

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 29 (1938)
Heft: 11

Artikel: Ueber die Messung der Einzelverluste bei Mutator-Transformatoren
Autor: Kübler, J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059380>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 03.04.2025

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

führend ausfällt, weil sich eine Muster- und Versuchseinrichtung von einer reinen Gebrauchsanlage ganz wesentlich unterscheidet. Ohne ausgedehnte Sicherheitsmassnahmen für alle zu gewärtigenden Betriebsvorkommnisse ist eine Erstaussführung nicht verantwortbar, ganz besonders nicht für ein Objekt von der Wichtigkeit eines Rathauses. Diese Vorsichtsmassnahmen bleiben selbstverständlich nicht ohne Einwirkung auf die Anlagekosten. Es wurde aber trotzdem versucht, die Grössenordnung der Anlagekosten unter Abzug all dieser Sonderbelastungen in Fig. 22 darzustellen. Dieses

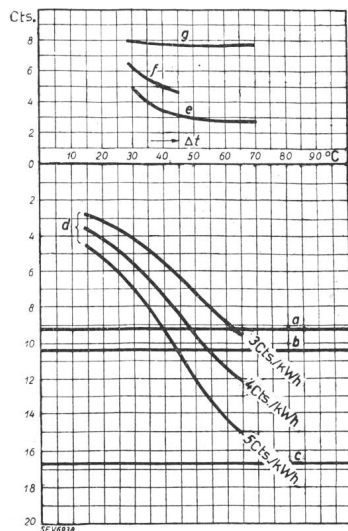


Fig. 22.

Anlage- (oben) und Betriebskosten (unten) in Rp./Meal/Tag einer Anlage für 200 Meal/h bei 10 Jahren Amortisationsdauer. Δt Differenz zwischen Vorlauftemperatur u. Innentemperatur.

Betriebskosten:

- a Koks Fr. 8.40/100 kg, $\eta = 70\%$.
- b Gasöl Fr. 15.—/100 kg, $\eta = 80\%$.
- c Widerstandsheizung 3 Rp./kWh
- d Radiatorenheizung mit Wärmepumpe.

Anlagekosten:

- e Radiatorenheizung mit Wärmepumpe.
- f Strahlungsheizung mit Wärmepumpe und Spitzendeckung.
- g Warmluftheizung mit Wärmepumpe und Spitzendeckung.

Diagramm zeigt einerseits die Anlagen- und andererseits die Betriebskosten als Funktion der Differenz zwischen maximaler Radiatoren- und Innentemperatur, von der der Wärmepumpenbetrieb in bereits erwähntem Masse abhängig ist. Die Kurve e zeigt die Änderung der Anlagekosten in Abhängigkeit von diesem Temperaturunterschied für eine koh-

lengefeuerte Radiatorheizung. Je niedriger die Vorlauftemperatur gewählt wird, um so grösser werden Radiatoren und Rohrleitungen. Das Verhältnis, in dem sich diese Heizungsteile verändern, ist vollständig bekannt und der Verlauf der Kurve dementsprechend gegeben. Schon weniger abgeklärt liegen die Verhältnisse bei der Strahlungsheizung, weil diese Heizungsart noch jüngeren Ursprungs ist. Es kann aber immerhin mit Sicherheit vorausgesehen werden, dass eine Erniedrigung der Heizwassertemperatur eine Erhöhung der Rohrlängen der Heizregister mit sich bringt. Bei der Warmluftheizung ändern sich mit der Heizwassertemperatur nur die Lufterhitzer und Wasserleitungen, welche aber nur einen geringen Anteil der Anlagekosten dieses Heizungssystems ausmachen. Vom Nullpunkt nach unten sind auf der Ordinate die Betriebskosten aufgetragen, und es ist sofort ersichtlich, dass die Anlagekosten gegenüber den Betriebskosten von untergeordneter Bedeutung sind. Es kommt also gar nicht so darauf an, ob die Anlage etwas mehr oder weniger kostet; die Hauptsache ist eine billige Betriebsweise. Es geht deshalb aus diesem Diagrammteil hervor, dass sich die Betriebskosten einer Wärmepumpenanlage für den Elektrizitätsproduzenten mit absolut tragbaren kWh-Preisen heute schon im Gebiete der Betriebskosten anderer Heizungsarten bewegen. Es muss aber nochmals festgehalten werden, dass diese Kurven und Werte als qualitative Angaben zu betrachten sind, die später einmal eingehender behandelt werden sollen.

Nachdem die Anlage erst gegen Ende dieser Heizsaison vollständig in Betrieb genommen werden konnte, müsste die verbindliche Bekanntgabe irgendwelcher Betriebs- oder Erfahrungsergebnisse als verfrüht betrachtet werden. Mit Bestimmtheit kann aber heute schon gesagt werden, dass die bereits durchgeführten Messungen, die mit der für derartige Unternehmen zu verantwortenden Genauigkeit hergestellten Berechnungen bestätigten. Gleichfalls ist das für die Anlage vorausgesetzte Interesse nicht ausgeblieben, und die Hoffnungen, die auf die Konkurrenzfähigkeit dieses Heizungssystems in bezug auf Betriebs- und Anlagekosten gesetzt wurden, sind sogar übertroffen worden. Darüber wird in gleicher Weise später einmal eingehend zu berichten sein.

Ueber die Messung der Einzelverluste bei Mutator-Transformatoren.¹⁾

Von J. Kübler, Baden.

621.317.384 : 621.314.21 : 621.314.8

Die Ströme in den Mutator-Transformatoren weichen von der Sinusform ab. Die Messung der Verluste dieser Transformatoren wäre deshalb im allgemeinen nur vollkommen einwandfrei, wenn Transformator und Mutator zusammenschaltet und die ganze Gruppe betriebsmässig voll belastet würde. Diese Messart aber ist aus bekannten Gründen nicht sehr genau. Zudem ist sie häufig nicht ausführbar, so dass man die Einzelverluste des Transformators, unter Umständen zusammen mit denjenigen des Mutators, bestimmen muss. Es werden verschiedene Arten der Messung der Einzelver-

Les courants des transformateurs de mutateurs différent de la forme sinusoïdale. La mesure des pertes de ces transformateurs ne serait en général absolument correcte qui si le transformateur et le mutateur étaient accouplés et si le groupe fonctionnait à pleine charge de service.

Cependant, pour des raisons connues, ce mode de mesure n'est pas très exact. En outre, on ne peut souvent pas l'appliquer, de sorte que l'on en est réduit à déterminer séparément les pertes du transformateur et du mutateur. L'auteur discute plusieurs méthodes de mesure des pertes, en parti-

¹⁾ Mit diesem Artikel ist beabsichtigt, einen Beitrag zur Klärung der Aufstellung von Regeln der Commission Electrotechnique Internationale (CEI) für Messung der Einzelverluste bei Transformatoren, welche für den Betrieb von Mutatoren bestimmt sind, zu leisten.

luste, insbesondere der Kupferverluste und die Umrechnung der Resultate auf Mutatorbetrieb besprochen. Eine Art der Bestimmung der Kupferverluste ist als besonders einfach hervorgehoben und zur Aufnahme in die CEI-Regeln empfohlen. Diese Methode hat zudem den grossen Vorteil, dass sie sich nicht auf Transformatoren für Wechselstrom-Gleichstrom-Mutatoren beschränkt, sondern für Mutatortransformatoren einwandfrei ganz allgemein anwendbar ist.

