wahre Liebe zum Vaterland, die wir von unserer Jungmannschaft erwarten dürfen? Mit welcher höherer Auffassung bringen andere diese Liebe zum Ausdruck, die unzähligen Pioniere schweizerischer Arbeit in aller Herren Länder, durch die eminenten Dienste, die sie ihren Landsleuten zu Hause täglich leisten als Vertreter schweizerischer Häuser, als Käufer unserer Produkte und als Förderer ganzer Industrien!

Wir wollen und dürfen nicht annehmen, dass unter unsern jungen Technikern der freie Pioniergeist vollkommen verschwunden ist. Es gibt unter ihnen zweifellos noch solche, die in sich die Kraft fühlen, fern von unsern schönen Schweizerbergen und ohne den Schutz von Vertragsparagrafen, ihren Weg durch das Leben zu suchen. Es ist der STS hoch anzurechnen, dass sie die Initiative ergreift, um gerade diesen Besten unter unserem Nachwuchs zu helfen. *Die STS fordert alle, die sich bei voller Beherzigung der oben ausgesprochenen Warnungen für geeignet halten, sich eine Stellung als Ingenieur oder Techniker in Südamerika zu schaffen, auf, sich bis Mitte März bei ihr (STS, Tiefenhöfe 11, Zürich 1) zu melden.*

Lv.

## Transformatoren mit magnetischen Nebenschlüssen.

Von E. Witz, Neuenstadt (Bern).

621.314.232

*Es wird ein Ueberblick über die Frage des magnetischen Nebenschlusses im Kreis der Wechselkraftflüsse eines Transformators gegeben und gezeigt, dass hierbei aus den Patentschriften vier verschiedene Gruppen von Transformatoren zu unterscheiden sind. Für die am wenigsten bekannte Gruppe, mit luftspaltfreien Nebenschlüssen, werden die für die Berechnung nötigen Beziehungen auf vektorgeometrischer Grundlage hergeleitet, welche auch auf den mit Luftstrecke versehenen Nebenschluss Anwendung finden, und die besonderen Merkmale besprochen. An einem kurzen Berechnungsbeispiel werden die Berechnungsergebnisse besprochen und erläutert.*

*L'auteur expose la question du shunt magnétique dans le circuit magnétique d'un transformateur. D'après les exposés d'invention, on peut distinguer quatre groupes différents de transformateurs. Pour le groupe le moins connu, avec shunts sans entrefer, l'auteur établit en notation vectorielle les relations nécessaires au calcul, relations qui peuvent aussi être appliquées aux shunts à entrefer, et en discute les caractères particuliers. A l'aide d'un exemple numérique, l'auteur explique la genèse de ses déductions.*

### I. Allgemeines.

#### 1. Die Typen der Streutransformatoren.

Durchblättert man die in- und ausländischen Patentschriften über die Transformatoren, im besonderen über die mit magnetischem Nebenschluss, so fällt die grosse Zahl dieser Schriften auf, obschon in der einschlägigen Fachliteratur nur sehr spärliche und mangelhafte Angaben zu finden sind. Diese Erscheinung kommt daher, dass der magnetische Nebenschluss für eine normale Transformator konstruktion wenig oder gar nicht in Betracht kommt und, zweitens, es sich hierbei um sehr komplizierte magnetische Vorgänge handelt, die im allgemeinen nicht sehr einfach mathematisch-physikalisch zu bearbeiten sind; wertvolle Erscheinungen blieben vielleicht deshalb für den Transformatorbau bisher verborgen.

An sich ist der magnetische Nebenschluss für den Transformator eine altbekannte Sache; seine

Entstehung reicht bereits in die Anfänge der Elektrotechnik zurück. Er wurde zu bereits seit langem bekannten Konstruktionen verwendet. Die bekannteste Konstruktion dieser Art ist der Transformator von Elihu Thomson, bei welchem die Primärwicklung fest, während die Sekundärwicklung beweglich angeordnet ist, so dass diese entsprechend der gewünschten Streuung eingestellt werden kann. Dieser Typ gehört zu der Gruppe von Transformatoren, welche ausschliesslich durch Luftstreuung reguliert werden.

Eine andere Art von Streutransformatoren derselben Gruppe sind mit festen Primär- und Sekundärwicklungen ausgestattet, bei welchen zwischen oder oberhalb oder unterhalb dieser Wicklungen besondere Hilfswicklungen angeordnet sind, die durch Verschieben eine Vergrösserung oder Verkleinerung der Streuung bewirken. Auch hierbei wird der Luftraum als Streupfadnebenschluss verwendet.

Eine weitere Art von Streutransformatoren sind die mit festen Primär- und Sekundärwicklungen, bei welchen zwischen die Wicklungen ein magnetischer Nebenschluss, bestehend aus Luft und Eisen, eingeschaltet wird. Solche Transformatoren haben in der Regel den Zweck, den Sekundärstrom zu begrenzen oder konstant zu halten, wobei vielfach in den Streukraftlinienweg noch Kupferplatten derart eingeschoben werden, dass diese wie eine Kurzschlusswicklung wirken, und zwar durch Verändern der Lage der Platte, mehr oder weniger stark.

Ordnen wir diese vorkommenden Streutransformatoren in bezug auf die Ausführung und Art des magnetischen Nebenschlusses, so können wir vier verschiedene Gruppen unterscheiden.

Zur *ersten Gruppe* gehören alle Streutransformatoren, bei welchen eine Veränderung der Streuung zwischen den Wicklungen durch Verschieben der Wicklungen gegeneinander erzielt wird, wobei der magnetische Streupfadnebenschluss vorwiegend

rungen meistens nicht oder nur sehr beschränkt erfüllt. Aus diesem Grunde wird diese Anordnung nur für spezielle Zwecke verwendet und die Leistung, für welche derartige Transformatoren gebaut werden können, ist wegen dem grossen Aufwand an Luftamperewindungen für den Nebenschluss beschränkt.

Bei der *dritten Gruppe* wird die Lösung des Problems nach Fig. 3 mit Hilfskern und Hilfswicklung in verschiedenen Anordnungen oder Kombinationen der Wicklungen versucht. Diese Wicklungen auf dem Streukern haben alle den Zweck, die Streuung auf ein bestimmtes Mass zu begrenzen und einen stabilen Betrieb zwischen der Primär- und Sekundärwicklung zu ermöglichen. Eine solche Regelung mit Hilfswicklung kann nie verlustfrei arbeiten, so dass der Mehraufwand an Kupfer und an Verlusten die Anwendung solcher Transformatoren beschränkt oder doch für viele Zwecke in Frage stellt. Auch die Grösse der Leistung wird

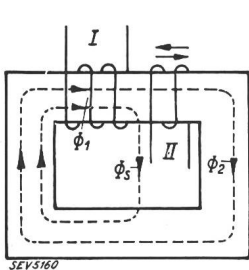


Fig. 1.  
Streutransformator mit verschiebbaren Wicklungen zur Streuungsregulierung (Gruppe 1).

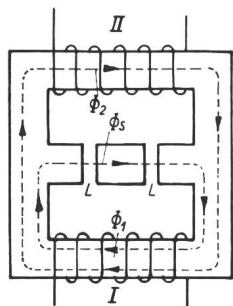


Fig. 2.  
Streutransformator mit magnetischem Nebenschluss bestehend aus Luft und Eisen (Gruppe 2).

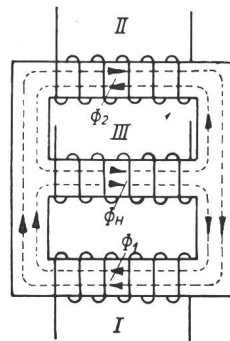


Fig. 3.  
Streutransformator mit magnetischem Nebenschluss und Hilfswicklung (III) zur Streuungsregulierung (Gruppe 3).

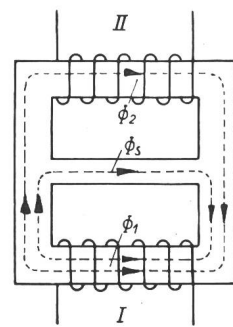


Fig. 4.  
Streutransformator mit luftspaltfreiem, magnetischem Nebenschluss, bei welchem die Kraftflüsse im umgekehrten Verhältnis zu den magnet. Widerständen beider Kreise stehen (Gruppe 4).

aus Luft besteht. In Fig. 1 ist diese Gruppe schematisch dargestellt; die Richtung der Pfeile gibt an, wie die Wicklung verschiebbar ist. Alle diese Anordnungen mit Luft als magnetischem Nebenschluss können in der Regel nicht eindeutig berechnet werden. Zufällige Änderungen am Gehäuse, Gestänge, aktiven Eisenkörper usw. können unter Umständen eine sehr grosse ungewollte Wirkung verursachen und das gewünschte Resultat verunmöglichen, namentlich wenn als Material für diese Teile Eisen verwendet wird. Dieser Umstand hatte offenbar zur Folge, dass diese Konstruktionen nur für sehr kleine Leistungen verwendet werden.

Bei der *zweiten Gruppe* sind die Wicklungen fest angeordnet; zwischen ihnen liegt der aus Luft und Eisen gebildete Nebenschluss (Fig. 2). Hierbei kann der Streupfadnebenschluss auch aus Eisenblechstücken bestehen, welche in beliebiger Zahl zwischen die Wicklungen eingeschoben werden, bis der gewünschte Grad der Streuung erreicht ist. Auch dieser Anordnung haftet eine grosse Unsicherheit an, da der stets überwiegende Luftweg des Nebenschlusses undefinierbare Verhältnisse mit sich bringt und deshalb die an ihn gestellten Anforder-

begrenzt sein, da der Mehraufwand an Material im Vergleich zum erzielten Gewinne sehr schnell mit zunehmender Leistung zu unwirtschaftlichen Konstruktionen führt und mittlere und grosse Leistungen zum vornherein ausschliesst.

