

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 55 (1964)
Heft: 9

Artikel: Leistungstransformatoren für 500...750 kV
Autor: Lutz, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916707>

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: 15.05.2025

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

d'ionisation. Il est avantageux de supprimer également le condensateur de couplage haute tension. Cela est rendu possible par l'insertion d'un shunt ou d'un quadripôle de mesure entre la borne de neutre du transformateur et la terre, l'appareillage de mesure étant couplé à ce dispositif. La fig. 3b donne le schéma ainsi réalisé. On pourrait également imaginer utiliser un autre enroulement du transformateur, une armature de répartition de potentiel de la traversée haute tension ou tout autre partie métallique convenablement située pour remplacer le condensateur de couplage.

Remarquons encore que les mesures d'ionisation effectuées sur l'appareillage et surtout les transformateurs revêtent d'autant plus d'importance que les tensions de service sont élevées, aucune ionisation ne pouvant avoir lieu en service pour du matériel à basse et moyenne tension. Pour les très hautes tensions de service les tensions d'essai sont proportionnellement beaucoup plus basses que pour les tensions de service inférieures et l'on pourrait légitimement craindre que le matériel à très haute tension puisse plus facilement être le siège d'une ionisation néfaste en service. On peut même penser utile de prévoir pour les transformateurs en particulier un essai consistant en une mise sous tension prolongée à une valeur légèrement supérieure à la tension de service. Divers contrôles pourraient être faits à cette occasion en plus d'une mesure soigneuse de l'ionisation interne de ces appareils. De telles possibilités d'essai doivent en tous cas être prises en considération dans l'élaboration d'un projet de laboratoire pour très hautes tensions.

2.4 Essai en tension induite des transformateurs

Evoquons encore deux problèmes liés à l'essai en tension induite des transformateurs ou des autotransformateurs de puissance.

Le premier est celui des distances isolantes qu'on doit ménager entre l'électrode coiffant la borne portée au potentiel maximum et les diverses masses se trouvant à proximité. Si nous nous référons à la littérature spécialisée et à diverses mesures que nous avons pu effectuer nous-mêmes, nous pouvons admettre qu'une distance de l'ordre de quatre à cinq mètres serait suffisante pour des tensions d'essai de l'ordre

de 1100 kV alternatif. Une telle distance serait toutefois trop faible pratiquement en raison de l'instabilité du phénomène d'aigrettes se produisant à l'électrode d'extrémité de la borne de traversée. On peut même craindre que ne se produisent de temps à autre des claquages intempestifs sur des distances bien supérieures, comme cela se produit parfois pour les très hautes tensions continues. Les dimensions de l'espace réservé aux essais dans un laboratoire pour très hautes tensions doivent être déterminées en tenant compte de ce phénomène.

Le second des problèmes dont nous aimerions parler est celui des difficultés de réglage de la tension qui peuvent apparaître lorsqu'on essaie en tension induite des transformateurs de puissance et de tension très élevées. Un transformateur est en effet alors assimilable à un circuit oscillant parallèle dont la fréquence propre se situe autour de 200 Hz pour des puissances unitaires de l'ordre de 100 MVA. Cette fréquence propre tend à diminuer avec l'augmentation de la puissance de l'appareil. On cherche à se placer à la résonance lors des essais, de manière à diminuer le courant absorbé par le transformateur et afin d'obtenir un réglage stable de la tension. Si la fréquence propre du circuit en essai devait descendre au-dessous de 130 Hz environ, on ne pourrait se placer à la résonance sans saturer le circuit magnétique du transformateur au-delà des valeurs nominales. On devrait en conséquence travailler à une fréquence plus élevée ce qui placerait le générateur alimentant l'appareil en essai dans une zone d'auto-excitation capacitive. La stabilité du réglage de tension en serait affectée. Le générateur et son réglage doivent donc de toutes façons être conçus en fonction de ce service spécial.