Einleitung.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich in erster Linie auf Mutatoren für Starkstromanlagen, also Quecksilberdampfmutatoren, Glühkathoden- und mechanische Mutatoren.

Die Ströme in den auf Mutatoren arbeitenden Transformatoren weichen erheblich von der Sinusform ab. In den Primärwicklungen fliessen Ströme, die zwar symmetrisch zur Nulllinie verlaufen, aber gewisse Oberharmonische führen. In den Sekundärwicklungen, d. h. in den mutatorseitigen Wicklungen, liegen sie sogar in der Hauptsache einseitig der Nulllinie, führen also nebst der Grundwelle und Oberwellen in grösserer Zahl als in den Primärströmen, noch ein starkes Gleichstromglied (Beispiel Fig. 1).

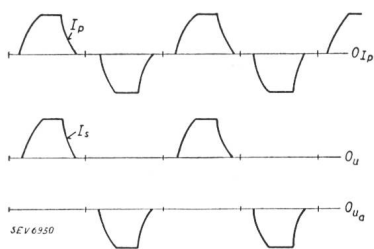


Fig. 1.
Schematische Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Stromkurven in Primär- und Sekundärwicklungen.
 O_{I_p} Nulllinie d. Kurve des Primärstromes.
 O_u Nulllinie, Phase u .
 O_{u_a} Nulllinie, Gegenphase u_a .

Weder für die Messung der Eisenverluste noch insbesondere für die Messung der Kupferverluste darf deshalb Spannung von sinusförmiger Form ohne weiteres benutzt werden.

Unzweifelhaft würde durch Messung der dem Transformator zugeführten und der von ihm abgegebenen Leistung bei betriebsmässiger Nenn-Belastung des mit dem Transformator zusammengeschalteten Mutators eine Messung der Totalverluste mit der richtigen Kurvenform vorgenommen. Allein da es sich um eine Differenzmessung handelt, wo die Verluste nur wenige Prozente der Durchgangsleistung betragen, kann das Resultat wegen den Instrumenten- und den Ablesfehlern keinen Anspruch auf Genauigkeit machen. Zudem wird man häufig aus andern Gründen die Messung in dieser Form nicht ausführen wollen oder können.

Man wird deshalb versuchen, die Verluste des Transformators, analog wie dies für gewöhnliche Transformatoren geschieht, getrennt als Leerlauf- und als Kurzschlussverluste zu messen und die Form des Stromes konventionell auf angemessene Art berücksichtigen.

An die dabei benützten Messarten bzw. Umrechnungen müssen die Forderungen gestellt werden:

1. dass das Resultat in allen Fällen möglichst genau den im wirklichen Betriebe auftretenden Verlusten entspricht,
2. dass das Messverfahren mit den in den Versuchsständen vorhandenen Maschinen und Messinstrumenten und ohne verfeinerte, umständliche Messmethoden durchführbar ist und

culier des pertes dans le cuivre, et examine comment on peut ramener les résultats à l'exploitation avec mutateur. Il relève particulièrement une méthode très simple pour déterminer les pertes dans le cuivre et recommande de l'adopter dans les règles de la CEI. Cette méthode a en outre le grand avantage, qu'elle est applicable non seulement aux transformateurs pour mutateurs alternatif-continu, mais d'une façon générale à tous les transformateurs pour mutateurs.

3. dass die Messart sowohl als auch die Art der Umrechnung dem Abnahmebeamten leicht verständlich ist, so dass er sich von deren Genauigkeit selbst Rechenschaft geben kann.

Messung der Einzelverluste des Transformators.

1. Messung der Eisenverluste (Leerlaufmessung).

Es ist klar, dass auch bei sinusförmiger Speisung bei Last die verzerrten Ströme einen gewissen Einfluss auf die Magnetisierung der Eisenstücke ausüben. Da dieser Einfluss aber nicht wesentlich und bei Leerlauf überhaupt nicht vorhanden ist und da er bei Belastung eher eine Erniedrigung verursacht, darf ohne merkliche Fehler die Eisenverlustmessung in der gewöhnlichen Weise als Leerlaufmessung mit rein sinusförmiger Spannung vorgenommen werden.

2. Messung der Kupferverluste (Kurzschlussmessung).

Anders ist es bei den Kupferverlusten. Sie sind erheblich von der Kurvenform abhängig. Richtig wäre es, bei der Kurzschlussmessung die Stromform, die betriebsmässig auftritt, nachzubilden. Wohl gibt es ein Verfahren — wir treten unter Vorschlag 1 näher darauf ein —, das unter besonderen Umständen und unter Zusammenschaltung von Transformator und Mutator erlaubt, auch bei Kurzschluss die angenähert richtige Stromform zu erzielen. Wenn aber der Transformator für sich allein gemessen werden soll, was in sehr vielen Fällen gar nicht anders möglich oder zum mindesten sehr erwünscht ist, so ist der Versuch einer Nachbildung der richtigen Kurvenform des Stromes aussichtslos. Es bleibt kein anderer Ausweg, als mit sinusförmiger Spannung Kupferverlustmessungen im Kurzschluss derart auszuführen, dass sie den wirklichen Verhältnissen sich annähern oder dass der Zusammenhang mit den im Betriebe auftretenden Verlusten sich gut überblicken lässt, so dass eine Umrechnung auf einfacher Basis mit grösstmöglicher Annäherung erfolgen kann.

Mehrere Vorschläge wurden bekannt, die diesen Bedingungen mehr oder weniger entsprechen.

Vorschlag 1.

R. Savagnone²⁾ schlägt vor — wobei diese Messart allerdings allein auf Wechselstrom-Gleichstrom-Mutatoren mit Gittersteuerung beschränkt ist —, Transformator und Mutator betriebsmässig zusam-

²⁾ Determinazione del Rendimento dei Gruppi Trasformatore Raddrizzatore mediante Prove di Funzionamento a vuoto e a corto-circuito. Elettrotecnica Vol. XXIII, Nr. 23, S. 8. R. Savagnone.

menzuschalten und die Gleichstromseite kurzzuschliessen. Dann wird auf die Wechselstromseite des Transformators eine sinusförmige Spannung von solcher Grösse gegeben und gleichzeitig die Gittersteuerung so eingestellt, dass in den Anodenleitungen Ströme mit dem richtigen Effektivwert fliessen, wobei auch angenähert die richtige Kurvenform des Stromes entsteht. Durch Messung der zugeführten Energie erhält man so die Kupferverluste des Transformators mit den Verlusten des Mutators zusammen.

So schön dieses Verfahren auf den ersten Blick erscheint, so hat es doch seine erheblichen Nachteile. Einmal beschränkt es sich auf Mutatoren mit ausgeprägter Gittersteuerung. Dann verlangt es unbedingt den Zusammenbau so ziemlich der ganzen Anlage, was nicht immer möglich, auf alle Fälle aber zeitraubend und kostspielig ist. Im weiteren ist eine Umrechnung auf die richtige Temperatur nicht einfach, weil es Schwierigkeiten macht, die Verluste des Mutators von denjenigen des Transformators zu trennen und die Umrechnung für diese beiden Teile verschieden erfolgen muss. Zum Schluss muss der Einfluss der Oberwellen des Mutators auf das speisende Wechselstromnetz erheblich verschieden sein, je nachdem man mit voller Gleichstromspannung oder im Kurzschluss arbeitet. Dieses verschiedene Verhalten wirkt sich aber dadurch aus, dass die Abrundungen der Stromkurve verschieden sind und es fast ausgeschlossen ist, in beiden Betriebsarten wirklich ganz gleiche Kurvenform zu erreichen.

