

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 66 (1975)

Heft: 4

Artikel: Neue Tendenzen im Transformatorenbau

Autor: Knapp, J. / Tripod, J.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915257>

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: 16.03.2025

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



Neue Tendenzen im Transformatorenbau

Von J. Knapp und J. Tripod

Im folgenden Aufsatz werden die Fortschritte im Transformatorenbau der vergangenen Jahre behandelt. Es gilt zu zeigen, wie sich ein technisch einfaches Gebilde, wie es der Transformator darstellt, durch den Einsatz weiterentwickelter oder neuer Materialien, durch konstruktive Massnahmen und auch durch Forderungen der Kunden gewandelt hat. Mit der Einführung der hochlegierten Siliziumbleche amerikanischer Provenienz (Armco und USS) in der Mitte der dreissiger Jahre glaubte man an einem Punkt angelangt zu sein, welcher nur noch unbedeutende, mehr fertigungstechnische Fortschritte erwarten liesse. Das Gewicht pro kVA oder auch der Preis pro «kg Transformator» galten als ungefähr feststehende Werte. Rückblickend kann man nun sagen, dass lediglich die geometrische Form des Aktivteiles und das äussere Aussehen noch den Konstruktionen von früher entsprechen. Alle übrigen Komponenten, seien es die zur Verwendung gelangenden Materialien, die Fertigungstechnik oder die Trocknungs- und Imprägnierverfahren, haben sich zum Teil grundlegend geändert. Entstanden ist die heutige moderne Transformatorkonstruktion, welche sich durch niedriges Gewicht pro kVA Leistung, durch kleine Verlustleistung und hohe Betriebssicherheit auszeichnet.

1. Der Wirkungsgrad

Während bei rotierenden elektrischen Maschinen der Wirkungsgrad schon immer eine beachtete Grösse darstellte, wurden die Transformatoren, besonders die kleineren Verteiltransformatoren bis zu einigen 100 kVA diesbezüglich eher vernachlässigt. Der Einstandspreis, günstige Abmessungen, die Robustheit der Konstruktion, die Rostschutzbehandlung usw. wurden gegenüber der Verlustbewertung stärker gewichtet. Mit der Erfindung der kornorientierten Elektrobleche hat sich diese Denkart geändert. Die durch die Verwendung solcher Bleche mögliche massive Reduktion der Eisenverluste war für jedermann augenfällig, und man wurde sich der Kosten bewusst, welche durch die Verlustleistung – die als Wärme nutzlos an die Umgebung abgeführt wird – verursacht werden.

Da der Wirkungsgrad sowohl von den Eisen- als auch von den Kupferverlusten abhängig ist, wendete man auch den letzteren grössere Aufmerksamkeit zu. Durch verschiedene, später beschriebene Massnahmen erreichte man eine wesentliche Senkung dieser Verlustanteile (Fig. 1).

621.314.21

Dans cet article, on décrit les progrès réalisés ces dernières années dans la construction de transformateurs et montre comment une structure techniquement simple, comme celle d'un transformateur, a été modifiée par l'emploi de matériaux améliorés ou nouveaux, par des dispositions de construction et également par des exigences des clients. Avec l'introduction des tôles à forte teneur en silicium, de provenance américaine (Armco et USS), vers 1935, on pensait être parvenu à un point qui ne permettait plus que d'insignifiants progrès, surtout de fabrication. Le poids par kVA ou par kg de transformateur était considéré comme une valeur à peu près immuable. Or, on constate maintenant que seule la forme géométrique de la partie active et l'aspect extérieur correspondent encore aux anciennes constructions. Tous les autres composants, matières employées, technique de fabrication ou procédés de séchage et d'imprégnation, ont subi des modifications parfois radicales. Le transformateur moderne se distingue par son faible poids par kVA de puissance, sa faible puissance dissipée et sa grande fiabilité.

Mit Hilfe von elektronischen Rechnern ist es möglich, unter Berücksichtigung der heute üblichen Kapitalisierung der Verluste rasch eine Optimierung im Verhältnis: Eisenverluste, Kupferverluste und Preis, zu erreichen.

2. Das aktive Eisen. Mittel zur Tiefhaltung der Eisenverluste

Kornorientierte verlustarme Elektrobleche, deren Verlustziffer bei $B = 1,5$ T und 50 Hz 0,89 W/kg beträgt, entsprechen dem letzten Stand der Technik. Durch geschickte Gestaltung des Magnetgestells hat es der Konstrukteur in der Hand, bezüglich Verminderung der Eisenverluste optimale Resultate zu erzielen. Voraussetzung hierfür ist, dass der magnetische Fluss in Walzrichtung des Bleches verläuft und ferner dass nirgends Quermagnetisierung auftritt.

Mit dem aus einem Band gewickelten Eisenkern erreicht man mit diesen Blechen die niedrigsten Eisenverluste (Fig. 2 und 3).

Diese Lösung ist fabrikatorisch recht aufwendig, da entweder die Wicklungen auf den fertigen Kern oder aber die

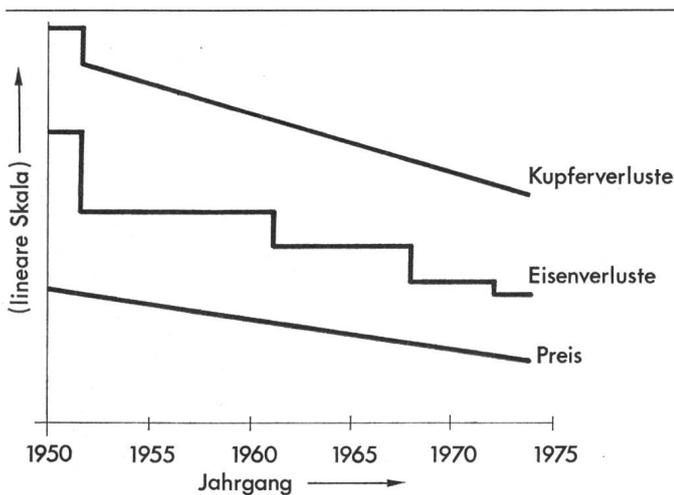


Fig. 1 Verlauf der Preise und der Verluste seit 1950
Die Verkaufspreise wurden gemäss den entsprechenden Landesindices der Konsumentenpreise korrigiert

Kernbänder in die Wicklungen eingezogen werden müssen. Ein Nachglühen des aktiven Eisens ist im zweiten Fall nicht möglich.

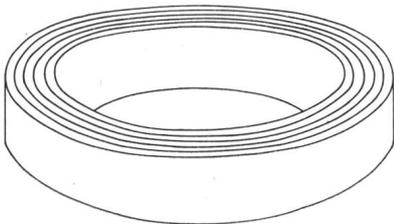


Fig. 2 Ring-Bandkern

Wesentlich einfacher in der Herstellung sind Transformatoren, die aus mit einem Band gewickeltem Magnetgestell bestehen, welches jedoch 2teilig ausgeführt ist. Diese sog. Schnittbandkerne werden in der gewünschten Form gewickelt, gegläht und anschliessend mittels eines Giessharzes verfestigt. Nach der Auftrennung werden die Schnittstellen geschliffen und geläppt. Diese Lösung weist ebenfalls hervorragende magnetische Eigenschaften auf. Ihre Anwendung kommt jedoch nur bis zu einigen 10 kVA Leistung in Frage, da bei grösserem Eisenvolumen die Parallelität der Schnittflächen nicht gewährleistet ist (Fig. 4).