Die *vierte Gruppe* besitzt einen luftspaltfreien Streustegnebenschluss (Fig. 4). Zu dieser Gruppe gehören nur sehr wenige Patente, welche sich nur in der Art der Ausführung der Streustege voneinander unterscheiden. Diese Anordnung hat den wesentlichen Vorteil vor den andern Gruppen, dass sie unter ganz bestimmten Voraussetzungen einen vollständig stabilen Betrieb zwischen der Primär- und Sekundärwicklung ermöglicht, die Streuung durch zweckmässige Wahl der magnetischen Verhältnisse auf jedes praktische Mass einstellen lässt und durch den einfachen Aufbau des ganzen Transformators für jede beliebige Leistung verwendbar wird, ohne dass die Verluste grösser als bei einem normalen Transformator werden und der Materialaufwand zu gross wird.

Aus dieser kurzen Beschreibung über diese vier verschiedenen Gruppen von Streutransformatoren geht hervor, dass die letzte Gruppe die einfachste

Konstruktion ist und es fragt sich nun, ob sie sowohl theoretisch als auch praktisch allen Anforderungen genügt, welche an sie gestellt werden können.

2. Anwendungsgebiet der Streutransformatoren.

In erster Linie wird ein mit vergrößerter Streuung versehener Transformator dann nötig sein, wenn die Sekundärseite betriebsmässig stossweiser Ueberlastung oder Kurzschlüssen ausgesetzt ist, wodurch im eigentlichen Transformator neben den elektrischen Ueberbeanspruchungen auch rein mechanische Schwingungen erzeugt werden, welche zusammen mit den elektrischen Beanspruchungen die Wicklungen gefährden. Als Beispiel sei der Lichtbogenschweisstransformator genannt, bei welchem sehr starke Stromschwankungen auftreten, die durch den Streutransformator gedämpft werden, ohne dass eine lästige Drosselspule in den Primärkreis oder Sekundärkreis eingeschaltet wird.

Weiter seien genannt Anlagen mit Handlampen, Beleuchtungsanlagen in Ställen und in feuchten Räumen, bei welchen stets die Gefahr besteht, dass durch Isolationsdefekte Kurzschlüsse ausgelöst werden, welche die Sicherungen zum Ansprechen bringen und damit die Anlagen ausser Betrieb setzen. In diesen Fällen kann durch Anwendung einer kleineren Betriebsspannung den Isolationsdefekten wirksam entgegengearbeitet werden, wobei der dazwischen geschaltete Streutransformator so dimensioniert werden muss, dass er dauernde Kurzschlüsse ertragen kann. Auch für Neon-Reklamebeleuchtung leistet der Streutransformator wertvolle Dienste, weil er die stets möglichen Schwingungen im Neonröhrenkreis dämpft, so dass ein sehr ruhiges Licht erzielt wird.

Bedenkt man ferner, dass auf der Sekundärseite eines guten Streutransformators im allgemeinen keine Sicherungen nötig sind, weil er Kurzschlüsse erträgt, so ergibt sich eine ausserordentlich weite Anwendungsmöglichkeit. Aber nicht nur für kleine, sondern auch für mittlere und grosse Anlagen kann der zweckmässig gebaute Streutransformator Bedeutung erlangen, da er eine viel grössere Betriebssicherheit garantiert und Schwingungen, die bei Störungen in den Leitungen entstehen, sofort dämpft.

In allen diesen Fällen zeigt sich, dass Transformatoren mit luftspaltfreiem Streusteg sich an alle Verhältnisse anpassen können und auf der Sekundärseite auftretende Kurzschlüsse aushalten, ohne dass bei Vollast der prozentuale Spannungsabfall die normalen Grenzwerte überschreitet. Bei Transformatoren mit Luftstrecken im Streusteg nimmt aber der Spannungsabfall so grosse Werte an, dass solche Transformatoren für Beleuchtungszwecke überhaupt nicht mehr in Frage kommen.

II. Der Streutransformator mit luftspaltfreiem magnetischem Nebenschluss.

Im folgenden sollen nun auf vektorgeometrischer Grundlage für den Streutransformator mit luftspalt-

freiem Streustegnebenschluss die Bedingungen für den Leerlaufzustand und für die Arbeitsweise bei Belastung aufgestellt werden.

1. Leerlaufzustand.

Die Primärwicklung (Fig. 5) mit der Windungszahl  $w_1$  werde an eine Primärspannung  $U_1$  gelegt, welche in der Primärwicklung eine EMK  $E_1$  und im Eisenkörper einen Wechselkraftfluss  $\Phi_1$  erzeugt. Ein Teil dieses Kraftflusses nimmt den Weg über den Streusteg mit dem Wert  $\Phi_{s0}$  und der grössere Teil fliesst über den Sekundärkreis mit dem Kraft-

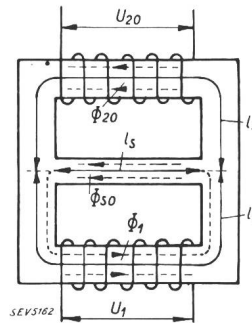


Fig. 5.

Schematische Darstellung d. Streutransformators mit magnetischem, luftspaltfreiem Nebenschluss mit ihren Kraftflüssen und ihren Kraftlinienwegen bei Leerlauf.

fluss  $\Phi_{20}$  und erzeugt in der Sekundärwicklung eine EMK  $E_{20}$ . Die Primärwicklung besitze einen ohmschen Widerstand  $R_1$  und eine Reaktanz  $X_1$ , so dass die Impedanz der Wicklung bestimmbar ist aus

$$\left. \begin{aligned} \mathfrak{Z}_1 &= R_1 + j X_1 = Z_1 \cdot e^{j\epsilon_1} \\ \text{wo } Z_1 &= \sqrt{R_1^2 + X_1^2} \\ \text{und } \text{tg } \epsilon_1 &= \frac{X_1}{R_1} \text{ ist.} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Fliesst im Primärkreis ein Wechselkraftfluss  $\Phi_1$ , so wird die Primärerregung definiert durch einen Eisenquerschnitt  $Q_1$  (cm<sup>2</sup>), eine Induktion  $B_1$ , eine mittlere Kraftlinienlänge  $l_1$  (cm), einen spezifischen Eisenverlust  $P_{v1}$  (W/kg) und eine Eisenamperewindungszahl  $Iw_1$  pro cm Kraftlinienlänge. Im Streusteg mit dem Leerlaufkraftfluss  $\Phi_{s0}$  ist die Streuerregung bestimmt durch einen Eisenquerschnitt  $Q_s$ , eine Eisenbeanspruchung  $B_{s0}$ , eine mittlere Kraftlinienlänge  $l_s$ , eine Eisenamperewindungszahl  $Iw_{s0}$  und einen Eisenverlust von  $P_{vs0}$  (W/kg). Schliesslich fliesst im Sekundärkreis bei Leerlauf ein Wechselkraftfluss  $\Phi_{20}$ , welcher bei einem Eisenquerschnitt  $Q_2$ , eine Eisenbeanspruchung  $B_{20}$  bei einer mittleren Kraftlinienlänge  $l_2$ , einer Eisenamperewindungszahl  $Iw_{20}$  und einen Eisenverlust von  $P_{v20}$  (W/kg) hervorbringt. Die Sekundärwicklung bestehe aus  $w_2$  Windungen. Die Impedanz der Sekundärwicklung ist bestimmt durch

$$\left. \begin{aligned} \mathfrak{Z}_2 &= R_2 + j X_2 = Z_2 \cdot e^{j\epsilon_2} \\ \text{wo } Z_2 &= \sqrt{R_2^2 + X_2^2} \\ \text{und } \text{tg } \epsilon_2 &= \frac{X_2}{R_2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Für die einzelnen EMKe der verschiedenen Kreise gelten die Beziehungen (der Index ' steht bei Grös-

sen, welche auf die Primärwicklung reduziert sind):

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= 4,44 \cdot 50 \cdot \Phi_1 \cdot w_1 \cdot 10^{-8} \text{ V} \\ E'_{s_0} &= 4,44 \cdot 50 \cdot \Phi_{s_0} \cdot w_1 \cdot 10^{-8} \text{ V} \\ E_{2_0} &= 4,44 \cdot 50 \cdot \Phi_{2_0} \cdot w_2 \cdot 10^{-8} \text{ V} \\ E'_{2_0} &= E_{2_0} \cdot \frac{w_1}{w_2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Für die Kraftflüsse und die induzierten EMKe ist vektoriell

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 &= \Phi_{2_0} + \Phi_{s_0} \\ \mathcal{G}_1 &= \mathcal{G}'_{2_0} + \mathcal{G}'_{s_0} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Ist  $\omega_1$  der magnetische Widerstand des Primärkreises,  $\omega_{2_0}$  derjenige des Sekundärkreises bei Leerlauf und  $\omega_{s_0}$  derjenige des Streukreises bei Leerlauf, so wirkt bei Leerlauf in diesen magnetischen Kreisen nur die magnetomotorische Kraft der Primärwicklung; für diese gilt

$$(\text{MMK})_1 = F_1 = \Phi_1 \cdot \omega_1 + \Phi_{2_0} \cdot \omega_{2_0} = \Phi_1 \cdot \omega_1 + \Phi_{s_0} \cdot \omega_{s_0} \quad (5)$$

woraus sich das Gesetz ergibt:

$$\frac{\Phi_{2_0}}{\Phi_{s_0}} = \frac{\omega_{s_0}}{\omega_{2_0}} \quad (6)$$

d. h. bei Leerlauf verhalten sich die Wechselkraftflüsse im Streusteg und im Sekundärkreis umgekehrt wie die zugehörigen magnetischen Widerstände.