Aus diesen kurzen Bemerkungen geht hervor, dass diese Messart weder einfach noch allgemein anwendbar ist und nicht einmal den Vorteil der absoluten Genauigkeit für sich hat. Sie eignet sich deshalb nicht, um in internationale Regeln aufgenommen zu werden.

Vorschlag 2.

Ein weiterer Vorschlag stammt von DeBlieux³⁾. Er stützt sich auf die Tatsache, dass beim Kurzschlussversuch mit sinusförmiger Spannung unter Kurzschliessen ausgewählter Teile der Sekundärwicklungen, abgesehen von Zusatzverlusten durch die Oberharmonischen, gerade so viel Kupferverluste entstehen, wie beim Wechselstrom-Gleichstrom-Mutatorbetrieb, gleichen Effektivwert des Primärstromes vorausgesetzt. Ein Beispiel mag dieses Verfahren erläutern.

Vorausgesetzt ist der Transformator für primär Dreieck-, sekundär Sechshephasenschaltung mit Saugdrosselspule nach Fig. 2.

In den Zweigen $o-u$ und o_a-u_a entstehen bei Vollastbetrieb auf den Mutator die Ströme etwa nach Fig. 1. Die beiden Stromwellen überdecken sich zeitlich nirgends. Die Primärwicklung führt einen Strom, der die Sekundärwellen der beiden Zweige $o-u$ und o_a-u_a in geometrisch ähn-

licher Form enthält. Sein Effektivwert sei I_p . Wenn nun die beiden Widerstände R_s und R_{sa} einander gleich sind, was ja immer der Fall ist, so werden sekundärseitig die gleichen Kupferverluste entstehen, ob nun die beiden sekundären Stromstösse $o-u$ und o_a-u_a in den beiden ihnen zu-

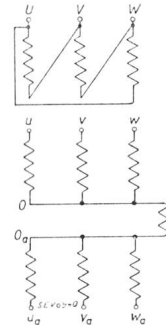


Fig. 2.
Sechshephasenschaltung mit Saugdrosselspule.

gehörigen Wicklungszweigen oder nacheinander im gleichen Zweig $o-u$ fliessen. Diese Erkenntnis wird zur Messung der Kupferverluste benützt. Auf der Sekundärseite schliesst man das eine Drehstromsystem kurz, während das andere offen bleibt (Fig. 4) und auf der Primärseite wird eine so grosse sinusförmige Spannung angelegt, dass gerade ein Strom vom Effektivwert I_p fliesst.

Statt mit dem Strom I_p zu messen, der bei Voll-

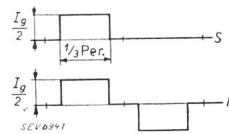


Fig. 3.
Darstellung der rechteckigen Stromkurven für Primär- (P) und Sekundärwicklung (S).

lastbetrieb wirklich auftritt, schlägt DeBlieux vor, einen grösseren Strom I_p' zu verwenden, der aus der rein theoretischen Rechteckform des Mutatorstromes, also ohne Ueberlappung zeitlich aufeinanderfolgender Phasenströme, abgeleitet ist (Fig. 3). Er will damit den bei der Messung nicht erfassbaren zusätzlichen Verlusten der Oberharmonischen in einem gewissen Masse Rechnung tragen.

Aehnliche Ueberlegungen wie die hier ausgeführten gestatten die Messung der Kupferverluste auch für andere Schaltungen, wobei unter Umständen aber mehrere Kurzschlussmessungen unter Verwendung von entsprechend gewählten Teilen der Sekundärwicklung erforderlich sind⁴⁾.

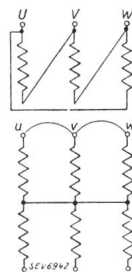


Fig. 4.
Anordnung der Kurzschlussbügel nach Verfahren 2.

Dieses Messverfahren ist leicht zu übersehen. Allein es haftet ihm ein grosser Mangel an. Die Zerlegung der beiden Halbwellen in den Zweigen $o-u$ und o_a-u_a nach Fourier zeigt, dass die

³⁾ Losses in Transformers for Use with Mercury Arc Rectifiers by E. V. De Blieux, Associate AIEE, presented at the North Eastern District Meeting of the AIEE Rochester N. Y. April 29 — May 2 1931.

⁴⁾ Dieses Messverfahren für die Sechshephasenschaltung wurde übrigens schon etwa 1914 von der A.G. Brown, Boveri & Cie., Baden, ausgearbeitet und seither vielfach bei ihr und ihren Schwestergesellschaften verwendet.

Grundwelle in *beiden* Zweigen gleichzeitig fließt und dass daneben in jedem Zweige noch ein Gleichstromglied und Oberwellen vorhanden sind. Im Messverfahren aber fließt eine Grundwelle von doppelter Höhe nur in einem Zweige, während der andere Zweig ganz unbelastet ist. Dies entspricht also nicht der wirklichen Verteilung der Grundwelle, hätte aber keine Nachteile, wenn es möglich wäre, die Wicklungen der beiden Zweige vollkommen zu mischen. Doch lässt sich dies niemals erreichen, weil sie je nach der Spannung mehr oder weniger voneinander isoliert, also distanziert sein müssen. Der Konstrukteur ist also gezwungen, jeden einzelnen Wirklungs-zweig mehr oder weniger *ungleichmässig* und nur die beiden Zweige insgesamt über die Primärwicklung gleichmässig zu verteilen. Er weiss aber, dass ganz ungewöhnliche Streuverhältnisse und *unüberblickbare* zusätzliche Verluste auftreten, wenn er Kurzschlussmessungen an Transformatoren ausführt, deren primäre und sekundäre Ampère-Windungen, was fast ohne Ausnahme bei der Messung nach dem vorliegenden Verfahren der Fall ist, ungleichmässig über die Säulengänge verteilt sind. Ein Messverfahren aber, das nicht für alle Verhältnisse anwendbar ist, sollte nicht in die Regeln aufgenommen werden.

Das Beispiel 4 (Tabelle I) zeigt, wie stark dieses Messverfahren von den im folgenden noch beschriebenen Verfahren und von der Rechnung abweichende Werte für die Kupferverluste eines gegebenen Transformators zeigen kann.

Kupferverluste nach verschiedenen Methoden gemessen und umgerechnet, für Wechselstrom-Gleichstrom-Mutatortransformatoren.

Tabelle I.

Transf. Nr.	Schaltung	für Gleichrichterbetrieb gerechnete Verluste Warm (75%) %	Kupferverluste in % der für Gleichrichterbetrieb gerechneten Bestimmung ¹⁾ nach		
			Vorschlag 2 %	Vorschlag 3 %	Vorschlag 4 %
1	} nach Fig. 2	100	103	100	99
2		100	105	102	98
3		100	105	99	97
4	Primär: Stern Sekundär: wie Fig. 2	100	120	99	101

¹⁾ d. h. gemessen und umgerechnet.

Es liegt aber bei dem Transformator dieses Beispiels absolut kein Grund vor — und dafür spricht auch das Resultat der Erfahrungen im Betrieb (Erwärmung) —, dass die wirklichen Kupferverluste in so erheblichem Masse über dem berechneten Wert liegen müssten. Es muss daraus geschlossen werden, dass das verwendete Messverfahren für den vorliegenden Transformator sich nicht eignet.