Um diesen Nachteil zu vermeiden, ist eine Ausführung mit Überlappung der einzelnen Schnittstellen bekannt. Die Bleche werden paketweise in die Spulen eingeschoben. Es gibt Ausführungen mit zweiteiligen Kernen; meistens ist jedoch nur ein Schenkel geteilt. Diese Methode erlaubt die Herstellung auch von Transformatoren höherer Leistung. Ihre Anwendung ist nur durch die Investitionskosten der Formwerkzeuge beschränkt (Fig. 5).

Weitaus am häufigsten und in Europa fast ausschliesslich findet die klassische aus einzelnen Blechstreifen geschachtelte Konstruktion Verwendung. Hierbei sind alle Möglichkeiten einer rationellen Herstellung gegeben. Die vergleichsweise mit dem bandgewickelten Eisenkern leicht höheren Eisenverluste können durch die Wahl einer etwas niedrigeren Induktion wettgemacht werden.

Voraussetzung für niedrigste Eisenverluste ist auch hier der Verlauf des magnetischen Flusses in Walzrichtung.

Durch konsequente Anwendung des Schrägschnittes möglichst im Winkel von 45° an allen Übergangsstellen von Säulen und Jochen und durch Vermeidung von Unterschieden in der Querschnittabstufung zwischen denselben können Zusatzverluste weitgehend vermieden werden (Fig. 6).

Die Kerne werden mittels Glasfaserbandagen, welche maschinell aufgebracht werden, gepresst. Man erhält auf diese Art eine gleichmässige, hohe Pressung über die ganze Kernlänge. Pressbolzen durch das aktive Eisen erzeugen Zusatzverluste, allein schon durch die Querschnittverkleinerung. Ein weiterer Vorteil der Bandagepressung ist die dadurch erreichte Geräuschverminderung, da keine ungepressten Kernpartien vorhanden sind (Fig. 7).

3. Massnahmen zur Senkung der Cu-Verluste

Für die Niedrighaltung der Lastverluste stehen u. a. folgende Massnahmen zur Verfügung:

- a) Wahl grösserer Leiterquerschnitte;
- b) Verdrillte Flachleiter.

Bei höheren Strömen können die durch den Streufluss verursachten Zusatzverluste durch die Anwendung von verdrillten Leitern auf wenige Prozente reduziert werden. Das Leiterbündel besteht aus einzelnen Flachleitern mit einer Dicke quer zum Streufluss von max. 3 mm. Die Lage der Einzelleiter innerhalb des Bündels ist periodisch transponiert. Dadurch wird erreicht, dass jeder Einzelleiter den gleichen Flussanteil umschliesst und somit das Entstehen von Ausgleichströmen verhindert wird.

Bandwicklungen erlauben oft eine bessere Ausnutzung des Wickelraumes und daher eine Erhöhung des Leiterquerschnittes.

4. Nicht direkt preislich bewertbare Vorteile als Folge eines hohen Wirkungsgrades

Ausser den niedrigen Betriebskosten, die sich durch eine Kapitalisation der Verluste errechnen lassen, ergeben sich noch folgende Vorteile des Transformators mit hohem Wirkungsgrad:

Die Längeänderung der Kernbleche durch die Magnetostraktion variiert mit der Potenz 2 bis 3 der Induktion im Eisen. Eine niedrige Induktion bedeutet deshalb einen tiefen Geräuschpegel. Da das Geräusch bereits an der Quelle redu-

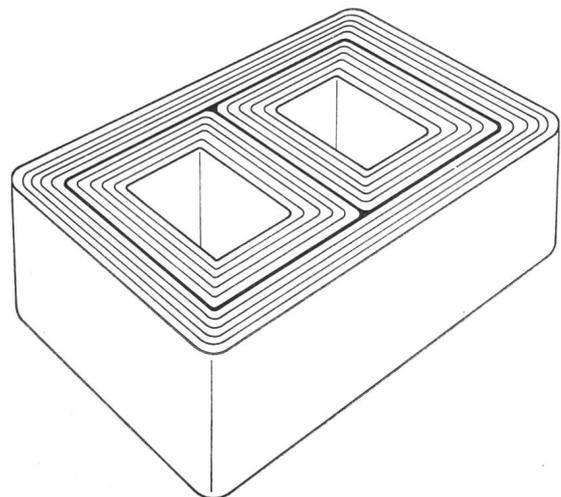


Fig. 3 3-Schenkel-Bandkern

ziert wird, sind tiefe Pegel ohne zusätzliche Dämpfungsvorrichtungen zu realisieren.

Wicklungen mit vergrößerten Leiterquerschnitten sind robuster. Kurzschlüsse oder hohe Belastungsimpulse beanspruchen das Material nicht bis zur Grenze seiner Widerstandsfähigkeit. Durch die niedrige Stromdichte bei Nennlast ist der Transformator in der Lage, hohe Belastungsspitzen zu absorbieren, ohne dass die zulässigen Wicklungstemperaturen überschritten werden.

Fig. 4
Schnittbandkern

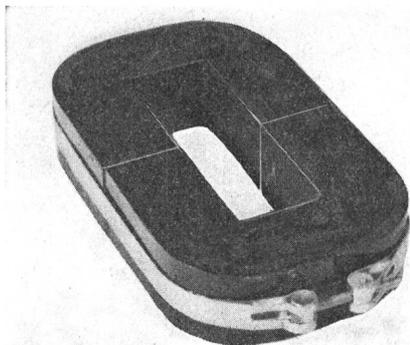
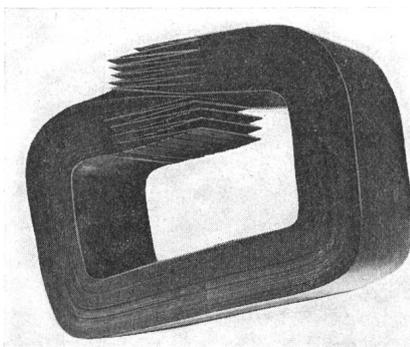


Fig. 5
Bandkern
mit Überlappung
der Schnittstellen



5. Isolation, Erwärmung, elektrische Festigkeit

Mit der Einführung von hochwertigeren Isoliermaterialien für die Lagenisolationen und durch die Verwendung von lackisolierten Drähten auch bei Öltransformatoren ist der volumenmässige Isolationsaufwand gegenüber älteren Ausführungen geringer geworden. Bei gleicher elektrischer Festigkeit sind die Wicklungen deshalb jetzt wesentlich kleiner, die Wärmeleitfähigkeit ist besser, und der sog. «heisseste Punkt», welcher für die «Lebenserwartung» des Transformators mitentscheidend ist, weist eine geringere Differenz gegenüber der mittleren Wicklungstemperatur auf.

Die elektrische Festigkeit selbst ist infolge der Erhöhung der Seriekapazität, die aus der Verminderung des Isolationsaufwandes resultiert, begünstigt. Es ergibt sich dadurch im Vergleich mit früheren Konstruktionen ein verbessertes Verhalten der Transformatoren gegenüber schnellen Ausgleichsvorgängen.