Les quelques problèmes particuliers évoqués au cours de cet exposé, bien que demandant une attention spéciale, ne constituent pas des difficultés majeures dans le domaine des essais de développement et de réception du matériel à très haute tension, domaine pour lequel il est sans autre possible de prévoir un laboratoire doté de l'équipement adéquat.

Adresse de l'auteur:

J. Froidevaux, lic. ès sc., ing., chef du département de Recherches, S. A. des Ateliers de Sécheron, Genève.

Leistungstransformatoren für 500...750 kV

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 20. Januar 1964 in Zürich,
von H. Lutz, Zürich

621.314.21.027.85

Die bis heute gebauten Leistungstransformatoren sind für Spannungen von höchstens 400 bzw. 525 kV ausgelegt worden. 400-kV-Einheiten sind auch in der Schweiz aufgestellt und stehen seit einiger Zeit im Betrieb [1] ¹⁾. Mittlerweile haben aber Studien für die Energieübertragung mit noch höheren Spannungen, vor allem in den Vereinigten Staaten, zum Bau von Prototyp-Transformatoren mit Oberspannungen von etwa 650...750 kV geführt [2; 3], und die europäischen Transformatoren-Fabrikanten sahen sich deshalb veranlasst, ihre Entwicklungstätigkeit auch auf dieses Gebiet auszudehnen. Es sei hier gleich vorweggenommen, dass der Übergang von 400 auf 750 kV intensive Studien und Detailversuche erfordert, auch wenn sich die Transfor-

matoren für diese extrem hohen Spannungen in ihrer grundsätzlichen Konzeption nicht wesentlich ändern. So werden denn in den nachfolgenden Ausführungen diejenigen Gesichtspunkte in den Vordergrund gerückt, denen der Konstrukteur eine besondere Beachtung schenken muss.

1. Arten und Leistungen der Transformatoren

Schon bei Netzen mit 400 kV steht der Autotransformator im Vordergrund, und dies gilt in noch vermehrtem Masse bei 600 oder 700 kV. Der Grund liegt bekanntlich darin, dass ein Kraftwerk allein heute noch kaum eine so grosse Leistung produziert wie es für eine wirtschaftliche Übertragung bei diesen hohen Spannungen erforderlich ist. Die Energie verschiedener Elektrizitätswerke wird darum vorerst

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

auf eine mittlere Spannung von 220 oder 380 kV transformiert und erst in einem Sammelpunkt auf die endgültige Übertragungsspannung von beispielsweise 735 kV gebracht. Wir haben solche Sammelpunkte in unserem schweizerischen 400-kV-Netz in Sils und Tavanasa. Bei der Abwärts-Transformation fliesst die Energie dann ebenfalls erst wieder in Netze mit Spannungen von 220...400 kV, so dass hier sowieso praktisch ausschliesslich Autotransformatoren zur Aufstellung kommen. Reine Auftransformatoren mit Unterspannungen von 15...20 kV sind immerhin in Zukunft denkbar in thermischen oder Atom-Kraftwerken mit Generatorleistungen von 500...1000 MVA.

Aus dem bisher Gesagten lässt sich bereits entnehmen, dass Transformatoren mit Oberspannungen von 500...750 kV auch sehr grosse Einheitsleistungen aufweisen werden. Man spricht heute von dreiphasigen Einheiten oder Dreiphasengruppen mit Leistungen von 500...1000 ja sogar bis 1500 MVA. Unwillkürlich taucht hier die berechnete Frage auf, ob denn da nicht doch einmal irgendwo eine Grenze gesetzt sei. Beim näheren Betrachten des Problems stösst man tatsächlich auf verschiedene einengende Faktoren. Diese liegen einerseits beim Hersteller, wo z. B. die Krankapazitäten oder die Trocknungs- und Versuchseinrichtungen vielleicht nicht mehr genügen. Noch viel mehr aber beginnt die Transportfrage eine sehr entscheidende Rolle zu spielen. Fig. 1 zeigt ein Massbild eines dreiphasigen Autotransformators für 500 MVA bei einer Übersetzung von 750/400 kV. Ein solcher Transformator hätte die respektablen Transport-Abmessungen von 10,7 m Länge, 3,9 m Breite und 4,9 m Höhe sowie ein Transportgewicht von 260 t. In der Schweiz könnte heute eine solche Einheit gar nicht mehr verschoben werden. Ein kürzlich durchgeführter Transport eines 130 t schweren 140-MVA-Transformators von Zürich nach Basel liess sich nur noch mit grosser Mühe und bei trockenen Strassen bewerkstelligen.