Die Gründe für das Verhalten dieses Transformators bei der Messung nach DeBlieux/Brown Boveri liegen in der Anordnung der Sekundärwicklungen und Ableitungen. Der Konstrukteur hat die Sekundärwicklungen so über die Säule verteilt, dass die beiden Wicklungs-zweige gegenüber der Mitte der Primärwicklung in entgegengesetzter Richtung etwas verschoben sind. Zudem sind

die Ableitungen so angeordnet, dass zur Vermeidung zusätzlicher Verluste in den Armaturteilen (Kasten usw.) sich die Ströme möglichst kompensieren. Bei der Kurzschlussmessung nur mit einer Sekundärwicklung sind nun die sekundären Ampère-Windungen gegenüber den primären axial verschoben, was im Mutatorbetrieb nicht der Fall ist und die Kompensation der Ströme in den Ableitungen entfällt. Dass unter diesen Umständen aussergewöhnliche zusätzliche Verluste auftreten, ist dem Fachmann ohne weiteres klar.

Dem DeBlieux-Verfahren haftet noch ein weiterer Mangel an: Weil ja nur Teile der Sekundärwicklung zum Messen kurzgeschlossen werden, stellt es auch den wirklichen Wert der Kurzschluss-spannung nicht fest. Dazu muss eine weitere Messung vorgenommen werden, wo alle Sekundärwicklungsteile kurzgeschlossen sind. Das Verfahren verlangt also mindestens zwei Kurzschlussmessungen.

Aus den bisherigen Ausführungen geht hervor, dass Verfahren zu suchen sind, bei denen am Kurzschlussversuch alle Sekundärwicklungen teilnehmen. Solche Verfahren stehen zur Verfügung. Sie gestatten, zu Werten der Kupferverluste zu kommen, die nach allen Ueberlegungen sicherlich kaum wesentlich von den im wirklichen Betrieb auftretenden abweichen. Es werden im folgenden zwei solcher Verfahren erläutert. Beide Verfahren haben die gleiche Messung zur Grundlage, nämlich Messung der Kupferverluste unter Speisung der Primärseite mit dem dem Mutatorbetrieb entsprechenden Effektivwert des Vollaststromes⁵⁾ bei so auf allen Zweigen kurzgeschlossener Sekundärwicklung, dass sich der Kurzschlußstrom auf alle Zweige so genau als möglich gleich verteilt wie beim Mutatorbetrieb.

Vorschlag 3.

Wie schon früher ausgeführt wurde, führt die Zerlegung des Sekundärstromes darauf, dass nebst einem Gleichstromglied und der Grundharmonischen eine Anzahl Oberharmonische vorhanden sind. Sei I_{n_s} der Effektivwert der n ten Harmonischen und I_g das Gleichstromglied, so berechnen sich die sekundären ohmschen Verluste P_s , wenn a die Phasenzahl und R_s den Widerstand pro Phase bedeutet, zu

$$P_s = a \cdot R_s \cdot (I_g^2 + \sum I_{n_s}^2)$$

Für die Primärseite ergibt sich analog:

$$P_p = b \cdot R_p \cdot \sum I_{n_p}^2$$

wobei unter I_{n_p} diejenigen *Harmonischen* zu verstehen sind, die nur in der Primärwicklung fließen und b die Primärphasenzahl bedeute.

⁵⁾ Als Vollaststrom kann der Strom gewählt werden, der im Mutatorbetrieb wirklich auftritt. Da dieser Strom aber nicht nur von der Mutatoranlage, sondern auch von den Konstanten des Primärnetzes und von andern Umständen abhängt, so dürfte es besser sein, in den Regeln einen bestimmten Primärstrom konventionell festzulegen. Man mag dafür den von DeBlieux vorgeschlagenen Wert der reinen Rechteckform wählen, oder einen Strom, der dem wirklichen Betrieb besser angenähert ist, indem der Wert der Rechteckform mit Rücksicht auf die Abrundung mittels eines konventionellen Faktors angemessen reduziert wird.

Nun ist aber

$$I_p = \sqrt{\Sigma I_{np}^2}$$

der Effektivwert desjenigen Primärstromes, der bei Mutatorbetrieb fliesst, und zwar sei es der Vollaststrom, wie er konventionell gemäss Fussnote 5 festgelegt und auf dem Schilde des Transformators vom Fabrikanten aufgeschlagen ist. Wenn man also den Transformator im Kurzschluss mit diesem Strom misst, so ist sicher, dass in der Primärwicklung die gleichen *ohmschen* Verluste entstehen wie im wirklichen Vollastbetriebe. Von den zusätzlichen Verlusten (Foucault-Verlusten) soll vorläufig abgesehen werden. Andererseits sind die sekundär bei der Messung auftretenden Verluste jedenfalls nicht die richtigen. Aber es ist klar, dass der Strom in den Sekundärwicklungen dem Primärstrom entspricht, und er hat deshalb einen Effektivwert, der denjenigen harmonischen Stromanteilen genügt, die beim Vollastbetriebe *sowohl primär, als auch sekundär* fließen. Diesen Anteilen gemäss werden also auch Sekundärverluste auftreten. Für die harmonischen Stromanteile jedoch, die bei Mutatorbetrieb allein sekundär fließen, ist ein entsprechender Zuschlag zu machen. Dieser Zuschlag lässt sich rechnerisch leicht feststellen unter der Voraussetzung, dass man mit der theoretischen Rechteckform des Stromes, also ohne Ueberlappung, rechnet. Diese Annahme entspricht zwar nicht der Wirklichkeit. Der Fehler ergibt aber in genau begrenztem Masse einen zu grossen Wert der Verluste und bietet somit ähnlich wie beim Verfahren 2 einen gewissen Ausgleich für die nicht feststellbaren zusätzlichen Verluste (Foucault-Verluste) der Oberharmonischen. Ein Beispiel möge das Verfahren klarer zum Ausdruck bringen.

Wieder sei ein Transformator nach Fig. 2 vorausgesetzt, also Schaltung Drehstrom/Doppeldrehstrom mit Saugdrosselspule. Uebersetzung der Einfachheit halber 1 : 1. Sekundärseitig seien die Ströme in Rechteckform angenommen (Fig. 3)⁶⁾. Die Höhe des Rechteckstromes einer Phase ist $I = \frac{I_g}{2}$ wenn I_g den abgegebenen Gleichstrom bedeutet.

Der Effektivwert des Rechteckes einer Phase ist demnach

$$I_s = \sqrt{\left(\frac{I_g}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{3}} = \frac{I_g}{2\sqrt{3}}$$

Auf der Primärseite ergibt sich damit ein Effektivwert des Stromes

$$I_p = \sqrt{\left(\frac{I_g}{2}\right)^2 \cdot \frac{2}{3}} = \frac{I_g}{\sqrt{6}}$$

Daraus errechnen sich die ohmschen Stromwärmeverluste für *Mutatorbetrieb* zu

$$P = 3 I_p^2 \cdot R_p + 6 I_s^2 \cdot R_s = I_g^2 \cdot \left(\frac{3}{6} R_p + \frac{6}{4 \cdot 3} R_s\right) = \frac{I_g^2}{2} (R_p + R_s).$$

⁶⁾ Infolge der Saugdrosselspule erstreckt sich das Rechteck über 120° der Periode.

Drückt man jetzt primärseitig den sinusförmigen Drehstrom

$$I_p = \frac{I_g}{\sqrt{6}}$$

auf, wenn sekundär beide Systeme gemäss Fig. 5

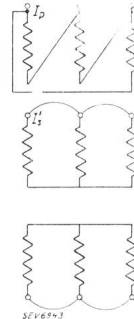


Fig. 5.