6. Kühlung

Für die Lebensdauer des Transformators ist die Abfuhr der im Aktivteil entstehenden Verlustwärme von grösster Wichtigkeit. Nach *Monsinger* halbiert nämlich eine Erhöhung der Temperatur um etwa 6 bis 8 °C die Lebenserwartung des Transformators. Zur Ableitung der Verlustwärme steht Luft oder Wasser zur Verfügung, wobei die Wärme-

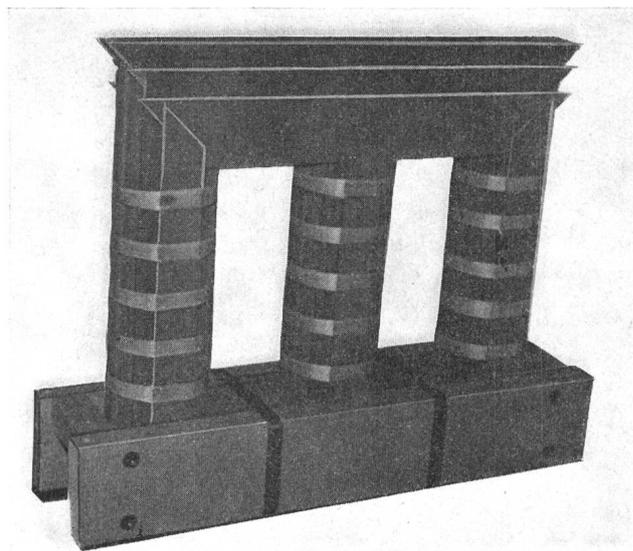


Fig. 6 Kern zu Drehstromtransformator

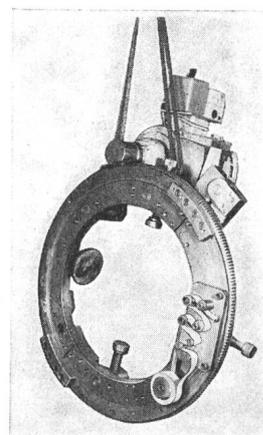


Fig. 7
Kernbandagiermaschine

übertragung vom aktiven Teil an das Kühlmittel direkt oder durch Vermittlung eines dazwischenliegenden Mediums erfolgt. Beispiele für direkte Wärmeübertragung sind Trockentransformatoren (Luft) oder gewisse Transformatoren niedriger Spannungen und hoher Ströme, deren Wicklungsteile von Wasser durchströmt werden. Häufiger angewendet wird die indirekte Wärmeübertragung, für die sich als Flüssigkeiten Mineralöle und die unbrennbaren Askarele bewährt haben. Dazu kommt in neuerer Zeit verschiedentlich auch das Gas Schwefelhexafluorid SF₆ (Fig. 8).

Sowohl bei äusserem als auch bei innerem Kühlmittel unterscheidet man noch zwischen natürlicher und erzwungener Strömung. Aus dieser Vielzahl von Möglichkeiten sind die in Tabelle I aufgeführten Kühlungsarten gebräuchlich.

Die zu wählende Kühlungsart hängt von der Grösse des Transformators und den Bedingungen am Aufstellungsort (zur Verfügung stehendes Kühlmittel, Raum- und Transportverhältnisse und anderen) ab. Bei grösser werdender Leistung nimmt das Volumen des aktiven Materials und damit die anfallende Verlustwärme rascher zu als die Oberfläche. Es ist daher Aufgabe des Konstrukteurs, diese Oberfläche so zu vergrössern, dass die durch die Vorschriften festgelegten Temperaturgrenzen nicht überschritten werden.

Für flüssigkeitsgekühlte Transformatoren sind die nachstehend aufgeführten Bauarten gebräuchlich. Glatte Kessel genügen für Leistungen bis etwa 30 kVA. Bis zu einigen

Kühlungsart	Innere Kühlung		Äussere Kühlung	
	Medium	Kühlmittelbewegung	Medium	Kühlmittelbewegung
AN	—	—	Luft	natürlich
ONAN	Öl ¹⁾	natürlich	Luft	natürlich
ONAF	Öl ¹⁾	natürlich	Luft	erzwungen
OFAF	Öl ¹⁾	erzwungen	Luft	erzwungen
OFWF	Öl ¹⁾	erzwungen	Wasser	erzwungen

¹⁾ Bei Transformatoren mit Askarel-Füllung wird bei der Kühlungsart der Buchstabe O durch L, bei Gasfüllung durch G ersetzt.

O = Mineralöl F = erzwungene Bewegung
 N = natürliche Bewegung L = Askarel
 W = Wasser G = Gas
 A = Luft

1000 kVA wird der Kessel mit Kühlrippen versehen (Fig. 9). Diese Ausführung hat sich für die grosse Zahl von Netzverteiltransformatoren heute allgemein durchgesetzt. Eine weitere Möglichkeit, die Oberfläche zu vergrössern, bietet das Anbringen von Rohren. Dies kann in Form von Henkelrohren (Fig. 10) oder Rohrhafen (Fig. 11) geschehen.

Henkelrohre werden bis maximal 4 Rohrreihen angeordnet. Weitere Rohrreihen sind praktisch wirkungslos, weil das Temperaturgefälle zwischen dem oberen und unteren Ansatzpunkt der innenliegenden Rohre so klein wird, dass keine nennenswerte Ölströmung entsteht. Ausserdem verhindern die äusseren Rohre weitgehend den Zutritt der vorbeistreichenden Luft zu den inneren Rohren. Diese Nachteile werden bei den Rohrhafen und Radiatoren vermieden. Letztere können aus Rohren oder aus entsprechend geformten Blechen aufgebaut sein (Fig. 12 und 13). Radiatoren aus geformten Blechen werden, da sie billiger als Rohrradiatoren sind und weniger Öl enthalten, fast ausschliesslich verwendet. Ihr Einsatzbereich bei Selbstkühlung reicht bis über 20 MVA (Fig. 12 und 13).

Bei den erwähnten Bauformen kann eine Steigerung der Wärmeabgabe durch Anbringen von Lüftern (Kühlart ONAF ¹⁾) auf etwa das Doppelte erreicht werden. Dies bietet ausserdem die Möglichkeit, mit Hilfe einer thermostatisch geregelten Steuerung die Anzahl der eingeschalteten Lüfter den jeweiligen Belastungsverhältnissen und der Umgebungstemperatur anzupassen. Sehr grosse Einheiten erhalten oft separat aufgestellte, aus Radiatoren aufgebaute Kühlerbatterien, welche erst am Aufstellungsort mit dem Transformator verbunden werden. Ölumwälzpumpen bewirken die Ölzirkulation, und Lüfter forcieren die Luftzufuhr (Kühlart OFAF ¹⁾). Eine Variante dazu stellen die mit Rippenrohren ausgerüsteten Wärmeaustauscher dar. Sie sind mit den Lüftern zu Einheiten zusammengebaut und benötigen stets die zwangsweise Ölumwälzung durch Pumpen. Die Kühlanlage

¹⁾ Siehe auch Tabelle I.