Dabei erhebt sich aber sofort der Einwand, dass man für solche Leistungen immer die Möglichkeit habe, einphasige Einheiten zu bauen, wodurch das Transportproblem doch erheblich erleichtert werde. Das ist richtig. Man ist hier fast gezwungen, diese Lösung zu wählen, insbesondere auch darum, weil bei hohen Leistungen und Spannungen drei einphasige Transformatoren gewichts- und verlustmässig eher günstiger sind als ein Dreiphasentransformator. Andererseits laufen in verschiedenen Ländern aber auch Studien, welche darauf hinausgehen, grosse dreiphasige Transformatoren durch geeignete Zerlegung transportfähig zu machen. Gewisse Fabrikanten sind nämlich der Auffassung, dass der dreiphasige Transformator selbst dann noch die wirtschaft-

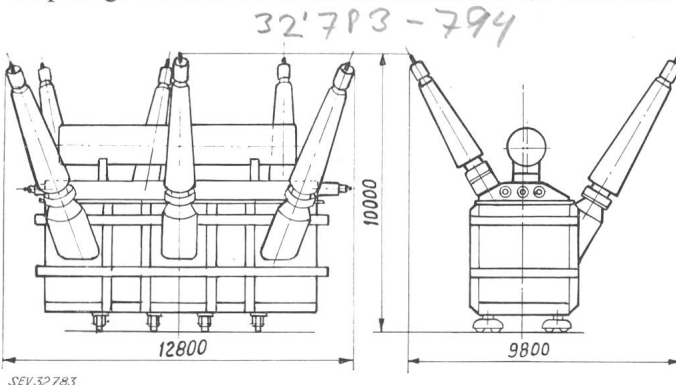


Fig. 1

Massbild eines 500-MVA-Autotransformators für 750/420/22 kV, 50 Hz

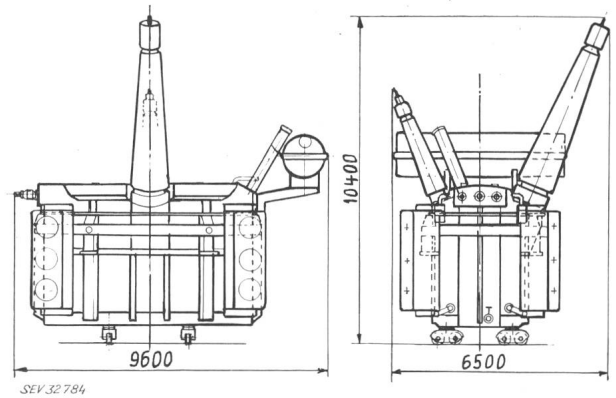


Fig. 2

Massbild eines einphasigen Autotransformators von 200 MVA, 735/315/12,5 kV, 60 Hz

lich günstigere Lösung darstelle, auch wenn er in zerlegtem Zustand versandt werden müsse. Hierüber wird an der kommenden CIGRE-Tagung 1964 in Paris Ausführlicheres zu hören sein. Indessen kommt man bei uns in der Schweiz auch mit einphasigen Einheiten wahrscheinlich bald einmal an die Grenze der Transportmöglichkeiten, während andere Länder (USA, England Schweden usw.) in dieser Beziehung weniger eingeengt sind.