Anordnung der Kurzschlussbügel für die Verfahren 3 und 4.

kurzgeschlossen sind, so entsteht in jedem Zweige ein Strom von der Grösse

$$I'_s = \frac{I_p}{2} = \frac{I_g}{2 \cdot \sqrt{6}}$$

und die dabei auftretenden *ohmschen* Verluste (also ohne Zusatzverluste) sind:

$$P' = 3 I_p^2 \cdot R_p + 6 I_s'^2 \cdot R_s = \frac{I_g^2}{2} \cdot \left(R_p + \frac{R_s}{2}\right).$$

Der Unterschied zwischen den Kupferverlusten bei Mutatorbetrieb und der Kurzschlussmessung mit Drehstrom beträgt mithin:

$$P - P' = \frac{I_g^2}{2} \cdot \frac{R_s}{2} = \frac{I_g^2 \cdot R_s}{4}.$$

Zu den gemessenen Verlusten P' hat man somit den Zuschlag $\frac{I_g^2 \cdot R_s}{4}$ zu machen, um auf die Kupferverluste bei Mutatorbetrieb zu kommen, also

$$P = P' + \frac{I_g^2 \cdot R_s}{4}.$$

In gleicher Weise kann für jede mögliche Schaltung des Transformators der zugehörige Zuschlag berechnet werden. Damit ist es möglich, mit der normalen Kurzschlussmessung die Kupferverluste bei Mutatorbetrieb zu bestimmen.

Das Verfahren 3 ist an sich sehr einfach. Zudem ist es, von seite des Transformator-Fachmannes aus betrachtet, einwandfreier als das Verfahren 2. Das Comité Electrotechnique Suisse (CES) hat deshalb der CEI das Verfahren 3 zur Aufnahme in die internationalen Regeln vorgeschlagen. Es ist aber nicht zu bestreiten, dass, eben weil für jede Schaltung ein individueller Zuschlag festzusetzen und weil nicht zu umgehen ist, die Theorie etwas zu erläutern, die Regeln in unerwünschter Weise weitläufig ausfallen müssen.

Verfahren 4.

Nun steht noch ein weiteres Verfahren, das Verfahren 4, zur Verfügung, das unseres Wissens von

englischer Seite vorgeschlagen wurde. Seine Grundlage ist die gleiche wie bei Verfahren 3, dagegen ist die Umrechnung auf Mutatorbetrieb anders, und zwar besonders einfach. Auch genügen wenige Worte, es zu erklären. In gleicher Weise, wie bei Verfahren 3, wird eine normale Kurzschlussmessung durchgeführt, indem man wieder sekundär alle Zweige entsprechend kurzschliesst und die Primärseite mit dem Nennstrom I_p von sinusförmiger Form speist. So entstehen in der Primärwicklung die Verluste in gleicher Höhe wie bei Mutatorbetrieb und nur für die Sekundärwicklung ist eine Korrektur anzubringen.

Nimmt man wieder den Transformator nach Fig. 2 $\Delta/\lambda\gamma$ mit Saugdrosselspule an und lässt die zusätzlichen Verluste, auf die nachher eingegangen wird, nochmals ausser Spiel, so sind die gemessenen Kupferverluste wieder P' , und sie verteilen sich auf Primär und Sekundär wie vorher nach der Formel

$$P' = 3 I_p^2 \cdot R_p + 6 I_s^2 \cdot R_s$$

wobei die Bezeichnungen gleich wie im Verfahren 3 seien. Der zweite Ausdruck der rechten Seite ist nun umzurechnen, und zwar lässt sich dies in einfacher Weise ausführen nach dem Quadrate der effektiven Stromstärken bei Versuch und bei Mutatorbetrieb, so dass die Verluste P für Mutatorbetrieb werden:

$$P = P' - 6 I_s^2 \cdot R_s + 6 I_s'^2 \cdot R_s \cdot \frac{I_s^2}{I_s'^2}$$

oder umgerechnet:

$$P = P' + 6 R_s (I_s^2 - I_s'^2).$$

Für andere Schaltungen sind die Umrechnungen sinngemäss vorzunehmen.

Dieses Verfahren 4 ist in allen Beziehungen einfach. Es erlaubt, mit zwei Messungen, nur einer Kurzschlussmessung und der *bei allen andern Verfahren auch erforderlichen Widerstandsmessung*, durchzukommen. Die Art der Umrechnung ist klar, leicht verständlich und einleuchtend. Die Übereinstimmung der gefundenen Verluste im Vergleich zu andern Verfahren unter Beachtung der zusätzlichen Verluste nicht schlechter. Die Wicklungen werden in der dem Betriebe entsprechenden Weise durch den Grundwellenstrom belastet, so dass Zusatzverluste durch nicht betriebsmässige Streuung vermieden sind. Und noch einen eminenten Vorteil besitzt gerade dieses Verfahren: Es ist bei sinngemässer Anwendung für jede Art Mutatorbetrieb, sei es nun Wechselstrom-Gleichstrom-, Gleichstrom-Wechselstrom- oder Wechselstrom-Wechselstrom-Betrieb, und ferner für Betrieb mit Gitterregulierung brauchbar. Es liegen somit wichtige Gründe vor, um gerade dieses Verfahren allen andern Verfahren vorzuziehen und es zur Aufnahme in die Regeln der CEI in erster Linie zu empfehlen.

Bisher wurden die 4 Verfahren in rohen Zügen erläutert. Es ist aber von Wert, auf *gewisse Einzelheiten* etwas näher einzutreten.

Stromangaben auf dem Leistungsschild des Transformators.

Die Frage, inwieweit die betriebsmässige Stromkurve berücksichtigt ist (also die Grundwelle und die Harmonischen), wurde schon bei den einzelnen Verfahren behandelt. Man ging davon aus, bei den Messungen den Effektivwert des Stromes einzustellen, der auf dem Schilde des Transformators eingetragen ist. Aber da müsste nun noch definitiv entschieden werden, welchen Stromwert man als Primärnennstrom auf dem Schilde eintragen soll. DeBlieux schlägt, wie früher schon angegeben, den Wert vor, den man erhält ohne Ueberlappung, also nach der reinen Rechteckform. Dieser Wert dürfte in allen Fällen zu hoch sein, je nach Schaltung 3...8%. Wollte man noch einen Korrekturfaktor einführen, so müsste ein Mittelwert gewählt oder es müssten für die verschiedenen Schaltungen individuelle Korrekturfaktoren festgelegt werden. Aber diese würden auch nur angenähert gelten, da sie je nach den Konstanten von Primär- und Gleichstrom-Netz wieder verschieden sein müssten. Da der Fehler zudem nicht besonders gross sein wird, wenn man auf die Rechteckform sich festlegt und diese einen klaren, eindeutigen und einfach zu rechnenden Wert fixiert, wird es am zweckmässigsten sein, diesen als Nennwert in den Regeln vorzuschreiben. Es ist dann nur noch festzulegen, dass für die Belastung der ganzen Mutatoranlage *nicht* der Nennstrom des Speisetransformators, sondern der *Nenngleichstrom* massgebend sein muss, andernfalls hätte ein Abnehmer doppelte Angaben und er könnte die Anlage in Gleichstrom auf Grund der Angaben des Transformatorschildes überlastet betreiben. Was hier in erster Linie für den Nennprimärstrom gesagt ist, gilt auch für die Nennsekundärströme.

Zusätzliche Stromwärmeverluste.