Im allgemeinen rechnet nun der Elektrotechniker nicht gern mit magnetischen Widerständen, da diese einmal nicht direkt messbar sind und zweitens die Permeabilität der verwendeten Blechqualität stets eine gewisse Unsicherheit der Rechnung mit sich bringt, so dass man vorzieht, die magnetischen Widerstände in solche Grössen umzurechnen, welche messbar und in Diagrammen darstellbar sind. Da in jedem magnetischen Kreise Amperewindungen (Durchflutung) zur Erregung der Kraftflüsse aufgewendet werden müssen und diese Kraftflüsse im Eisen auch stets Verluste mit sich bringen, so berechnet man zunächst die Durchflutung getrennt für Blind- und Wirkwerte, da beide gegeneinander um  $90^\circ$  phasenverschoben sind.

Für die Blindamperewindungen erhält man

$$\left. \begin{aligned} Iw_{b1} &= iw_1 \cdot l_1 + 0,8 \cdot \delta \cdot \frac{\Phi_1}{Q_1} \cdot \alpha \\ Iw_{b2_0} &= iw_{2_0} \cdot l_2 + 0,8 \cdot \delta \cdot \frac{\Phi_{2_0}}{Q_2} \cdot \alpha \\ Iw_{b_{s_0}} &= iw_{s_0} \cdot l_s + 0,8 \cdot \delta \cdot \frac{\Phi_{s_0}}{Q_s} \cdot \alpha \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

wenn  $\delta$  die Grösse der Luftstrecken und  $\alpha$  die Zahl der Stossfugen darstellt.

Für die Wirkamperewindungen erhält man aus den Eisenverlusten der einzelnen Kreise

$$\left. \begin{aligned} Iw_{w1} &= \sqrt{2} \cdot \frac{P_1}{E_1} \cdot w_1 \\ Iw_{w2_0} &= \sqrt{2} \cdot \frac{P_{2_0}}{E_1} \cdot w_1 \\ Iw_{w_{s_0}} &= \sqrt{2} \cdot \frac{P_{s_0}}{E_1} \cdot w_1 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Die beiden magnetischen Kreise des Streusteges und des Sekundärkreises sind parallel geschaltet und ergeben zusammen mit dem Primärkreis die resultierenden Amperewindungszahlen

$$\left. \begin{aligned} Iw_{bto} &= Iw_{b1} + \frac{Iw_{b2_0} \cdot Iw_{b_{s_0}}}{Iw_{b2_0} + Iw_{b_{s_0}}} \\ Iw_{wto} &= Iw_{w1} + \frac{Iw_{w2_0} \cdot Iw_{w_{s_0}}}{Iw_{w2_0} + Iw_{w_{s_0}}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Die resultierenden Amperewindungszahlen sind

$$Iw_{to} = \sqrt{(Iw_{bto})^2 + (Iw_{wto})^2} \quad (10)$$

Der Leerlaufstrom ist schliesslich bestimmt durch

$$I_{1_0} = \frac{Iw_{to}}{\sqrt{2} \cdot w_1} \quad (11)$$

Betrachtet man diese Beziehungen, so ergibt sich, dass der Leerlaufstrom eines Transformators mit luftspaltfreiem Streusteg bei gleichbleibender Eisenbeanspruchung kleiner sein muss als beim normalen Transformator.

Aus den Gl. (7) bis (11) lassen sich die Wirk- und Blindleitwerte der Erregung, die Konduktanzen, Suszeptanzen und Admittanzen berechnen, die für die Aufstellung der Diagramme nötig sind und aus welchen die Teilströme für die einzelnen magnetischen Kreise bestimmt werden können. Nach den Regeln der komplexen Zahlen für Vektoren ist eine Admittanz ausgedrückt durch

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{Y} &= g - jb = Y \cdot e^{-i\alpha} \\ \text{wo } Y &= \sqrt{g^2 + b^2} \\ \text{und } \text{tg } \alpha &= \frac{b}{g} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$g$  ist die Konduktanz, hervorgerufen durch die Eisenverluste, und  $b$  die Suszeptanz, bestimmt durch die Amperewindung der Magnetisierung. Damit diese Vektoren der verschiedenen Kreise berechnet werden können, müssen die zugehörigen Kraftflüsse bekannt sein. Diese können durch eine Ueberschlagsrechnung näherungsweise aus den Teilspannungen mittels der Kernquerschnitte berechnet werden. Nachträglich lässt sich leicht eine Korrektur vornehmen, um die richtigen Werte der Kraftflüsse zu erhalten. Für diese Teilspannungen gilt

$$E'_{2_0} = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_s} \cdot E_1; \quad E'_{s_0} = \frac{Q_s}{Q_1 + Q_s} \cdot E_1 \quad (13)$$

Diese Teilspannungen liegen in einer Richtung und sind rein arithmetisch zu behandeln, im Gegensatz

zu Gl. (4), welche stets vektoriell aufzufassen sind. Für die Blindleitwerte oder Suszeptanz ist

$$\left. \begin{aligned} b_{1a} &= \frac{Iw_{b1}}{\sqrt{2} \cdot E_1 \cdot w_1} \\ b_{so} &= \frac{Iw_{bso}}{\sqrt{2} \cdot E_1 \cdot w_1} \\ b_{2o} &= \frac{Iw_{b2o}}{\sqrt{2} \cdot E_1 \cdot w_1} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Für die Wirkleitwerte oder Konduktanz ist

$$g_{1a} = \frac{P_{v1}}{E_1^2}; \quad g_{so} = \frac{P_{vso}}{E_1^2}; \quad g_{2o} = \frac{P_{v2o}}{E_1^2} \quad (15)$$

Die resultierende Admittanz bei Leerlauf kann entweder aus Gl. (9) oder auch, wie weiter unten gezeigt wird, aus einer Ersatzschaltung berechnet werden. Diese zweite Berechnungsart setzt die Kenntnis der Uebersetzungsfaktoren aus den Kraftflüssen voraus und liefert sehr genaue Werte.

Für die Umrechnung der magnetischen Widerstände in die entsprechenden Admittanzen haben folgende Beziehungen Gültigkeit

$$\left. \begin{aligned} \omega_{so} &= \frac{\Phi_{so}}{Iw_{so}} \cdot 0,8 = \frac{\Phi_{so} \cdot 0,8}{\sqrt{2} \cdot E'_{so} \cdot Y_{so} \cdot w_1} = \frac{0,8 \cdot 10^8}{\sqrt{2} \cdot 4,44 \cdot 50 \cdot w_1^2 \cdot Y_{so}} \\ \omega_{2o} &= \frac{\Phi_{2o}}{Iw_{2o}} \cdot 0,8 = \frac{\Phi_{2o} \cdot 0,8}{\sqrt{2} \cdot E'_{2o} \cdot Y_{2o} \cdot w_1} = \frac{0,8 \cdot 10^8}{\sqrt{2} \cdot 4,44 \cdot 50 \cdot w_1^2 \cdot Y_{2o}} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Hierin ist unter den Amperewindungszahlen die Resultierende aus Wirk- und Blindwert einzusetzen, da auch die Verluste im Eisen einen Beitrag zu denselben liefert. Setzt man die Werte der Gl. (16) in Gl. (6) ein, so ergibt sich schliesslich für das Verhältnis der Wechselkraftflüsse und der EMKe die neue Beziehung

$$\frac{\Phi_{so}}{\Phi_{2o}} = \frac{E'_{so}}{E'_{2o}} = \frac{\omega_{2o}}{\omega_{so}} = \frac{Y_{so}}{Y_{2o}} \quad (17)$$

d. h. das Verhältnis der Teilkraftflüsse und der Teilspannungen sind auch proportional den zugehörigen Teiladmittanzen.

Werden die Teilspannungen durch die zugehörigen Teilströme und die Teiladmittanzen ausgedrückt, so erhält man für die Teilströme das Verhältnis

$$\frac{I_{2o}}{I_{so}} = \frac{Y_{2o}^2}{Y_{so}^2} \quad (18)$$

d. h. die Teilerregerströme vom Sekundärkreis und vom Streukreis verhalten sich wie die Quadrate der zugehörigen Erregeradmittanzen.