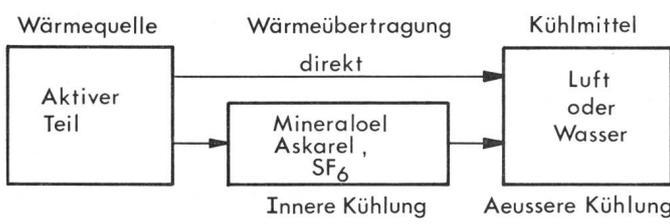


Fig. 8 Wärmezuffluss in Transformatoren

Fig. 9 Netztransformator mit Rippenkessel

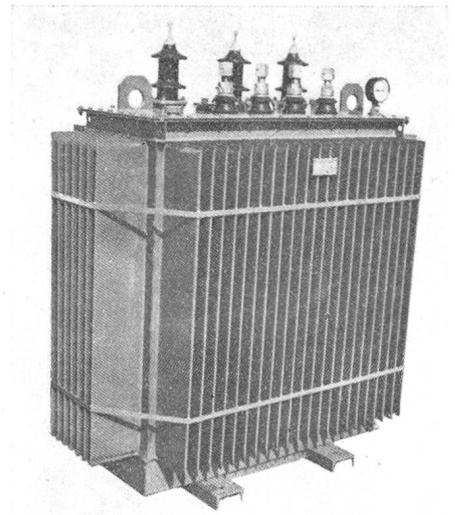


Fig. 10 Kessel mit Henkelrohren

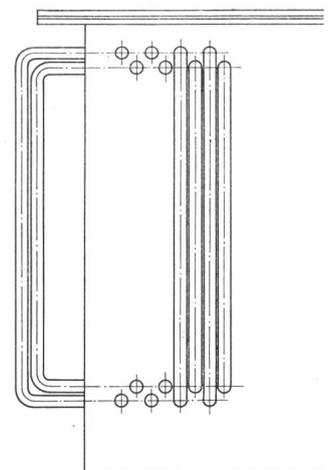
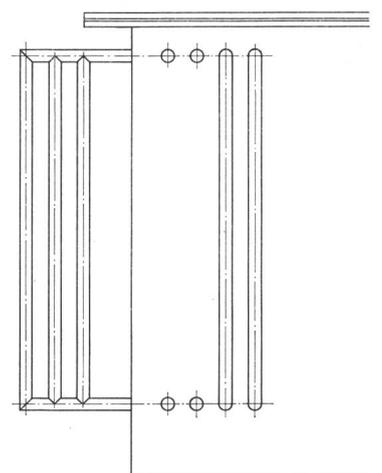


Fig. 11 Kessel mit Rohrhafen



besteht immer aus mehreren, meist 4 solcher Einheiten, welche für 133 % der Nennverluste ausgelegt sind. Für den Nennbetrieb werden nur drei Kühler benötigt, der vierte steht als betriebsbereite Reserve zur Verfügung. Von allen luftgekühlten Systemen beansprucht diese Bauart relativ am wenigsten Platz. Direkter Anbau am Transformator oder getrennte Aufstellung ist möglich. Steht am Aufstellungsort genügend Wasser ausreichender Reinheit zur Verfügung, so kann die Anwendung von Öl-Wasser-Kühlern (Kühlart

OFWF¹⁾ in Betracht gezogen werden. Der Kühler, ein vom Wasser durchflossenes Rohrbündel, wird aussen vom abzukühlenden Öl umströmt. Der Ölumlaufl erfolgt stets zwangsläufig. Eine Aufteilung der Kühlleistung in mehrere getrennte Systeme und das Vorsehen einer Reserveeinheit gestatten, die Betriebssicherheit entsprechend zu steigern. Transformatoren mit Wasserkühlung haben vergleichsweise das kleinste Bauvolumen und können für alle Leistungsgrößen erstellt werden. Sie werden vor allem bei hydraulischen Kraftwerken in Kavernenbauweise eingesetzt.

Viele luftgekühlte Transformatoren, besonders Verteiltransformatoren, werden in Gebäuden installiert. Die Transformatorzelle ist genügend zu belüften, um die anfallende Verlustwärme ins Freie abzuführen, damit den gültigen Vorschriften entsprechend die maximal zulässige Temperatur der Umgebungsluft 40 °C nicht überschritten wird. Je kW Verlustwärme ist eine Frischluftmenge von ca. 3,5 bis 5 m³ pro Stunde erforderlich. Die Luftzufuhr soll möglichst unterhalb des Transformators, der Austritt am oberen Teil des Gebäudes erfolgen. Genügend grosse Öffnungen sind bauseitig vorzusehen. Zu beachten ist ferner, dass der Abstand zwischen Transformator und Zellenwand mindestens 300 mm, zwischen benachbarten Transformatoren 500 mm beträgt.

7. Kühl- und Isoliermittel

Die meisten Transformatoren sind in mit Mineralöl gefüllte Kästen eingebaut, wobei das Öl eine zweifache Aufgabe zu erfüllen hat. Einmal wirkt es als ausgezeichnetes Isoliermittel, zum anderen – wie schon erwähnt – als Kühlmittel, das die Verlustwärme aus Kern und Wicklungen abführt. Für den gleichen Zweck dienen auch Luft, Stickstoff, SF₆, CO₂, Giessharze und die in der Folge näher beschriebenen Askarele. Diese umfassen Polychlorodiphenyle (PCB) und Mischungen aus solchen mit Trichlorobenzol [1]²⁾. Man findet sie unter verschiedenen Handelsnamen. Es handelt sich um gute und unbrennbare Dielektrika, die sowohl chemisch als auch thermisch sehr stabil sind. Sie oxydieren erst bei Temperaturen, die über 1100 °C liegen. Dank dieser Eigenschaften sind sie besonders gut als Isolierflüssigkeit für Transformatoren geeignet. Die Unbrennbarkeit erlaubt die Installation von flüssigkeitsgefüllten Transformatoren an Orten, wo die Folgen eines Brandes ein katastrophales Ausmass annehmen könnten (Warenhäuser, Theater). Andererseits bewirkt die chemische Stabilität, dass die Unterhaltsarbeiten am Transformator auf eine gelegentliche Kontrolle des Flüssigkeitsniveaus beschränkt werden können.

All diesen Vorteilen stehen aber doch beträchtliche Nachteile gegenüber. Durch ihre hohe chemische Stabilität sind die Askarele biologisch praktisch nicht abbaubar, sie sind sehr wenig im Wasser lösbar, hingegen gut in Ölen und Fetten. Diese Eigenschaften bewirken, dass Polychlorodiphenyle, die sich auch nur als Spuren im Wasser, vor allem in den Meeren befinden, rasch durch Lebewesen aufgenommen werden. Die Folgen dieser Vergiftungen sind heute noch nicht überschaubar. Sie werden im Laufe der Zeit bestimmt immer schwerwiegender werden, denn wenn diese Stoffe ein-

¹⁾ Siehe auch Tabelle I.

²⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

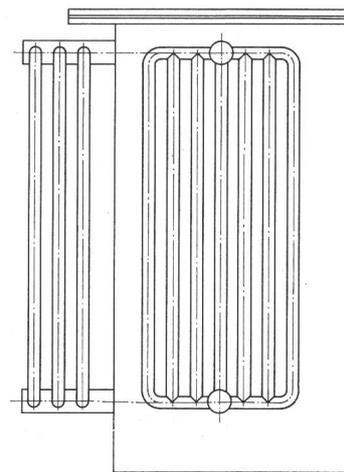


Fig. 12
Kessel mit Radiatoren
aus Rohren

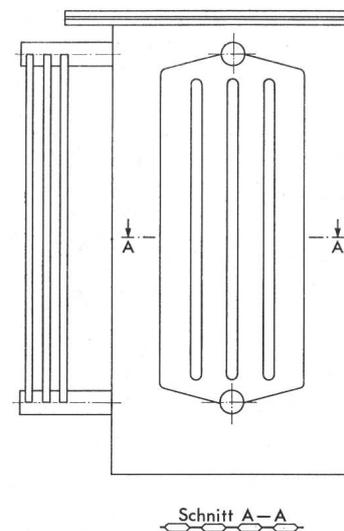


Fig. 13
Kessel mit Radiatoren
aus gepressten Blechen

mal in die tierische Nahrungskette aufgenommen sind, bleiben sie ohne Verlust voll wirksam, und alle neuen Dosen summieren sich dazu. Es wurde z. B. festgestellt, dass eine Kolonie von Pinguinen, in deren Fett man einen hohen Anteil an PCB nachweisen konnte, zugrunde ging, weil die Schalen ihrer Eier infolge von Störungen im Kalziumstoffwechsel zu wenig Festigkeit aufwiesen. Es ist daher sehr genau darauf zu achten, dass keine Askarele weggeworfen werden und so früher oder später in den Wasserkreislauf kommen. Diese imperative Vorschrift gilt vor allem für Askarele enthaltende defekte oder veraltete Apparate, aber auch für damit imprägnierte Lumpen und Filterpapiere, für alte Gebinde, verbrauchte Lösungs- und Reinigungsmittel usw.

Der Lichtbogen, der beim Defektgehen eines Transformators entstehen kann, zersetzt die PCB in trockene Salzsäure. Nach einem solchen Defekt darf deshalb die Transformatorstation nur mit Atemschutzgeräten betreten werden. Die Folgeschäden durch Einwirkung der Säure auf die übrigen Apparaturen der Station können beträchtlich werden.

Am Einbauort ist, auch wenn keine Brandgefahr besteht, eine Grube unter dem Transformator unerlässlich. Immerhin sind Unfälle auch während des Transportes oder anlässlich von Reparaturen in Betracht zu ziehen. Wer sich seiner Verantwortung für die Erhaltung einer gesunden Umwelt bewusst ist, sollte deshalb die Verwendung von Askarelen ver-

meiden. Trockentransformatoren mit Kunstharzisolierung, wie im folgenden beschrieben, erfüllen ebenfalls die gewünschten Bedingungen der Feuersicherheit und Langlebigkeit und haben sich schon seit vielen Jahren im Betrieb bewährt.

8. Leistungstransformatoren mit Giessharzisolierung

Moderne giessharzisierte Transformatoren gewinnen im Rahmen der Verwendung als Verteiltransformatoren ihrer Vorteile wegen eine steigende Bedeutung.

Sie sind gegenüber den normalen Trockentransformatoren mit imprägnierten Spulen nicht hygroskopisch, weisen eine sehr hohe Festigkeit gegenüber mechanischen Beanspruchungen (Kurzschluss) auf und können für die Verwendung in exponierten Anlagen stoßspannungsfest gebaut werden. Sie sind teilentladungsfrei und temperaturwechselfest. Die Giessharzisolierung ist durch einen Lichtbogen nicht entflammbar, d. h. selbstverlöschend, sowie gegen Einflüsse chemischer Natur und gegen Feuchtigkeit widerstandsfähig.

Giessharzisierte Transformatoren können im Gegensatz zu ölisierten direkt beim Verbraucher aufgestellt werden, wobei es wegen des Nichtvorhandenseins der Brandgefahr keine Rolle spielt, ob sie im Stockwerk, Keller oder unter dem Dach installiert werden. Ölauffanggruben und besondere Brandschutzmassnahmen sind nicht erforderlich. Infolge Fehlens des Expansionsgefäßes, des Deckels und der

Durchführungen ist deren Bauhöhe niedrig, und es können dadurch bauliche Einsparungen erzielt werden. Aber auch wegen der kurzen Niederspannungszuleitungen werden Kosten eingespart. Giessharzisierte Transformatoren sind geradezu prädestiniert für Aufstellung in Schulen, Warenhäusern, Theatern, Krankenhäusern, in Stollen usw.

Obwohl der Preis, verglichen mit dem ölisierten Transformator, etwa um 70 % höher ist, sollte doch jeweils eine Rechnung aufgestellt werden, welche alle diese Vorteile und nicht zuletzt auch die sehr hohe Lebensdauer und die Wartungsfreiheit berücksichtigt.

Zu bemerken ist auch, dass der Wirkungsgrad dieser Transformatoren infolge der kleineren Kupferverluste gegenüber den ölisierten höher ist.

Wenn die Lastverhältnisse am Verbraucherort so sind, dass nur während kurzer Zeit am Tag eine hohe Leistung benötigt wird und die übrige Zeit mit einer «Grundlast» gefahren wird, empfiehlt sich die Verwendung von giessharzisierten Transformatoren mit forcierter Kühlung. Der erzielbare Leistungsgewinn kann bis zu 40 % betragen. Infolge der grossen Zeitkonstanten und der hohen Isolierstoffklasse der giessharzisierten Transformatoren sind mit oder ohne forcierte Kühlung gegenüber ölisierten Transformatoren wesentlich höhere kurzzeitige Überlastungen möglich, was allgemein wenig bekannt ist.

Bei giessharzisierten Transformatoren tritt im Verlauf der Betriebsjahre keine Verschlechterung der Durchschlagfestigkeit und des dielektrischen Verlustfaktors auf, auch nicht bei ungünstigen Umgebungsbedingungen (Feuchtigkeit).

Fig. 14a zeigt einen Querschnitt durch die Wicklungen eines Transformators, dessen Hochspannungswicklung in Kunstharz eingegossen ist. Die Hochspannungsspulen sind als geschichtete Lagenwicklung ausgeführt; die Niederspannungswicklungen sind kunstharzverfestigt. Die Kühlung erfolgt durch natürliche Luftzirkulation über mehrere Kühlkanäle, welche sich zwischen den Wicklungen und dem Kern befinden.

Die Spulen- und Kernpressung erfolgt im gegebenen Fall über glasfaserverstärkte Epoxydharz-Zugbolzen zwischen der Niederspannungs- und der Hochspannungswicklung. Dieses Konstruktionsdetail erlaubt eine günstige Ausbildung des elektrischen Feldes auf der Aussenseite der Hochspannungsspulen. Die sekundärseitigen Ableitungen werden auf Kunstharzstützer geführt und ermöglichen den wahlweisen Anschluss über Gewindebolzen oder Flachanschlüsse.

Fig. 14b zeigt eine Ausführung für eine Leistung von 250 kVA.

9. Leistungstransformatoren mit Aluminiumwicklungen

Die Verwendung von Aluminium im Transformatorenbau bereitet weiter keine Schwierigkeiten, besonders nachdem auch die Probleme mit den Verbindungs- und Anschlussstellen zufriedenstellend gelöst werden konnten.

Vom Konstrukteur sind natürlich die anderen physikalischen Eigenschaften des Aluminiums, wie seine um etwa einen Drittel geringere Leitfähigkeit und die kleinere mechanische Festigkeit, zu berücksichtigen.