Eine weitere Frage ist, in welchem Masse die zusätzlichen Stromwärmeverluste (Foucault-Verluste) erfasst werden können. Da zum mindesten mit einem Strom von der Grundwelle gemessen wird, der eher höher ist als der betriebsmässige, *so erfassen alle Verfahren die zusätzlichen Verluste der Grundwelle* in etwas übertriebener Höhe mit. Eine Besonderheit weist das Verfahren 2 auf, indem es infolge der nur teilweisen Belastung der Sekundärwicklung zu betriebsmässig nicht auftretenden, unter Umständen sehr hohen Zusatzverlusten der Grundwelle Anlass geben kann, wie dies näher unter Verfahren 2 schon erläutert ist. Diese unkontrollierbaren Zusatzverluste werden aber mitgemessen und fälschen das Resultat.

Die zusätzlichen Verluste der Oberharmonischen werden dagegen nur von Verfahren 1 in annähernd richtiger Höhe mit gemessen. Die drei andern Verfahren sind in dieser Hinsicht einander gleich. Die Messungen erfolgen mit Strom der Grundwellenfrequenz; Zusatzverluste der Oberharmonischen können sie nicht enthalten.

Es ist reizvoll, kurz zu überlegen, welche magnetischen Felder zusätzliche Verluste der Oberhar-

monischen verursachen können. Ströme von gerader Ordnungszahl fließen i. allg. ausschliesslich in den Sekundärwicklungen, vorausgesetzt, dass der Transformator sachgemäss entworfen ist. Die entsprechenden magnetischen Streuflüsse entwickeln sich also allein zwischen Teilen der Sekundärwicklung. Sollte man also die Zusatzverluste der geraden Harmonischen messen wollen, so müsste man Teile der Sekundärwicklung mit Strom der entsprechenden Oberharmonischen speisen und andere richtig gewählte Teile dieser Wicklung kurzschliessen.

Für die dritte Harmonische und deren ungeraden Vielfachen gilt bei einigen Schaltungen das gleiche wie für die geradzahigen Harmonischen; bei andern Schaltungen tritt sie überhaupt nicht auf, wieder bei andern kann sie sogar auf die Primärwicklung übertragen werden. Das zugehörige Streufeld bildet sich dann zwischen Sekundärwicklungsteilen und Primärwicklung aus und es kann die sogenannte Joch-zu-Joch-Streuung auftreten, die Zusatzverluste nicht nur in Kupfer, sondern auch in den Eisenarmaturteilen, Kasten usw. verursacht. Diesen besonderen Fall der Uebertragung eines Stromes von der dritten Ordnungszahl auf die Primärwicklung kann aber der Transformatorbauer im allgemeinen leicht vermeiden.

Alle übrigen Harmonischen übertragen sich auf die Primärseite. Glücklicherweise ist ihre Höhe gegenüber den Werten der Rechteckform schon stark gedämpft, und zwar um so mehr, je höher ihre Ordnungszahl ist. Die bezüglichlichen magnetischen Streufelder entwickeln sich also zwischen Unter- und Oberspannungswicklung. Man sieht aus dieser Ueberlegung, dass man unter entsprechendem Ausbau der Messung auch die Zusatzverluste der Oberharmonischen erfassen könnte. Es ist aber klar, dass Vorschriften über solche Messungen der Kosten wegen nicht in Regeln gehören. DeBlieux schlägt vor, den Effektivwert der Rechteckform des Stromes nicht nur deshalb zu wählen, weil seine Bestimmung eindeutig ist, sondern auch deshalb, weil die Messungen mit diesem Werte höhere Verlustwerte ergeben, als wenn der wirklich im Betrieb auftretende Effektivwert benutzt wird, und er will damit, wie früher bereits erwähnt, den mit der einfachen Messung nicht erfassbaren zusätzlichen Verlusten der Oberharmonischen konventionell Rechnung tragen. Mit diesem Vorschlage kann man sich einverstanden erklären.

Im Anschluss an diese Ausführungen sei noch der Artikel von Th. Rosskopf⁷⁾ erwähnt. Der Verfasser bricht eine Lanze für das Verfahren 2. Es dürfte überflüssig sein, auf den Inhalt näher einzugehen, da seine Ueberlegungen und Schlussfolgerung durch die vorausgehende Erläuterung widerlegt sind.

Einzelheiten bei den Messungen.

Unser Artikel wäre nicht vollständig, wenn wir nicht auf einige Einzelheiten für die Messung und die Umrechnung eingehen würden.

⁷⁾ Het Bepalen der Koperverliezen bij Transformatoren voor Gelijkrichter-bedrijf door Ir. Th. Rosskopf, in der Holland. Zeitschrift Electrotechniek.

Die erste dieser Einzelheiten betrifft die Art des Kurzschliessens der Sekundärwicklungen. Fig. 6 zeigt einige Arten der Kurzschlussverbindungen, die wir als zweckmässig betrachten.

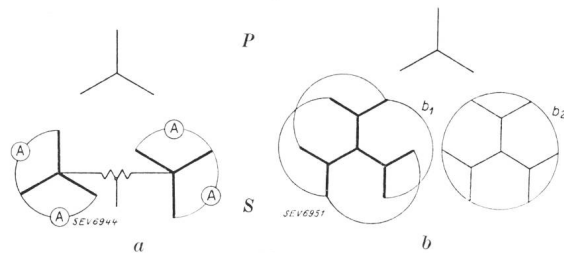


Fig. 6. Verschiedene richtige Arten des Kurzschliessens.

Von den Figuren sei die Schaltung Fig 6b/b₁ herausgegriffen, um an einem Beispiel zu zeigen, dass verschiedene Arten des Kurzschliessens verschiedene Sekundärströme ergeben können:

Wir schlossen nach Fig. 7 kurz und massen je in den drei Wicklungen Ströme von gleicher Grösse, d. h. bei dieser Kurzschlussverbindung stellten sich Ströme ein, wie bei drei einzelnen Dreiphasensysteme-

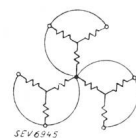


Fig. 7. Falsche Art des Kurzschliessens für Gabelschaltung.

men, also 1 : 1 : 1; schalteten wir aber die Kurzschlussverbindung nach Fig. 6b/b₁, so verteilten sich die Ströme wie 1 : 1 : 1,23. Dieses Verhältnis nähert sich schon erheblich besser dem Verhältnis der Ströme im Betrieb, das etwa 1 : 1 : $\sqrt{2}$ ist.

Es mag hier am Platze sein, auf die beiden Briefe der Herren Sbaraccani und Cerretelli, die seit Ausarbeitung unseres Artikels in der *Elettrotecnica*⁸⁾ erschienen sind, kurz einzutreten:

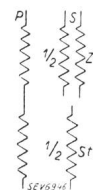


Fig. 8. Bildliche Darstellung der richtigen Lage der Sekundärwicklungen zur Primärwicklung für Gabelschaltung. Zi Zinken. St Stiel.

Auf die Einwendungen des Herrn Scaraccani gegen unsern Vorschlag ist die Antwort in unserer Arbeit schon enthalten; wir verweisen auf das über die Messverfahren 2 und 3 und das am Schlusse über das Messen der Ströme bei Gabelschaltung Gebrachte.

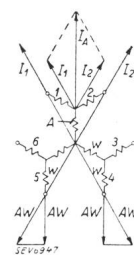


Fig. 9. Schematische Darstellung der Vektoren der Ströme und Amp.-Windungen für Gabelschaltung.