Die Gl. (17) und (18) sind stets vektoriell aufzufassen. Damit sind alle Zusammenhänge zwischen den Kraftflüssen, den EMKe, den Teilerregerströmen und den Erregeradmittanzen bei Leerlauf be-

kannt, so dass sich aus den Dimensionen eines Streutransformators die Charakteristiken eindeutig bestimmen lassen. Sind einmal die Abmessungen des Streusteges und des Sekundärkreises festgelegt, so ändern sich die Uebersetzungen nach den neuen eingetretenen magnetischen Verhältnissen. Aus der Spannungsgleichung (4) und aus Gl. (17) kann die Streuspannung  $E'_{so}$  eliminiert werden; man erhält

$$E_1 = E'_{i2o} = E'_{2o} + E'_{2o} \cdot \frac{Y_{so}}{Y_{2o}} = E'_{2o} \cdot \frac{Y_{so} + Y_{2o}}{Y_{2o}} \quad (19)$$

d. h. beim Streutransformator ist die auf die Primärwicklung reduzierte Sekundärspannung bei Leerlauf nicht mehr identisch mit der primären EMK, sondern gleich einer ideellen EMK  $E'_{i2o}$ , die von der reduzierten Sekundärspannung um so mehr abweicht, je grösser der Anteil der Streu-EMK  $E'_{so}$  wird. Für den Fall, dass  $Y_{so} = 0$  wird, also der Streusteg verschwindet, wird auch  $E_1 = E'_{i2o} = E'_{2o}$ . In allen anderen Fällen wird  $E'_{2o}$  um so kleiner werden, je grösser die Streu-EMK  $E'_{so}$  wird. Aus diesem Grunde gibt eine Reduktion der Spannungen im Verhältnis der Windungszahlen beim Streutransformator nicht mehr den richtigen Wert

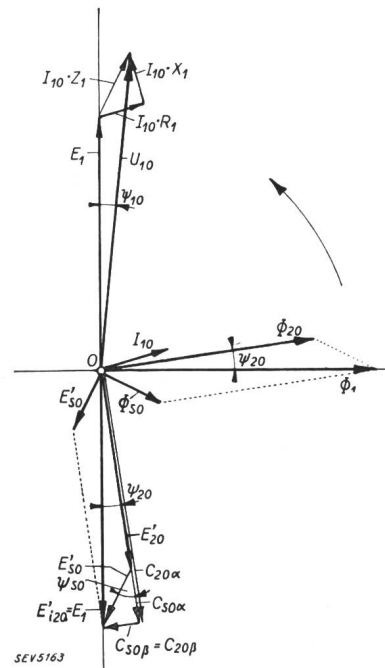


Fig. 6.

Leerlaufdiagramm des Streutransformators mit luftspaltfreiem Streustegnebenschluss.

an, sondern es muss das Verhältnis der EMKe des Streu- und Sekundärkreises miterücksichtigt werden. Bei Leerlauf lässt sich mit diesen Beziehungen auch das Diagramm der Ströme, Spannungen und Wechselkraftflüsse aufstellen (Fig. 6). Aus dem Diagramm ergibt sich das ausgewertete Verhältnis der Spannungen und der Kraftflüsse

$$\frac{\Phi_{so}}{\Phi_{2o}} = \frac{G'_{so}}{G'_{2o}} = \frac{g_{so} - j b_{so}}{g_{2o} - j b_{2o}} = \frac{g_{so} \cdot g_{2o} + b_{so} \cdot b_{2o} - j(b_{so} \cdot g_{2o} - g_{so} \cdot b_{2o})}{Y_{2o}^2} = G'_{so} = C_{so} \cdot e^{-j\psi_{so}} \quad (20)$$

Trennt man diesen Ausdruck in reelle und imaginäre Glieder, so ergeben sich schliesslich die Komponenten und der Absolutwert des Uebersetzungsfaktors

$$\left. \begin{aligned} C_{s_0\alpha} &= \frac{g_{s_0} \cdot g_{2_0} + b_{s_0} \cdot b_{2_0}}{Y_{2_0}^2} \\ C_{s_0\beta} &= \frac{b_{s_0} \cdot g_{2_0} - g_{s_0} \cdot b_{2_0}}{Y_{2_0}^2} \\ \text{tg } \psi_{s_0} &= \frac{C_{s_0\beta}}{C_{s_0\alpha}} = \frac{b_{s_0} \cdot g_{2_0} - g_{s_0} \cdot b_{2_0}}{g_{s_0} \cdot g_{2_0} + b_{s_0} \cdot b_{2_0}} \\ C_{s_0} &= \sqrt{C_{s_0\alpha}^2 + C_{s_0\beta}^2} \end{aligned} \right\} (21)$$

Untersucht man den Ausdruck für den Phasenwinkel  $\psi_{s_0}$ , so ergibt sich, dass dieser zu Null wird, wenn  $b_{s_0} \cdot g_{2_0} = g_{s_0} \cdot b_{2_0}$  wird. Im allgemeinen sind jedoch die Eisenwege des Streu- und Sekundärkreises sehr stark voneinander verschieden, so dass diese Bedingung praktisch nicht so leicht erfüllt werden kann. Ist jedoch diese Bedingung erfüllt, so geht der Uebersetzungsfaktor  $C_{s_0}$  in eine reine Zahl über und die Flüsse und EMKe werden rein arithmetisch zusammengesetzt. Dieser Fall ist bei der Dimensionierung der Streustege von einiger Bedeutung, weil sich hierbei die günstigsten Abmessungen ergeben. Für diesen Fall werden die Erregerströme phasengleich.

Auf gleiche Weise lässt sich aus Gl. (19) der Uebersetzungsfaktor zwischen den EMKe  $E_1$  bzw.  $E'_{i_{2_0}}$  und  $E'_{2_0}$  und ihren zugehörigen Kraftflüssen ermitteln.

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_{2_0}} = \frac{\mathfrak{G}'_{i_{2_0}}}{\mathfrak{G}'_{2_0}} = \frac{g_{s_0} + g_{2_0} - j(b_{s_0} + b_{2_0})}{g_{2_0} - j b_{2_0}} = \frac{(g_{s_0} + g_{2_0})g_{2_0} + (b_{s_0} + b_{2_0})b_{2_0} - j[(b_{s_0} + b_{2_0})g_{2_0} - (g_{s_0} + g_{2_0})b_{2_0}]}{Y_{2_0}^2} = \mathfrak{C}_{2_0} = C_{2_0} \cdot e^{-j\psi_{2_0}} \quad (22)$$

Trennt man wieder die reellen und imaginären Glieder voneinander, so erhält man die Komponenten und den Absolutwert des Uebersetzungsfaktors

$$\left. \begin{aligned} C_{2_0\alpha} &= 1 + \frac{g_{s_0} \cdot g_{2_0} + b_{s_0} \cdot b_{2_0}}{Y_{2_0}^2} = 1 + C_{s_0\alpha} \\ C_{2_0\beta} &= \frac{b_{s_0} \cdot g_{2_0} - g_{s_0} \cdot b_{2_0}}{Y_{2_0}^2} = C_{s_0\beta} \\ \text{tg } \psi_{2_0} &= \frac{C_{2_0\beta}}{C_{2_0\alpha}} = \frac{b_{s_0} \cdot g_{2_0} - g_{s_0} \cdot b_{2_0}}{Y_{2_0}^2 + g_{s_0} \cdot g_{2_0} + b_{s_0} \cdot b_{2_0}} \\ C_{2_0} &= \sqrt{C_{2_0\alpha}^2 + C_{2_0\beta}^2} \end{aligned} \right\} (23)$$

Für den Phasenwinkel  $\psi_{2_0}$  gelten die gleichen Gesichtspunkte wie für  $\psi_{s_0}$ ; es wird  $\psi_{2_0} = 0$ , wenn  $b_{s_0} \cdot g_{2_0} = g_{s_0} \cdot b_{2_0}$  wird, wobei  $C_{s_0\beta} = C_{2_0\beta} = 0$  ist.

Im allgemeinen zeigen diese Beziehungen, dass Luftstrecken im Streusteg die Verhältnisse für die Spannungen und Ströme so ungünstig beeinflussen, dass damit kaum ein praktisch brauchbares Resultat erzielt werden kann.

Das Verhältnis der Erregerströme  $I_{s_0}$  und  $I_{2_0}$  aus Gl. (18) lässt sich nun auch auswerten; es ist

$$\frac{\mathfrak{J}_{s_0}}{\mathfrak{J}_{2_0}} = \frac{\mathfrak{Y}_{s_0}^2}{\mathfrak{Y}_{2_0}^2} = \frac{(g_{s_0} - j \cdot b_{s_0})^2}{(g_{2_0} - j \cdot b_{2_0})^2} = \frac{(g_{s_0} - j \cdot b_{s_0})^2 \cdot (g_{2_0} + j \cdot b_{2_0})^2}{g_{2_0}^4 + b_{2_0}^4} = C_{1_{op}} \cdot e^{-j\psi_{1_{op}}} \quad (24)$$

Durch Trennen in reelle und imaginäre Glieder lässt sich dieser Vektor in seine Komponenten zerlegen, jedoch haben diese für die Berechnung des Streutransformators keine besondere Bedeutung.

Mit diesen Uebersetzungsfaktoren und ihren Komponenten bei Leerlauf kann nun auch die exakte Rechnung der resultierenden Admittanz durchgeführt werden. Zu diesem Zwecke ist eine

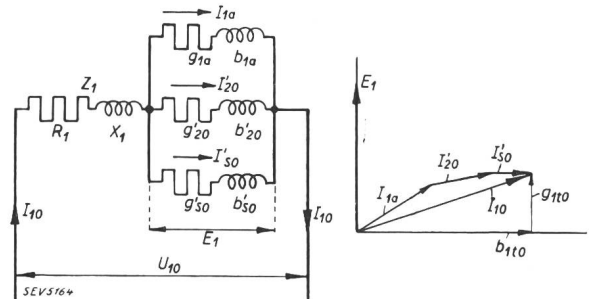


Fig. 7.

Ersatzschaltung des Streutransformators bei Leerlauf mit Stromdiagramm zur exakten Bestimmung der Leerlaufadmittanz.