Transformatoren mit Aluminiumwicklungen sind ebenso betriebssicher wie solche mit Kupferwicklungen. Sie haben sich in Zeiten der Kupferknappheit bewährt. Ein Teil der

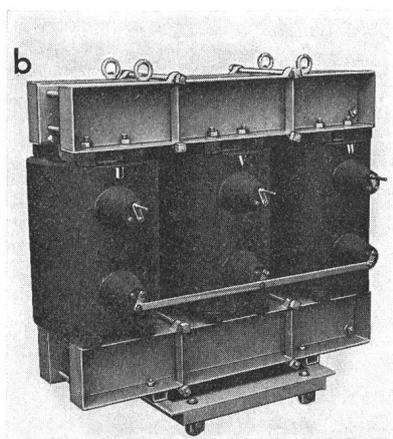
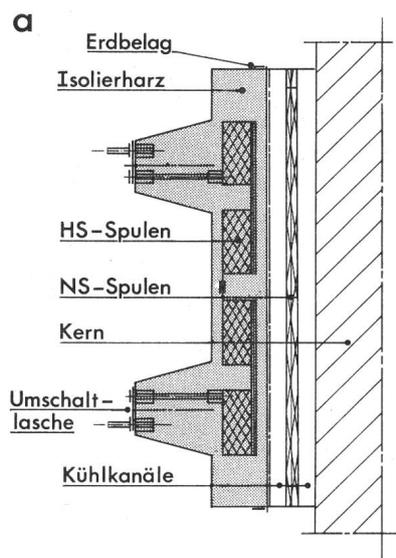


Fig. 14 Giessharzisolierter Drehstromtrockentransformator
a Aufbau b Ansicht

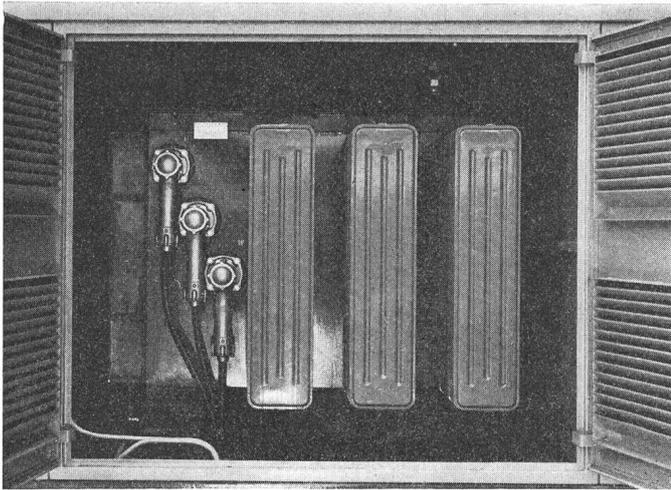


Fig. 15 630-kVA-Drehstromtransformator in einer Kompaktstation eingebaut

während des Zweiten Weltkrieges in Betrieb genommenen Transformatoren mit Aluminiumwicklungen steht noch heute in Verwendung. Neuerdings werden sie wieder in grösseren Stückzahlen hergestellt, sei es mit der Ober- und Spannungswicklung aus Aluminium oder auch nur mit einer von beiden. Ein wenn auch geringer Preisvorteil, hauptsächlich jedoch die Stabilität des Aluminiumpreises fördern diesen Trend.

Bei ähnlichen geometrischen Querschnitten war schon vor einem Vierteljahrhundert das Kilogramm Kupfer teurer als die leitwertgleiche Menge Aluminium, und diese Preisdifferenz hat sich bis heute wesentlich zugunsten des Aluminiums, dessen Preis bis heute praktisch konstant blieb, vergrössert. Dies bedeutet: Auch wenn das grössere Volumen des leitwertgleichen Aluminiums einen grösseren Eisenkern und damit einen grösseren Kessel bedingt und man, um gleiche Eisenverluste zu erhalten, bessere Magnetbleche verwenden oder die Kerninduktion reduzieren muss – welche letztere Massnahme abermalige Zunahme des Wicklungsvolumens bedeutet –, wird bei den heutigen Preisverhältnissen ein Netztransformator mit Aluminiumwicklung bei sonst gleichen technischen Bedingungen dennoch billiger als ein solcher mit Kupferwicklung.

Die Vorteile der Kupferbandwicklungen, wie hoher Füllfaktor, hohe Kurzschlussfestigkeit, günstige Erwärmungscharakteristik, vorteilhafte Stoßspannungsverteilung und günstigere Herstellungskosten gelten naturgemäss auch für die Aluminiumbandwicklungen.

10. Sonderausführungen

Der Vollständigkeit halber seien noch einige Sonderausführungen im Transformatorenbau der neueren Zeit aufgeführt.

10.1 Transformatoren für Kompaktstationen

Häufig zur Anwendung gelangen heute auch sog. Kompaktstationen zur Energieversorgung von Siedlungsgebieten, Sportanlagen usw. Diese Kompaktstationen sind äusserst klein in ihren Abmessungen und erfordern deshalb auch Transformatoren in gedrängtester Bauweise.

Ein Beispiel eines Transformators in Kompaktbauweise zeigt Fig. 15. Die HS-Anschlüsse dieses Transformators sind,

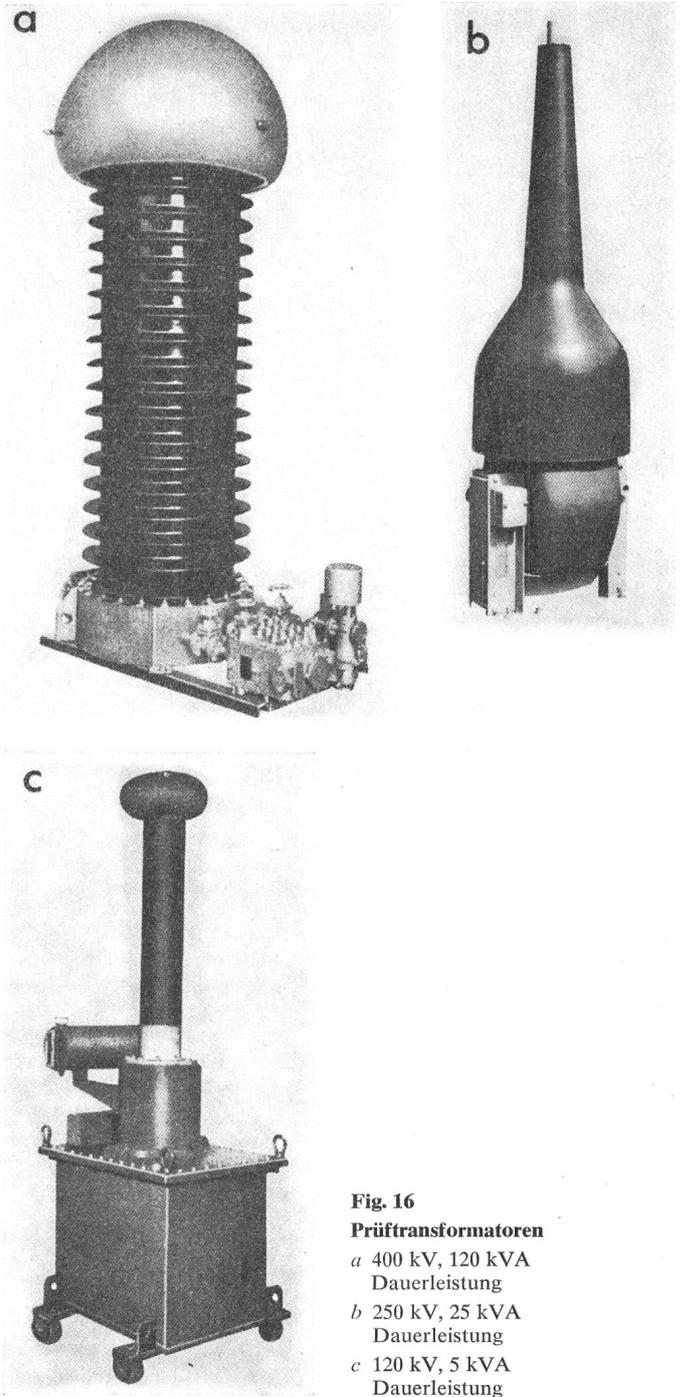


Fig. 16
Prüftransformatoren
a 400 kV, 120 kVA
Dauerleistung
b 250 kV, 25 kVA
Dauerleistung
c 120 kV, 5 kVA
Dauerleistung

um die Bauhöhe niedrig halten zu können, seitlich mittels berührungssicheren, steckbaren Armaturen herausgeführt.