Betreffend die Ausführungen des Herrn Cerretelli ist folgendes zu sagen: Bei Gabelschaltung enthält im Gleichrichterbetrieb der innere Schenkel (Stiel) die Summe der Ströme

⁸⁾ *Elettrotecnica*, Heft v. 10. Dez. 1937, Brief v. Ing. Sbaraccani, und Heft v. 10. März 1938, Brief v. Ing. Cerretelli.

der beiden äusseren Schenkel (Zinken) (Fig. 9). Bei dieser Betriebsart liegen die Grundharmonischen der Zinken um $+30^\circ$ bzw. -30° gegen die Grundharmonische des entsprechenden Stieles verschoben, also: $I_1 \cos 30^\circ + I_2 \cos 30^\circ = I_A$. Ihre Grösse sei je 1. Dann hat die Grundharmonische des Stieles die Grösse $\sqrt{3}$ (Fig. 9). Andererseits muss aber beim Gleichrichterbetrieb die Amperewindungszahl der Grundharmonischen des Stieles A zusammen mit der AWzahl der Grundharmonischen der beiden Zinken 4 und 5 in Richtung des Stieles A gleich der AWzahl der Primärseite sein, d. h. in jedem Zinken 4 und 5 fliesst eine Grundharmonische in Richtung des Stieles von halber Grösse derjenigen im Stiele A selbst, weil ja die Windungszahlen W in den Zinken und den Stielen einander gleich sind: $I_4 W \cos 30^\circ + I_5 W \cos 30^\circ = I_A W$. Der mit dem Gleichrichterbetrieb vertraute Transformator-Spezialist wird deshalb dem Stiele eine AWzahl

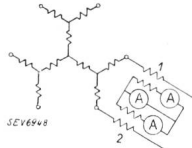


Fig. 10.
Strommessung bei Gabelschaltung.

- 1 Stromwandler 1.
- 2 Stromwandler 2.

der Primärwicklung von gleicher Grösse zuordnen, wie den beiden Zinken zusammen, also schematisch etwa nach Fig. 8. Bei einem so gebauten Transformator werden sich im Kurzschluss, vorausgesetzt, dass die Kurzschlussbügel richtig angeordnet sind, der Streuung wegen, die Ströme, die bei sinusförmiger Erregung nur die Grundharmonische führen, wieder so einzustellen suchen, dass im Stiele A ein doppelt so grosser Strom fliesst, als Strom-Komponenten in gleicher Richtung in jedem Zinken 4 und 5 fließen. Diese Erkenntnis schliesst aber aus, dass die Ströme in den Zinken und den zugehörigen Stielen unter 120° stehen, denn dann müssten die Ströme in den Zinken 4 und 5 und im Stiele A je gleicher Grösse und gleicher Richtung sein.

Um jenes Resultat beim Versuch zu erhalten, ist es aber wichtig, die Kurzschlussleitungen entweder nach Fig. 6b1 oder nach Fig. 6b2 anzuordnen, aber unter keinen Umständen etwa nach Fig. 7, denn dann würden die Ströme sich wirklich als Drehströme, also als Ströme gleicher Grösse, unter 120° liegend, in allen Zweigen einstellen, allerdings bei erhöhter Kurzschlussspannung.

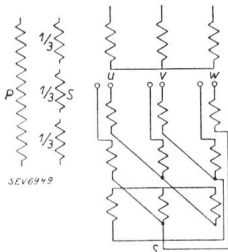


Fig. 11.
Bildliche Darstellung der falschen Lage der Sekundärwicklungen (S) zur Primärwicklung (P) für Gabelschaltung.

Um den Beweis zu leisten, dass die Ströme unter 120° stehen, genügt es *auch nicht*, einen beliebigen Transformator, dessen Sekundärwicklung sich in 3 Teile lässt (Fig. 11), in Gabel zu schalten und dann den Nachweis zu leisten, dass die Kurzschlussströme sekundär unter 120° stehen. Bei einem solchen Transformator werden die drei Gabeln sich tatsächlich als 3 Drehstromsysteme verhalten.

Wir haben übrigens bereits Messungen ausgeführt, auf die wir hier nochmals zurückkommen, indem nachzutragen ist, dass jener Transformator für den Nachweis ungünstig war, indem man die Wicklung der Zinken, statt nur gegenüber der Hälfte der Primär-AW, gegenüber ca. 60% der Primär-AW aus Konstruktionsgründen anordnen musste, so dass nun die Ströme sich nicht genau wie $1 : \sqrt{3}$, sondern nur wie $1 : 1,23$ verhalten, aber also keineswegs wie $1 : 1$.

Trotzdem es eigentlich überholt ist, über diese Art der Verlustbestimmung noch weitere Worte zu verlieren, sei doch noch eine Bemerkung dazu gestattet: Selbst wenn wir annehmen wollten, dass die Ströme wirklich unter 120° stehen und alle gleicher Grösse seien, so wird der Fehler in den Cu-Verlusten mit dem also falschen Zuschlagsgliede doch recht unerheblich. Eine Rechnung, die leicht auszuführen ist, ergibt, unter der Voraussetzung, dass die Primär-Cu-Verluste

im Verhältnis der Aequivalenzleistungen von Primär- zu Sekundärwicklung, also ca. 2 : 3 seien, ferner dass die Widerstände der Zinken zu den Widerständen der Stiele im umgekehrten Verhältnis der Ströme, also $\sqrt{2} : 1$ stehen, dass, wenn die Kurzschlussströme unter 120° liegen, der Relativwert der Gesamt-Cu-Verluste 3,9 beträgt, dass, wenn dagegen die Ströme 6phasig sind, dieser Wert 4,02 ist. Unter Hinzurechnung der Fe-Verluste mit $\frac{1}{3}$ der Cu-Verluste werden diese Relativzahlen 5,24 : 5,36, sind also gegeneinander mit einem Fehler von nur ca. 2% behaftet. Auf die ganze Gleichrichteranlage umgerechnet ist der Fehler in den Verlusten weit weniger als 1%. Da es sich sowieso nur um behelfsmässige Messungen handelt, die konventionell festzulegen sind und von den wirklichen Werten immer etwas abweichen können (denke man nur an den willkürlichen und auch unserer Ansicht nach ganz ungerechtfertigten Zuschlag nach den italienischen Normen für Verluste der Oberharmonischen für die grösseren Transformatoren im Werte von 20%), so ist ein derartiger Fehler ohne Bedenken in den Kauf zu nehmen.

Umrechnung auf die Betriebstemperatur.

Ein weiterer Punkt, der der Betrachtung wert ist, betrifft die Umrechnung der Verluste von der Temperatur der Messung auf die Temperatur des Betriebes. Da meinen wir, dass man für Mutatoren keinen Unterschied machen soll gegenüber gewöhnlichen Transformatoren; die ohmschen Verluste sind also der Temperatur entsprechend höher und die zusätzlichen in gleicher Weise niedriger einzusetzen. Damit folgt man den bewährten Regeln für normale Transformatoren.

Umrechnung auf Betriebsströme.

Im Anschluss hieran stellt sich noch die Frage, falls man nach Verfahren 4 vorgeht: Sind die gemessenen Gesamtverluste, also die ohmschen und die zusätzlichen Kupferverluste, oder nur der ohmsche Anteil im Verhältnis der Quadrate der Ströme höher zu rechnen?