Ersatzschaltung für die Erregerkreise bei Leerlauf nötig, die in Fig. 7 mit dem Stromdiagramm dargestellt ist. Die drei Erregerkreise bilden unter sich parallele Stromkreise, welche von der EMK  $E_1$  ge-

spiesen werden. Vektoriell ist deshalb der Leerlaufstrom

$$\mathfrak{J}_{1_0} = \mathfrak{J}_{1a} + \mathfrak{J}'_{2_0} + \mathfrak{J}'_{s_0} \quad (25)$$

Die Teilspannungen werden aus Gl. (4), (20) und (22) als Funktion der EMK  $E_1$  berechnet

$$\left. \begin{aligned} \mathfrak{G}'_{2_0} &= \mathfrak{G}_1 \cdot \frac{1}{\mathfrak{C}_{2_0}} \\ \mathfrak{G}'_{s_0} &= \mathfrak{G}_1 \cdot \frac{\mathfrak{C}_{2_0} - 1}{\mathfrak{C}_{2_0}} \end{aligned} \right\} (26)$$

Die einzelnen Teilströme der Fig. 7 sind damit eindeutig bestimmt durch

$$\left. \begin{aligned} \mathfrak{J}_{1_0} &= \mathfrak{G}_1 \cdot \mathfrak{Y}_{1_0} \\ \mathfrak{J}_{1a} &= \mathfrak{G}_1 \cdot \mathfrak{Y}_{1a} \\ \mathfrak{J}'_{2_0} &= \mathfrak{G}'_{2_0} \cdot \mathfrak{Y}_{2_0} = \mathfrak{G}_1 \cdot \frac{\mathfrak{Y}_{2_0}}{\mathfrak{C}_{2_0}} = \mathfrak{G}_1 \cdot \mathfrak{Y}'_{2_0} \\ \mathfrak{J}'_{s_0} &= \mathfrak{G}'_{s_0} \cdot \mathfrak{Y}_{s_0} = \mathfrak{G}_1 \cdot \frac{\mathfrak{C}_{2_0} - 1}{\mathfrak{C}_{2_0}} \cdot \mathfrak{Y}_{s_0} = \mathfrak{G}_1 \cdot \mathfrak{Y}'_{s_0} \end{aligned} \right\} (27)$$

Die resultierende Leerlaufadmittanz ergibt sich damit

$$\mathfrak{Y}_{1to} = \mathfrak{Y}_{1a} + \mathfrak{Y}'_{2o} + \mathfrak{Y}'_{so} = \mathfrak{Y}_{1a} + \frac{\mathfrak{Y}_{2o}}{\mathfrak{C}_{2o}} + \frac{\mathfrak{C}_{2o}-1}{\mathfrak{C}_{2o}} \cdot \mathfrak{Y}_{so} \quad (28)$$

Durch Trennen in reelle und imaginäre Glieder erhält man schliesslich

$$\begin{aligned} g_{1to} &= g_{1a} + \frac{g_{so} \cdot (C_{so\alpha} + C_{so}^2) + g_{2o} \cdot (1 + C_{so\alpha}) + (b_{2o} - b_{so}) \cdot C_{so\beta}}{C_{2o}^2} \\ b_{1to} &= b_{1a} + \frac{b_{so} \cdot (C_{so\alpha} + C_{so}^2) + b_{2o} \cdot (1 + C_{so\alpha}) + (g_{so} - g_{2o}) \cdot C_{so\beta}}{C_{2o}^2} \\ \text{tg } \psi_{1to} &= \frac{b_{1to}}{g_{1to}}; \quad Y_{1to} = \sqrt{g_{1to}^2 + b_{1to}^2} \end{aligned} \quad (29)$$

Wie diese Beziehungen zeigen, übt der Streustegnebenschluss einen um so stärkeren Einfluss auf die Leerlaufadmittanz aus, je grösser der abzulenkende Streukraftfluss wird.

Der Leerlaufstrom kann aus Gl. (29) ebenfalls berechnet werden durch Multiplikation mit der primären EMK  $E_1$

$$\left. \begin{aligned} I_{1ow} &= E_1 \cdot g_{1to} \\ I_{1ob} &= E_1 \cdot b_{1to} \\ I_{1o} &= E_1 \cdot Y_{1to} \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

Zur vollständigen Berechnung der Leerlaufverhältnisse des Streutransformators ist noch die primäre Klemmenspannung erforderlich, welche bestimmt ist durch

$$U_{1o} = \mathfrak{C}_{1-} + \mathfrak{I}_{1o} \cdot \mathfrak{Z}_{1-} = \mathfrak{C}_{1-} \cdot (1 + \mathfrak{Y}_{1to} \cdot \mathfrak{Z}_{1-}) = \mathfrak{C}_{1-} \cdot \mathfrak{C}_{1o} \quad (31)$$

$C_{1o}$  stellt den Leerlaufübersetzungsfaktor zwischen der EMK  $E_1$  und der Klemmenspannung der Primärwicklung dar und ist bestimmt durch

$$\mathfrak{C}_{1o} = 1 + g_{1to} \cdot R_1 + b_{1to} \cdot X_1 - j(R_1 \cdot b_{1to} - Y_1 \cdot g_{1to}) \quad (32)$$

Durch Trennen in reelle und imaginäre Glieder erhält man schliesslich die Komponenten und den absoluten Wert des Uebersetzungsverhältnisses

$$\left. \begin{aligned} C_{1o\alpha} &= 1 + g_{1to} \cdot R_1 + b_{1to} \cdot X_1 \\ C_{1o\beta} &= R_1 \cdot b_{1to} - X_1 \cdot g_{1to} \\ \text{tg } \psi_{1o} &= \frac{C_{1o\beta}}{C_{1o\alpha}} = \frac{R_1 \cdot b_{1to} - X_1 \cdot g_{1to}}{1 + g_{1to} \cdot R_1 + b_{1to} \cdot X_1} \\ C_{1o} &= \sqrt{C_{1o\alpha}^2 + C_{1o\beta}^2} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

Mit Hilfe dieser Beziehungen lässt sich der Streutransformator bei Leerlauf einwandfrei nachrechnen.

2. Belastung des Streutransformators.

Wird der Streutransformator bis zum Kurzschluss belastet, so fliesst durch die Sekundärwicklung ein Kurzschlußstrom  $I_{2k}$ , welcher im Sekundärkern einen Wechselkraftfluss erzeugt und zusammen mit dem bestehenden Wechselkraftfluss der Sekundärwicklung eine resultierende EMK  $E_{2kt}$  aufdrückt. Diese EMK  $E_{2kt}$  ist bestimmt durch

die Impedanz  $Z_2$  der Sekundärwicklung und dem Kurzschlußstrom  $I_{2k}$

$$E_{2kt} = I_{2k} \cdot Z_2 \quad (34)$$

Der durch den sekundären Kurzschlußstrom erzeugte Wechselkraftfluss  $\Phi_{2k}$  schliesst sich über den Streusteg und bringt eine magnetomotorische Kraft von der Grössenordnung

$$F_{2k} = 1,25 \cdot I_{2k} \cdot w_2 \quad (35)$$

hervor, wo  $w_2$  die sekundäre Windungszahl ist.

In Fig. 8 ist die Schaltung bei Kurzschluss dargestellt und es sind die verschiedenen Wechselkraftflüsse eingezeichnet. Im Primärkreis fliesst nur der Hauptkraftfluss  $\Phi_1$ , während im Sekundärkreis der

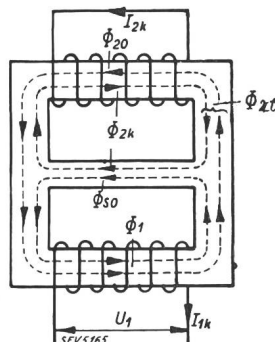


Fig. 8.

Schematische Darstellung des Streutransformators mit luftspaltfreiem Streustegnebenschluss bei Kurzschluss.

Wechselkraftfluss  $\Phi_{2o} - \Phi_{2k}$  wirkt, da der sekundäre Kurzschlusskraftfluss dem Hauptkraftfluss entgegenwirkt. Im Streusteg dagegen wirken der Leerlaufstreukraftfluss und der sekundäre Kurzschlusskraftfluss im gleichen Sinne, so dass dort vektoriell der resultierende Kraftfluss  $\Phi_{so} + \Phi_{2k}$  fließen muss. Bei Kurzschluss wirken die MMKe im Sekundärkreis

$$F - F_{2k} = \Phi_1 \cdot \omega_1 + \Phi_{2t} \cdot \omega_{2t} \quad (36)$$

wenn  $\omega_{2t}$  den magnetischen Widerstand des Sekundärkreises für den Kraftfluss  $\Phi_{2t} = \Phi_{2o} - \Phi_{2k}$  darstellt. Für den Streusteg ist analog die MMKe

$$F + F_{2k} = \Phi_1 \cdot \omega_1 + \Phi_{st} \cdot \omega_{st} \quad (37)$$

Durch Einsetzen der MMKe in Gl. (36) und (37) erhält man bei Kurzschluss

$$\Phi_{2o} \cdot \omega_{2o} + \Phi_{so} \cdot \omega_{so} = \Phi_{st} \cdot \omega_{st} + \Phi_{2t} \cdot \omega_{2t} \quad (38)$$

d. h. der Kurzschlusszustand ist durch den Leerlaufzustand eindeutig bestimmt und kann nur geändert werden durch eine Änderung der Streustegdimension, des Sekundärkreises und der Wicklungsdimensionen primär und sekundär.