Berührungssichere Transformatoren werden heute bei den oft beschränkten Platzverhältnissen immer mehr verlangt. Dazu wurden in den letzten Jahren auch verschiedene Systeme von geeigneten HS-Anschlussarmaturen entwickelt, welche in genormter Bauweise auf dem Markt erhältlich sind.

10.2 Primärseitig umschaltbare Verteiltransformatoren

Da sich infolge des ständig steigenden Energiebedarfes in vielen Verteilnetzen früher oder später die Verwendung höherer Netzspannungen aufdrängt, werden von verschiedenen Elektrizitätsversorgungen im Hinblick auf eine spätere Netzumschaltung bereits heute umschaltbare Transformatoren in

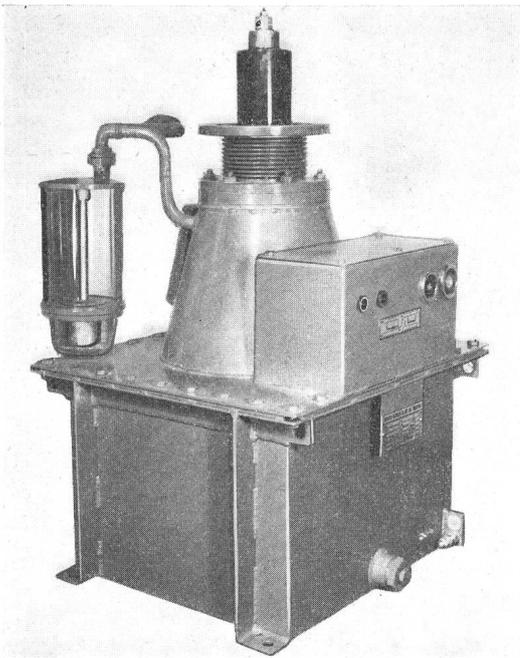


Fig. 17 Transformator zur Impulsübertragung

Auftrag gegeben. Die Primärspannung lässt sich auf einfache Art und Weise mittels eines Umstellers ohne Ausheben des Aktivteiles umschalten.

10.3 Prüftransformatoren

Die Reihe der möglichen Ausführungen solcher Transformatoren besitzt eine weite Ausdehnung, da sie jeweils den Kundenwünschen angepasst werden.

Grundsätzlich kann zwischen Trockentransformatoren und Transformatoren mit Isolierflüssigkeit unterschieden werden. Bei den letzteren gibt es vollständig gekapselte Typen mit Durchführungen und Typen mit Isoliermantel. Hinsichtlich der magnetischen Kreise bestehen Ausführungen mit geschlossenen Eisenkreisen oder Stabkernen. Stabkernausführungen mit Isoliermantel werden vorzugsweise für hohe Betriebsspannungen verwendet. Die durch den Kern erzwungene Gestalt des Aktivteiles erlaubt einen einfachen, linearen Potentialabbau gegen Erde. Hinsichtlich der Dimensionierung des Prüftransformators ist die Betriebsart – Dauerbetrieb oder Kurzzeitbetrieb – von Bedeutung. Während bei kleineren Spannungen dabei nur thermische Gesichtspunkte eine Rolle spielen, kann bei hohen Betriebsspannungen auch die dielektrische Beanspruchung in Funktion der Zeit zum Kriterium werden. Fig. 16 zeigt Ausführungsbeispiele.

10.4 Transformatoren zur Impulsübertragung

Solche Transformatoren, welche hauptsächlich in der Molekular-Forschung (CERN) Anwendung finden, dienen dazu, in bestimmten Zeitabständen Stromimpulse mit gleichbleibender Polarität von der Niederspannungsseite auf die Hochspannungsseite zu übertragen. Die Impulse besitzen die Gestalt einer sinusförmigen Halbwelle. Diese Transformatoren haben einen ähnlichen Aufbau wie Prüftransformatoren. Das Verhältnis von Eisen zum Kupfer ist, infolge der Forderung nach sehr kleinen Streuinduktivitäten, sehr gross. Um den Eisenquerschnitt zu reduzieren, besitzen diese Transformatoren eine Zusatzwicklung, über welche eine Vormagneti-

sierung des Kerns erzeugt wird. Damit wird der Arbeitsbereich der Magnetisierungskurve zweckentsprechend eingestellt.

Fig. 17 zeigt eine Ausführung zur Übertragung von sinusförmigen Halbwellen von 4,5 ms Dauer und mit einer Amplitude von 1,5 kA und 3 kV bei einer Wiederholungsfrequenz von 1mal pro 1,8 s.

10.5 Transformatoren für Paralleleinspeisung der Tonfrequenz in Rundsteueranlagen

Zur Paralleleinspeisung von Tonfrequenz-Kommandosignalen in Hochspannungsleitungen dient der in Fig. 18a und b gezeigte Transformator. Dieser ist eisenlos ausgeführt. Hoch- und Niederspannungswicklung sind mit Kunstharz vergossen. Die beiden Wicklungen bestehen aus je zwei Elementen. Durch die Verstellung der Abstände zwischen diesen Elementen sind die Induktivitäten der Wicklungen innerhalb eines bestimmten Bereiches regulierbar. Die durch die Konstruktion gegebene Möglichkeit der Veränderung der Distanz zwischen der Hoch- und der Niederspannungswicklung erlaubt die Einstellung eines bestimmten Kopplungsfaktors.

Die Ausführung der Spulen als Lagenwicklungen sichert ein gutes Stossverhalten. Die besondere Gestaltung des Harzkörpers erlaubt den äusseren Abbau des elektrischen Feldes gegen Erde ohne eingebaute Steuerbeläge. Auch gewährleistet diese Bauart durch Kaminwirkung eine gute Wärmeabfuhr der Harzkörperoberfläche und lässt somit eine hohe Belastungsstromdichte in den Wicklungen zu.