Zieht man in Betracht, dass die Zusatzverluste, die die Messung ergibt, diejenigen der Grundharmonischen sind, die also bei der Messung schon grösser ausfallen als sie bei Betrieb wirklich auftreten, dass *bei Betrieb* ein grosser Teil des höhern Sekundärstromes auf das Gleichstromglied, das keine Zusatzverluste verursacht, zurückzuführen ist, und dass den Zusatzverlusten der Oberharmonischen durch Aufdrücken eines grösseren Primärstromes (Effektivwert der Rechteckform) als bei Betrieb wirklich vorhanden ist, Rechnung getragen ist, so ist es gerechtfertigt, die bei der Messung festgestellten Zusatzverluste *nicht* auch noch mit dem Verhältnis der Quadrate der entsprechenden Sekundärströme zu erhöhen.

Wenn man schliesslich beim Verfahren 4 durch eine Formel den Zusammenhang zwischen der Messung und den konventionell festzustellenden Verlusten zum Ausdruck bringen will, so lautet diese Formel:

$$P = \{P' - \Sigma I^2 \cdot R_{t1}\} \frac{1}{\{1 + \alpha(t_2 - t_1)\}} + \Sigma I^2 \cdot R_{t1} \{1 + \alpha(t_2 - t_1)\}$$

Dabei bezeichnen:

- P die konventionell festzustellenden Verluste,
- P' die durch Messung bestimmten Verluste,

R_{t_1} die bei der Messtemperatur t_1 gemessenen Widerstände (primär und sekundär),
 $R_{t_2} \{1 + \alpha (t_2 - t_1)\}$ die Widerstände bei Bezugstemperatur t_2 (primär und sekundär) (Transformator betriebswarm oder 75° C),
 I' die Ströme bei der Messung (primär und sekundär),
 I die Betriebsströme (Nennströme) gemäss Schild (primär und sekundär).

Auch ist Voraussetzung, dass bei der Messung primärseitig der Nennstrom eingestellt war. (Andernfalls müssten zuerst noch die bei der Messung tatsächlich eingestellten Ströme und der hierbei gefundene Verlustwert in bekannter Weise auf den Primärnennstrom umgerechnet werden.)

Hier anschliessend sei nochmals auf Tabelle I verwiesen. Sie gibt in Prozentwerten die Ergebnisse der Kupferverluste für 4 verschiedene Transformatoren, nach den Verfahren 2, 3 und 4 gemessen und auf den Schlusswert umgerechnet, im Vergleich zu den möglichst genau für Gleichrichterbetrieb für den betr. Transformator vorausgerechneten Kup-

ferverlusten. Für Verfahren 1 standen uns keine Messungen zur Verfügung.

Strommessung bei Zickzackschaltungen.

Zur Messung der Ströme der Wicklungszweige für die Kurzschlussmessung bei Gabelschaltung, deren Kenntnis zur Verlustumrechnung erforderlich ist, mag noch folgender Hinweis von Wert sein: Es ist ohne weiteres klar, wie die Ströme I_1 und I_2 zu messen sind (Bild 9).

Wie aber erhält man den Strom I_A , wenn die Sternpunktverbindung innerhalb des Transformatorkastens fest verbunden ist, so dass das den Strom I_A führende Wicklungsende nicht getrennt zugänglich ist? Man misst in diesem Falle mit zwei gleichen Stromwandlern die Ströme I_1 und I_2 , schaltet sie aber gleichzeitig sekundär parallel und erhält dann in einer weiteren Verbindung, einer Serieverbindung, den vektoriellen Summenstrom von I_1 und I_2 , also I_A (Fig. 10).

Der Einfluss der Verdunkelungsübungen vom November 1937 auf Betrieb und Wirtschaftlichkeit der schweizerischen Elektrizitätswerke.

Vom Sekretariat des VSE (Ch. Morel).

621.311.153 : 623.66

Nach den ersten, örtlich eng begrenzten Verdunkelungsübungen vom Sommer 1937 fanden im Herbst ausgedehntere Übungen statt, die sich gleichzeitig über ganze Landesteile erstreckten. So wurde in drei Malen sukzessive die ganze Schweiz verdunkelt, und zwar die Ostschweiz und Graubünden am 3./4. November, die Westschweiz am 4./5. November und der übrige Teil des Landes am 24./25. November.

Die Verdunkelung dauerte die ganze Nacht, d. h. vom Einbruch der Abenddämmerung bis zum Tagesanbruch durfte kein verräterisches Licht nach aus-

der. Mehreren Anregungen aus Mitgliederkreisen folgend, beschloss der VSE deshalb, eine Umfrage zu veranstalten, deren Ergebnis in kurzen Zügen im folgenden mitgeteilt wird.

Es wurde zunächst versucht, durch Vergleich mit dem Vor- und Nachtag, bzw. mit dem gleichen Tage der Vorwoche den Energieausfall während der Verdunkelung festzustellen. Aus den Antworten der Werke lässt sich ableiten, dass während der 24stündigen Periode, von 12 Uhr mittags bis zum nächsten Tag 12 Uhr mittags, rund 2 Millionen kWh weniger

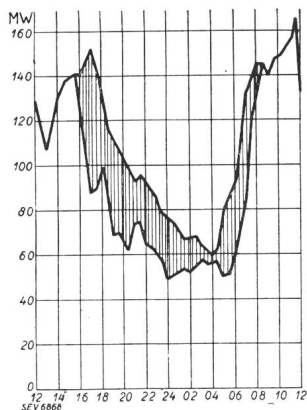


Fig. 1.

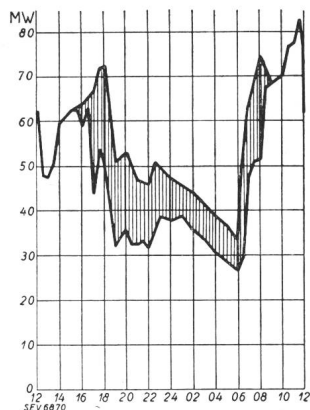


Fig. 2.

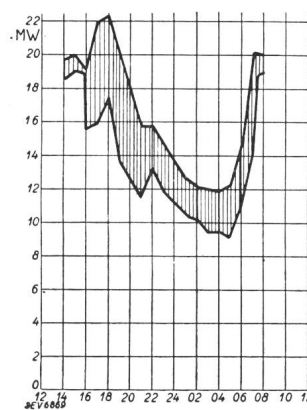


Fig. 3.

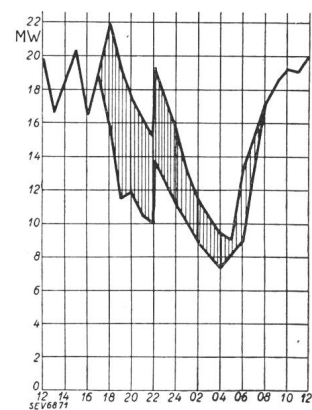


Fig. 4.

sen dringen. Da wir in der Schweiz sozusagen ausschliesslich elektrische Beleuchtung haben und ausserdem einen sehr weitgehenden Elektrizitätsverbrauch für andere Zwecke aufweisen, war es naheliegend, zu untersuchen, wie sich diese Verdunkelungsübungen auf die Belastung der Elektrizitätswerke auswirkten. Ein starker Ausfall war gewiss zu erwarten, aber die Schätzungen gingen ziemlich ausein-

verkauft wurden als normal ohne Verdunkelung verkauft worden wären. Dieser Minderverkauf kann jedoch nicht dem Produktionsausfall gleichgesetzt werden, da in dieser Zahl auch Wiederverkäufer enthalten sind. Der Produktionsausfall kann auf rund 1,8 Millionen kWh geschätzt werden, das sind 15% der normalen, im Inland verbleibenden Produktion von rund 12 Millionen kWh an einem Wo-