Diese Bestimmungsgleichung (38) gilt auch dann noch, wenn der Streukreis mit einer Luftstrecke versehen wird. Hierbei wird der magnetische Widerstand sehr gross und dementsprechend der Streukraftfluss reduziert. Die Wechselkraftflüsse bei Belastung sind vektoriell

$$\Phi_1 = \Phi_{st} + \Phi_{2t} = (\Phi_{so} + \Phi_{2k}) + (\Phi_{2o} - \Phi_{2k}) = \Phi_{so} + \Phi_{2o} \quad (39)$$

d. h. bei Kurzschluss oder auch bei einer beliebigen Belastung ist der erzeugte Wechselkraftfluss nur allein durch die beiden Erregerkraftflüsse der Streu- und Sekundärkreise bestimmt und der zusätzliche Stromkraftfluss des Sekundärkreises verändert nur die magnetischen Verhältnisse des Streu- und Sekundärkreises.

Aus diesem Gesetz erkennt man, dass das Gesetz Gl. (6) nicht nur bei Leerlauf Gültigkeit hat, sondern auch bei jeder beliebigen Belastung gelten muss. Bei einer beliebigen Belastung ist

$$\frac{\mathcal{G}'_{st}}{\mathcal{G}'_{2t}} = \frac{\Phi_{st}}{\Phi_{2t}} = \frac{\omega_{2t}}{\omega_{st}} = \frac{\mathcal{Y}_{st}}{\mathcal{Y}_{2t}} = \mathcal{C}_{st} \quad (40)$$

wenn  $Y_{2t}$  und  $Y_{st}$  die Belastungsadmittanzen des Streu- und Sekundärkreises darstellen.  $C_{st}$  stellt dann den Übersetzungsfaktor zwischen den EMKE des Streu- und Sekundärkreises bei Belastung dar. Eine Auswertung von Gl. (40) kann auf einfachere Weise aus den Leerlaufkonstanten ermittelt werden, wie weiter unten gezeigt wird.

Wie beim Leerlauf sind die Grössen des Sekundär- und Streukreises untereinander und gegenüber dem Primärsystem phasenverschoben und gehören deshalb verschiedenen Systemen an. Dasselbe gilt natürlich auch bei Belastung, da sich die Verhältnisse durch den Streukreis nicht ändern. Zur Aufstellung eines allgemein gültigen Strom- und Spannungsdiagrammes muss deshalb für jeden Kreis für sich ein Kreisdiagramm aufgestellt werden. Beide Systeme des Streu- und Sekundärkreises setzen sich dann zu einem resultierenden System mit der EMK  $E'_{i20}$  als Ausgangspunkt zusammen, was bereits durch das Leerlaufdiagramm Fig. 6 dargestellt wurde. Da der Streukreis keine eigene Wicklung hat, so genügen zwei Kreisdiagramme, wobei beim einen die EMK  $E'_{20}$  und beim andern die EMK  $E'_{i20}$  zugrunde gelegt wird. Im eigentlichen Sekundärkreis sind alle Grössen nur im Verhältnis der Windungszahlen auf das Primärsystem reduziert, während im zusammengesetzten Diagramm mit  $E'_{i20}$  als Grundlage alle Grössen im Verhältnis der Windungszahlen und dem Faktor  $C_{20}$  reduziert werden müssen. In Fig. 9 ist das vollständige Strom- und Spannungsdiagramm für eine beliebige Belastung von Leerlauf bis Kurzschluss dargestellt. Wird über der EMK  $E'_{20}$  ein Kreis geschlagen, so bewegen sich alle Vektoren des Sekundärkreises von Leerlauf bis Kurzschluss auf diesem. Bei Kurzschluss ist die induzierte EMK  $E_{2kt}$  auch identisch mit der treibenden EMK  $E_{20}$  bei Leerlauf. Diese setzt sich aus der Wirkkomponente  $E_{2t}$  und aus der Blindkomponente  $E_{2k}$  zusammen. Im Diagramm ist daher

$$\left. \begin{aligned} \overline{OC} &= E'_{2t} = E_{2t} \cdot \frac{w_1}{w_2} = I'_{2k} \cdot R'_2 \\ \overline{AC} &= E'_{2k} = E_{2k} \cdot \frac{w_1}{w_2} = I'_{2k} \cdot X'_2 \\ \overline{OA} &= E'_{20} = E'_{2kt} = \sqrt{E'^2_{2k} + E'^2_{2t}} = I'_{2k} \cdot Z'_2 \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

Auf gleiche Weise lassen sich auch die einzelnen

Komponenten der Wechselkraftflüsse bestimmen. Um nun zum Diagramm der zusammengesetzten Grössen des Sekundärkreises zu gelangen, ist es nur nötig, alle Vektoren mit dem Übersetzungsfaktor  $C_{20}$  zu reduzieren und um den Winkel  $\psi_{20}$  bzw.

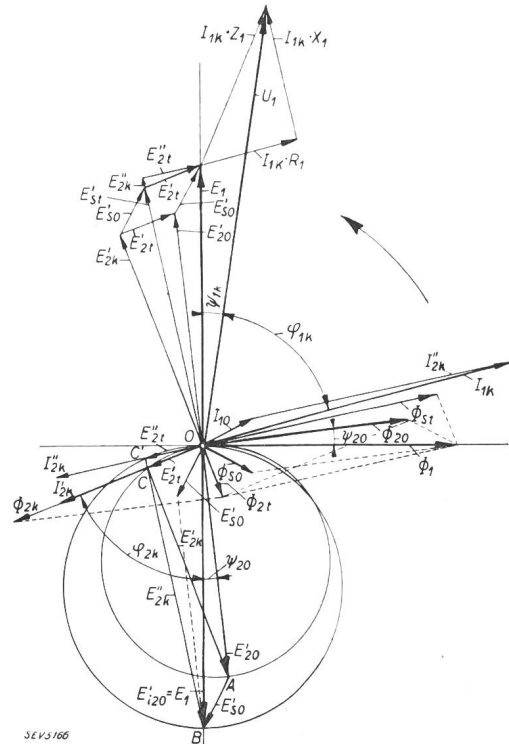


Fig. 9. Vollständiges Diagramm des Streutransformators bei Kurzschluss.

$180 \pm \psi_{20}$  zu verschieben. Im zusammengesetzten Diagramm sind daher die analogen Grössen der Gl. (41)

$$\left. \begin{aligned} \overline{CB} &= E'_{2kt} = I'_{2k} \cdot X'_2 \\ \overline{OC'} &= E'_{2t} = I'_{2k} \cdot R'_2 \\ \overline{OB} &= E'_{i20} = I'_{2k} \cdot Z'_2 \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

Für die Umrechnung der Spannungen, der Ströme und der Impedanz von einem System ins andere gilt daher

$$\left. \begin{aligned} \text{für die EMK} & \quad \frac{E'_{i20}}{E'_{20}} = C_{20} \\ \text{für die Ströme} & \quad \frac{I'_{2k}}{I_{2k}} = \frac{1}{C_{20}} \\ \text{für die Impedanzen} & \quad \frac{Z'_2}{Z_2} = C_{20}^2 \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

Durch diese Umrechnung lässt sich der Streutransformator genau wie der gewöhnliche Transformator behandeln.

Um die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten eines Streutransformators überblicken zu können, müssen auch die Stromverhältnisse untersucht werden. Bei Belastung setzt sich der Primärstrom aus dem Leerlaufstrom und dem auf Primär redu-



Die primäre Klemmenspannung bei Belastung ist nun bestimmt

$$U_1 = E_1 \cdot C_1 \quad (54)$$

Zum Schlusse muss noch für die Sekundärspannung eine Beziehung aufgestellt werden, aus welcher mit Hilfe der EMK  $E_1$  dieselbe bestimmt werden kann. Für die auf Primär reduzierte Sekundärspannung gilt vektoriell

$$U_2'' = \mathfrak{E}_1 - \mathfrak{I}_2'' \cdot \mathfrak{Z}_2'' = \mathfrak{E}_1 \cdot \frac{\mathfrak{Z}_2'' - \mathfrak{Z}_2'}{\mathfrak{Z}_2''} = \mathfrak{E}_1 \cdot \mathfrak{C}_2 \quad (55)$$

Durch Trennen in reelle und imaginäre Glieder erhält man die Komponenten und den absoluten Wert des sekundären Uebersetzungsfaktors

$$\left. \begin{aligned} C_{2\alpha} &= \frac{(R_{2t}' - R_2') \cdot R_{2t}'' + (X_{2t}' - X_2') \cdot X_{2t}''}{Z_{2t}''^2} \\ C_{2\beta} &= \frac{(X_{2t}' - X_2') \cdot R_{2t}'' - (R_{2t}' - R_2') \cdot X_{2t}''}{Z_{2t}''^2} \\ \operatorname{tg} \psi_2 &= \frac{(X_{2t}' - X_2') \cdot R_{2t}'' - (R_{2t}' - R_2') \cdot X_{2t}''}{(R_{2t}' - R_2') \cdot R_{2t}'' + (X_{2t}' - X_2') \cdot X_{2t}''} \\ C_2 &= \sqrt{C_{2\alpha}^2 + C_{2\beta}^2} \end{aligned} \right\} \quad (56)$$

Mit diesen Beziehungen sind alle Grössen bekannt, welche zur Nachrechnung eines Streutransformators mit luftspaltfreiem Streustegnebenschluss erforderlich sind; damit können auch alle Fragen einwandfrei geklärt werden, welche sich durch Aenderungen in den Abmessungen und in der Konstruktion des Streusteges ergeben.