11. Ausblick

Wie eingangs erwähnt, sind Transformatoren geometrisch einfache Gebilde, deren Konstruktion sich seit den Anfängen der Elektrotechnik nicht grundsätzlich geändert hat. Die in der Vergangenheit erreichten Fortschritte beruhen zum grossen Teil auf der Anwendung neuer Technologien. Auch in

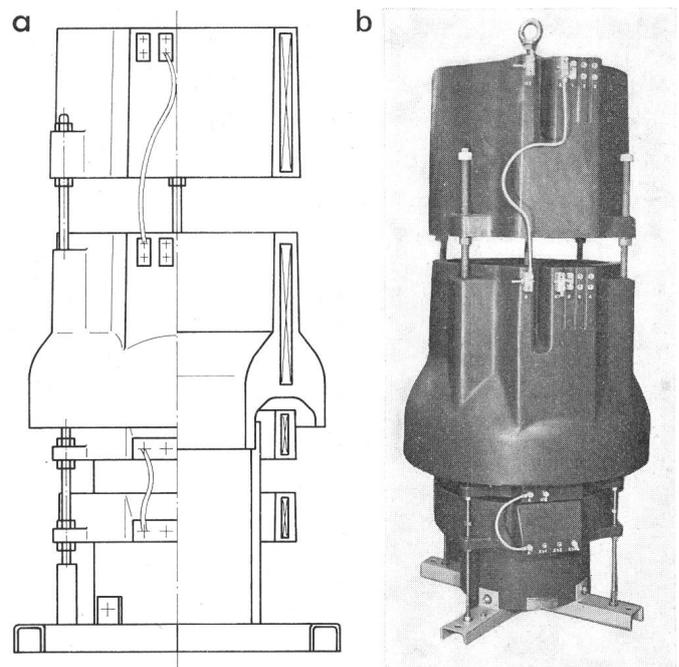


Fig. 18 Transformator zur Paralleleinspeisung der Tonfrequenz
a Aufbau b Ansicht

Zukunft dürfte die Entwicklung verbesserter und neuer Baustoffe die Triebfeder für fortschrittliche Lösungen sein. Sicher wird die Metallurgie neue magnetische Werkstoffe entwickeln, welche einerseits niedrigere Verlustziffern besitzen und andererseits eine höhere magnetische Sättigung zulassen. Während beim Leitermaterial bezüglich Leitfähigkeit kaum nennenswerte Veränderungen zu erwarten sind, dürften von seiten neuer Isoliermaterialien bedeutende Impulse erfolgen. Heute schon ist eine ganze Reihe von Produkten bekannt, welche eine höhere elektrische und thermische Beanspruchung zulassen. Die interessantesten unter ihnen sind vorläufig noch unwirtschaftlich teuer; bei steigender Nachfrage wird sich dieser Umstand jedoch korrigieren.

Ist es vermessen, zu prophezeien, dass zukünftige Verteiltransformatoren, ausgeführt in Giessharz-Trockenbauweise, für den Betrieb einfach im Erdboden vergraben werden? Dies wird übrigens bereits heute in den USA mit Öleinheiten praktiziert. Die Konzeption des Netzes müsste dann so sein, dass die Schutzvorrichtungen für mehrere Verteiltransformatoren in einer Knotenpunktstation konzentriert werden.

Literatur

[1] Propriétés des Askarels et recommandations pour leur emploi dans les appareillages électriques. Rapport Cigré N° 15-02, 1974.

Adresse der Autoren:

Josef Knapp und Jean Tripod, Moser-Glaser & Co. AG, 4132 Muttenz.

George Louis Lesage 1724–1803



Bibliothèque publique et universitaire, Genève

Lesages Vater, aus Burgund gebürtig, hatte als Knabe wegen den Religionsverfolgungen nach England fliehen müssen. Er liess sich später in Genf nieder. Geschick, aber weniger geschickt, schlug er sich mit Privatstunden kümmerlich durchs Leben.

Der am 13. Juni 1724 geborene Junge, schwächlich, schüchtern, träumerisch und im Ausdruck unbeholfen, bedrängte seinen Vater mit tausenderlei Fragen. Warum die Erde nicht falle, wollte er wissen. Der Vater konnte ihm die Sache nicht recht erklären und meinte, er solle sich lieber fragen, warum alle Dinge zur Erde fallen. Dieses Problem der Schwere oder der Anziehung der Körper verfolgte Lesage zeit seines Lebens. *Newtons* Theorie lehnte er ab. Er knüpfte bei den griechischen Denkern an und stipulierte, der Raum sei erfüllt von winzig kleinen Teilchen, die mit ungeheurer Geschwindigkeit in allen Richtungen dahinfliegen. In einem solchen «Feld» werde ein grosser Körper in vibrierendem Gleichgewicht gehalten. Zwei solcher Körper erführen dagegen Kräfte, die sie einander näherte.

Doch zurück. Auf Wunsch seines Vaters studierte Lesage Medizin, zuerst in Basel, wo er auch die Vorträge von *Daniel Bernoulli* hörte, nachher in Paris. Er schloss zwar das Medizinstudium ab, interessierte sich aber viel mehr für Mathematik. Nach dreieinhalb Studienjahren kehrte er 1747 nach Genf zurück. Dort durften aber nur Genfer Bürger den Arztberuf ausüben, und so war er froh, sich den Lebensunterhalt mit Privatstunden in Mathematik und Physik verdienen zu können. Dabei hatte er das Glück, einige Söhne von Gutsituiertern zu seinen Schülern zu zählen.

Auf ein Preisausschreiben der Académie Rouen «sur la cause des affinités» gewann er 1758 mit seiner «Essai de chimie mécanique» betitelten Arbeit einen Preis. Das machte ihn bekannt.

Es war um jene Zeit, dass er, trotz bester Damenbekanntschaften, beschloss, nicht zu heiraten, um seine ganze Kraft seiner Theorie über die Schwere zuzuwenden. Lesage unterhielt einen regen Briefwechsel mit Gelehrten, so auch mit *Euler*, der seine Theorie jedoch verwarf.

Genf, mit rund 20000 Einwohnern die weitaus grösste Stadt im helvetischen Raum, war noch Republik, wurde jedoch sowohl von Savoyen wie auch von Frankreich bedrängt. Schon einmal hatte man Berner und Zürcher zu Hilfe rufen müssen. Waren es solche Ereignisse, die Lesage die Notwendigkeit einer raschen Nachrichtenübermittlung vor Augen führten? Oder war ihm vielleicht *Scots Magazine* von 1753 mit einem Bericht über einen 24drähtigen Telegraphen in die Hände geraten? Jedenfalls tauchte die Idee eines elektrischen Telegraphen um diese Zeit auf. Aber erst 1774 liess er dann einen solchen bauen.

Sende- und Empfangsstation waren mit 24 Drähten miteinander verbunden, für jeden Buchstaben ein Draht. Mit einem geriebenen Glasstab oder durch Verbinden mit einer Elektrisiermaschine brachte man nacheinander Ladungen auf die verschiedenen Drähte, was bewirkte, dass am anderen Ende ein Elektrometer am betreffenden Draht einen Anschlag und damit einen Buchstaben zeigte. Lesage nannte diese Einrichtung «correspondance instantanée» also «augenblicklicher Nachrichtenaustausch». Er hatte im Sinn, *Friedrich den Grossen* für seine Erfindung zu interessieren; aber es blieb bei der Absicht, wie überhaupt vieles, was er wollte, nicht zur Ausführung kam.

1770 verlieh die Stadt Genf Lesage das Bürgerrecht in Würdigung seiner wissenschaftlichen Tätigkeit. Er starb nach kurzer, schmerzhafter Krankheit am 9. November 1803. *Pierre Prévost*, einer seiner Schüler, veröffentlichte auf Wunsch des Verstorbenen einige seiner Arbeiten und schrieb auch eine Biographie.

H. Wüger