Zum Schlusse bleibt nur noch die Frage des prozentualen Spannungsabfalles zur Untersuchung übrig, da dieser namentlich bei Sicherheitstransformatoren eine wichtige Rolle spielt. Um hier zu möglichst einfachen Ergebnissen zu gelangen, geht man zweckmässig von einer konstanten EMK  $E_1$  aus und berechnet die Spannungserhöhung auf der Primärseite und den Spannungsabfall in der Sekundärwicklung. Streng genommen müsste man von einer konstanten Primärspannung ausgehen, um damit bei einer veränderlichen EMK  $E_1$  den Spannungsabfall zu berechnen. Wie aber die aufgestellten Beziehungen zeigen, ist dazu eine wiederholte umfangreiche Nachrechnung erforderlich, weil sich bei jeder Rechnung andere Verhältnisse ergeben. Geht man von einer konstanten EMK  $E_1$  aus, so können die erhaltenen Werte ohne wesentliche Fehler auf eine konstante Primärspannung umgerechnet werden. Mit einer konstanten EMK  $E_1$  ergibt sich die Spannungserhöhung aus

$$\varepsilon_1 = \frac{U_1 - U_{10}}{U_{10}} \cdot 100 = \frac{C_1 - C_{10}}{C_{10}} \cdot 100 \text{ in } \% \quad (57)$$

wenn  $C_1$  und  $C_{10}$  die aufgestellten Uebersetzungsfaktoren darstellen. In der Sekundärwicklung dagegen tritt ein Spannungsabfall auf

$$\varepsilon_2 = \frac{U_{20}'' - U_2''}{U_{20}''} \cdot 100 = \frac{C_{20} - C_2}{C_{20}} \cdot 100 \text{ in } \% \quad (58)$$

Der gesamte Spannungsabfall des Transformators bei Belastung ist daher

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \left( \frac{C_1 - C_{10}}{C_{10}} + \frac{C_{20} - C_2}{C_{20}} \right) \cdot 100 \text{ in } \% \quad (59)$$

Sind die Ströme und Spannungen bei konstanter EMK  $E_1$  ermittelt worden, so kann man den berechneten Spannungsabfall im Verhältnis der erhöhten Primärspannung zur Netzspannung umrechnen. Der Fehler, welcher hierbei entsteht, ist im allgemeinen sehr klein und praktisch zu vernachlässigen.

Mit dieser Berechnungsmethode lässt sich ein Streutransformator nachrechnen. Trotzdem wird der Berechner schon am Anfang auf sehr viele Schwierigkeiten stossen, namentlich bei der Ermittlung des Faktors  $C_{20}$ , weil einerseits das Verhältnis der Kraftflüsse gleichzeitig mit den Magnetisierungsverhältnissen übereinstimmen muss und andererseits die Summe beider Kraftflüsse von Streu- und Sekundärkreis gleich dem Primärkraftfluss sein muss. Die Methode der schnellen und sicheren Ermittlung dieses Faktors ist an sich so umfangreich, dass sie den Rahmen dieser Arbeit weit übersteigen würde.

### 3. Berechnungsbeispiel.

Im folgenden werden die aufgestellten Beziehungen an einem Kleintransformator zur Speisung von Handlampen für eine Leistung von 100 VA und den Nennspannungen 220/36 Volt nachgeprüft und, soweit es nötig ist, näher erläutert. Der Blechkörper bestehe aus Teilblechen nach dem Manteltyp und besitze einen Kernquerschnitt von 10,7 cm<sup>2</sup> und einen Streukernquerschnitt von 3,2 cm<sup>2</sup>. Die Wicklungen bestehen aus einer primären und einer sekundären Spule, welche voneinander vollständig getrennt sind und auf jeder Seite des Streusteges auf dem gemeinsamen Kern liegen. Aus den Wicklungsabmessungen und der Anordnung des Streusteges ergibt sich für den Primärkreis ein Wechselkraftfluss  $\Phi_1 = 130\,600$ , entsprechend einer Kernbeanspruchung von  $B_1 = 12\,200$ . Durch Nachrechnen der Durchflutung und der Verluste aus der Magnetisierungskurve und aus der Verlustkurve des verwendeten Bleches ergibt sich, dass bei Leerlauf der Sekundärkreis einen Wechselkraftfluss von  $\Phi_{20} = 94\,265$  und der Streusteg einen solchen von  $\Phi_{s0} = 36\,384$  aufnehmen. Die Ermittlung dieser Kraftflüsse erfolgte zum Teil rechnerisch und zum andern Teil graphisch. Für die einzelnen magnetischen Kreise wurde aus der Magnetisierungs- und Verlustkurve nach den Gl. (14) und (15) die Leitwerte berechnet:

Primär:

$$g_{1a} = 0,525 \cdot 10^{-4}; \quad b_{1a} = 5,47 \cdot 10^{-4}; \quad Y_{1a} = 5,498 \cdot 10^{-4}$$

Sekundär:

$$g_{20} = 0,295 \cdot 10^{-4}; \quad b_{20} = 2,812 \cdot 10^{-4}; \quad Y_{20} = 2,827 \cdot 10^{-4}$$

Streukreis:

$$g_{s0} = 0,0277 \cdot 10^{-4}; \quad b_{s0} = 1,08 \cdot 10^{-4}; \quad Y_{s0} = 1,0803 \cdot 10^{-4}$$

Aus Gl. (21) berechnet man den Streufaktor bei Leerlauf und erhält

$$C_{so\alpha} = 0,38477; C_{so\beta} = 0,0303; C_{so} = 0,38596; \\ \text{tg } \psi_{so} = 0,07875; \psi_{so} = 4^{\circ} 30' 10''.$$

Die EMK  $E'_{s0}$  und  $E'_{20}$  oder auch die Kraftflüsse  $\Phi_{s0}$  und  $\Phi_{20}$  sind um diesen Phasenwinkel verschoben. Auf gleiche Weise berechnet man nach Gl. (23) den Uebersetzungsfaktor  $C_{20}$  und erhält

$$C_{20\alpha} = 1,38477; C_{20\beta} = 0,0303; C_{20} = 1,3851; \\ \psi_{20} = 0,02188; \psi_{20} = 1^{\circ} 15' 12''.$$

Die EMK  $E_1$  und  $E'_{20}$  oder auch die Kraftflüsse  $\Phi_1$  und  $\Phi_{20}$  sind um diesen Winkel gegeneinander verschoben. Aus den Wicklungsabmessungen berechnen sich die EMKe der Wicklungen:  $E_1 = 218,3$  V;  $E_{20} = 38,57$  V. Aus den Leitwerten der einzelnen magnetischen Kreise berechnen sich die Leitwerte bei Leerlauf aus Gl. (29)

$$g_{1t0} = 0,5621 \cdot 10^{-4}; b_{1t0} = 6,2511 \cdot 10^{-4}; Y_{1t0} = 6,2763 \cdot 10^{-4}; \text{tg } \varphi_{1t0} = 11,122; \varphi_{1t0} = 84^{\circ} 51' 41''.$$

Um diesen Winkel ist der Leerlaufstrom gegen die EMK  $E_1$  verschoben. Aus Gl. (30) ergibt sich der

Tabelle I.

$R_{2A}$ $\Omega$	$C_b$	$g_{1t}$ $\times 10^{-4}$	$b_{1t}$ $\times 10^{-4}$	$Y_{1t}$ $\times 10^{-4}$	$I_1$ A	$I_2$ A
$\infty$	$\infty$	0,562	6,2511	6,2763	0,137	0
72	1,84749	4,949	6,424	8,1092	0,177	0,542
24	1,19434	13,487	7,709	15,534	0,339	1,607
13	1,10739	23,545	11,000	25,989	0,557	2,899
9	1,08512	32,074	15,257	35,518	0,775	4,046
6	1,0717	42,9505	24,666	49,530	1,081	5,710
4	1,0645	53,109	39,711	66,313	1,447	7,698
2	1,05882	57,826	73,396	93,438	2,039	10,57
1	1,05644	46,150	100,424	110,52	2,413	13,657
0	1,05442	12,930	120,89	121,579	2,654	14,249

Auf gleiche Weise berechnet man noch aus Gl. (53) den Uebersetzungsfaktor  $C_1$ , mit dem die primäre Klemmenspannung und die Spannungserhöhung berechnet werden. Schliesslich kann man aus Gl. (56) den sekundären Uebersetzungsfaktor  $C_2$  bestimmen und damit die Sekundärspannung sowie den Spannungsabfall berechnen. In Tabelle II sind diese Werte als Funktion des sekundären Belastungswiderstandes dargestellt.

Tabelle II.

$R_{2A}$ $\Omega$	$C_1$	$U_1$ V	$\varepsilon_1$ %	$C_2$	$U_2$ V	$\varepsilon_2$ %	$\varepsilon$ %
$\infty$	1,02721	224,24	0	1,00000	38,566	0	0
72	1,03026	224,906	0,297	0,99644	38,288	0,721	1,018
24	1,04122	227,30	1,36	0,98159	37,856	1,841	3,201
13	1,06424	232,324	3,603	0,95804	36,987	4,197	7,80
9	1,08912	237,755	6,027	0,92888	35,805	7,159	13,186
6	1,14046	249,462	11,24	0,87419	33,714	12,581	23,82
4	1,21550	265,344	18,33	0,78556	30,296	21,443	39,77
2	1,36136	297,185	32,53	0,56682	21,860	43,318	75,85
1	1,46304	319,382	42,43	0,33554	12,94	66,47	108,90
0	1,52734	333,42	48,69	0,00000	0	100	149,69

Leerlaufstrom  $I_{10} = 0,137$  A und der Leerlaufverlust ist  $P_{10} = E_1^2 \cdot g_{1t0} = 2,678$  Watt. Trotz der hohen Eisenbeanspruchung im Primärkreis ist sowohl der Leerlaufstrom als auch der Leerlaufverlust sehr klein, da durch die Parallelschaltung des luftspaltfreien Streusteges mit dem Sekundärkreis der resultierende Wert stark reduziert wird. Würde derselbe Transformator ohne Streusteg oder aber der Streusteg mit Luftstrecke ausgerüstet werden, so würden beide Werte ungefähr den doppelten Betrag erhalten. Für die Nachrechnung der Belastungsverhältnisse geht man von einer konstanten EMK  $E_1 = 218,3$  V aus. Als Belastung werden der Berechnung rein Ohmsche Widerstände zugrunde gelegt, welche dem Handlampenbetrieb entsprechen. Zunächst bestimmt man aus Gl. (46) den Belastungsfaktor und daraus ergeben sich aus Gl. (47) die Leitwerte bei Belastung, aus welchen der Primärstrom berechnet werden kann. Der Sekundärstrom schliesslich kann aus der EMK  $E_{20}$  und der resultierenden Impedanz des Sekundärkreises ermittelt werden. In Tabelle I sind diese berechneten Werte als Funktion des sekundären Belastungswiderstandes zusammengestellt.

In Tabelle II und III entspricht der Nennleistung ein Belastungswiderstand von ca. 13 Ohm; dabei beträgt der Spannungsabfall 7,8 %. Zum Schlusse kann noch der Primärstrom, der Sekundärstrom und die Sekundärspannung auf eine konstante Primärspannung umgerechnet werden. In Tabelle III sind diese umgerechneten Werte dargestellt.

Tabelle III.

$R_{2A}$	Korrektionsfaktor $U_1/U_{10}$	$U_2$ korrigiert	$I_1$ korrigiert	$I_2$ korrigiert
$\infty$	1,00000	38,566	0,137	0
72	1,00297	38,174	0,1765	0,5404
24	1,01365	37,347	0,3345	1,5853
13	1,03605	35,661	0,5377	2,7981
9	1,06032	34,845	0,7312	3,8153
6	1,11257	30,303	0,9718	5,1324
4	1,18330	25,603	1,2225	6,505
2	1,32530	16,943	1,5391	7,979
1	1,42428	9,086	1,694	9,588
0	1,48688	0	1,7855	9,600

Wie diese Tabellen zeigen, entsprechen die Werte der Spannungen und der Ströme allen Anforderun-

gen, welche an einen solchen Streutransformator gestellt werden können und auch der Leerlaufstrom, die Leerlaufleistung, die Kurzschlußströme und der Spannungsabfall liegen innerhalb der

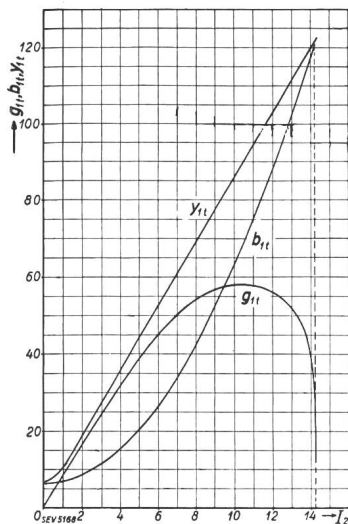


Fig. 11.  
Konduktanz, Suszeptanz und Admittanz des Primärkreises als Funktion des Sekundärstromes eines 100-VA-Streutransformators.

Grenzwerte, wie solche normalerweise gefordert werden können. Zum Betriebe von Handlampen eignet sich deshalb ein solcher Streutransformator besonders gut, da er infolge seiner Kurzschluß-

sicherheit auf der Sekundärseite keinerlei Sicherungen mehr nötig hat.

In Fig. 11 sind noch die Leitwerte der Tabelle I in Kurvenform als Funktion des Sekundärstromes aufgetragen, da der Verlauf dieser Werte ein wesentliches Merkmal des Streutransformators darstellt. Bei einem normalen Transformator ohne Streusteg verlaufen die Werte für den Wirkleitwert  $g_{1t}$  in Form einer stetig aufsteigenden Kurve, während beim Streutransformator diese Kurve einem Maximalwert zustrebt und dann wieder rasch gegen einen niederen Endwert abfällt. Die Kurve für den Blindleitwert  $b_{1t}$  dagegen nimmt entsprechend der zunehmenden Eisenbeanspruchung im Streusteg analog der Magnetisierungskurve zuerst bis zu einem Maximalwert zu, um dann infolge der zunehmenden Streuung und des Spannungsabfalles rasch abzufallen. Bei einem richtig dimensionierten Streutransformator liegen die Verhältnisse gerade in entgegengesetzter Richtung wie beim normalen Transformator.

Aus diesen Ausführungen über den Transformator mit luftspaltfreiem Streustegnebenschluss ergibt sich, dass dieser sich genau wie der normale Transformator behandeln lässt, wenn die besonderen Verhältnisse des Leerlaufzustandes berücksichtigt werden.

## Hochfrequenztechnik und Radiowesen — Haute fréquence et radiocommunications

### Elektronenoptische Abbildung von Photokathoden als Grundlage für Fernsehübertragung.

537.533.72 : 621.397.331.3

Ultraviolettes Licht löst aus dünnen Metallschichten Elektronen aus, wobei die Zahl der emittierten Elektronen proportional ist zur Belichtungsintensität (photoelektrischer Effekt); lässt man die ausgetretenen Elektronen eine hinreichend hohe Beschleunigungsspannung durchlaufen, so können sie einen Fluoreszenzschirm zum Aufleuchten bringen.

Auf dieser Grundlage machten *Holst, de Boer, Teves* und *Veenemans*<sup>1)</sup> folgenden Abbildungsversuch: Sie projizierten auf eine Cäsiumkathode ein Bild, und zwar in Durchsicht, und erhielten auf dem Fluoreszenzschirm einer in geringem Abstand parallel zur Kathodenfläche angeordneten Anode

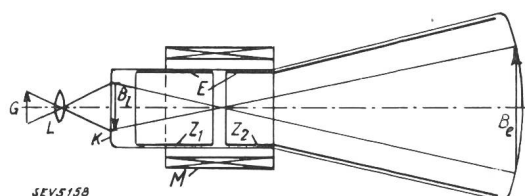


Fig. 1.  
Schema der Versuchsanordnung.

schon mit 4000 V Beschleunigungsspannung ein brauchbares Leuchtbild des Originals. Bei dem von *Farnsworth*<sup>2)</sup> entwickelten Kathodenstrahl-Fernseher wird das ebenfalls auf einer durchsichtigen Kathode entworfene Lichtbild mittels Beschleunigungsfeld und langer Magnetspule (Elek-

tronenoptik) in ein Elektronenbild auf der Anode verwandelt und dann in einzelne Bildpunkte aufgelöst.

In letzter Zeit hat sich *W. Heimann* die Aufgabe gestellt, möglichst grosse derartige Photokathodenflächen scharf und unverzerrt auf einen Fluoreszenzschirm abzubilden. Er benutzte zu seinen Versuchen die Anordnung nach Fig. 1. Die Linse *L* bildet den Gegenstand *G* auf die durchsichtige Kathode *K* ab. Das inhomogene elektrostatische Feld zwischen den beiden Metallzylindern *Z*<sub>1</sub> und *Z*<sub>2</sub> wirkt als elektrische, die gleichstromdurchflossene Spule *M* als magnetische Elektronenlinse; mit dieser Elektronenoptik lässt sich das Ka-

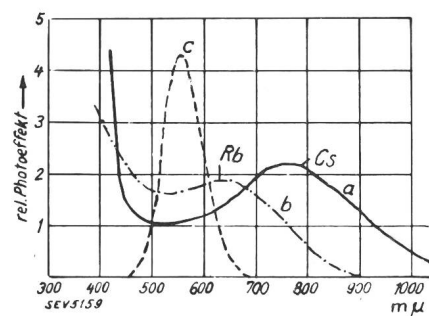


Fig. 2.  
Spektrale Empfindlichkeitsverteilung der verwendeten Kathoden.

thodenemissionsbild auf dem Fluoreszenzschirm als Leuchtbild *B* (Elektronenbild) ausreichend scharf einstellen.

Die Kathode besteht aus einer durchsichtigen Silberschicht als Trägermetall, auf die ein Alkalimetall im Vakuum aufdestilliert wurde; sie gehört der Schichtart *Ag — Cs<sub>2</sub>O — Cs* an<sup>3)</sup>, besitzt die spektrale Empfindlichkeitsverteilung Fig. 2,

<sup>1)</sup> G. Holst, J. H. de Boer, M. C. Teves, C. F. Veenemans, *Physica I* (1934), S. 297.

<sup>2)</sup> A. H. Brolly, *Electr. Eng.*, Bd. 53 (1934), S. 1153.

<sup>3)</sup> W. Kluge, *Z. f. Phys.*, Bd. 93 (1935), H. 11 u. 12; *Phys. Z.*, Bd. 34 (1933), S. 115.