Fig. 2 zeigt einen Einphasentransformator mit 200 MVA Leistung bei 735/315 kV und 60 Hz. Ähnliche Einheiten kommen bei der ersten 735-kV-Übertragung in Kanada zur Aufstellung [4]. Das Transportgewicht ohne Öl beträgt 137 t und die Transporthöhe 4,75 m. Hier wäre ein Transport auf der Strasse also noch ohne grössere Schwierigkeiten möglich.

Es ist übrigens heute naheliegend, im Zusammenhang mit den Transportfragen, auch an Transformatoren mit supraleitenden Wicklungen zu denken. Aus einer im Dezember 1963 erschienenen englischen Publikation von Wilkinson [5] ist zu ersehen, dass ein Transformator-Aktivteil bei Anwendung der Supraleitung bis auf ein Minimum von 39 % des heutigen Gewichtes reduziert werden könnte. Leider ist aber das Leitermaterial, das seine Supraleitfähigkeit auch bei starken, im Kurzschluss des Transformators auftretenden Streufeldern noch beibehält, bis heute noch nicht gefunden worden. Es ist auch ungewiss, ob die am supraleitenden Transformator erzielten Einsparungen an Material und kapitalisierten Minderverlusten nicht mehr als aufgehoben werden durch die Anschaffungs- und Betriebskosten des nötigen Kühlaggregates. — Wir werden also mit dieser Möglichkeit zur Senkung von Gewicht und Abmessungen der Transformatoren vorderhand nicht rechnen können.

2. Konstruktive Probleme

Bei den hier betrachteten Höchstspannungen steht naturgemäss die Spannungsfestigkeit bei Stoss- und Wechselspannung im Vordergrund. Welche Prüfspannungen sind hier vorgeschrieben? Dies ist in erster Linie eine Frage der Koordination der Isolation. Für 750 kV sind noch keine definitiven Prüfwerte festgelegt. Das Stossniveau bewegt sich voraussichtlich zwischen 2,1 und 2,2 MV und die Prüfwechselspannung zwischen 0,9 und 1 MV.

Die Spannungsbeanspruchungen an Wicklungen und Isolationen gehen bekanntlich in 3 Hauptrichtungen: einmal radial zwischen Ober- und Unterspannungswicklung (Hauptisolation), dann von den Spulenenden gegen die geerdeten

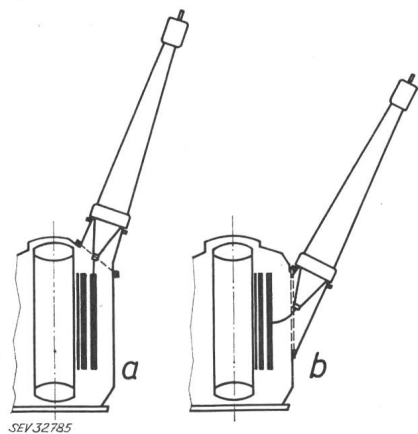


Fig. 3

Anordnung des Hochspannungsanschlusses von 750-kV-Transformatoren
a Anschluss am oberen Wicklungsende; b Anschluss in der Wicklungsmitte

Eisenteile (Enddistanzen) und schliesslich längs der Wicklung vom Hochspannungsanschluss bis zum Spulenende. Fig. 3 zeigt zwei verschiedene mögliche Anordnungen. In Fig. 3a ist der Hochspannungsanschluss am oberen Ende der Wicklung angedeutet. Dies ist günstig für die Längsfestigkeit, weil die ganze Säulenlänge zur Verfügung steht. Andererseits treten jedoch sehr hohe Beanspruchungen zwischen den Spulenenden und gegen Erde auf und ein genügendes Isolieren des Hochspannungseinganges und der Enddistanzen bietet enorme Schwierigkeiten. Zudem muss die Durchführung wegen ihrem hier doch schon verhältnismässig langen Unterteil

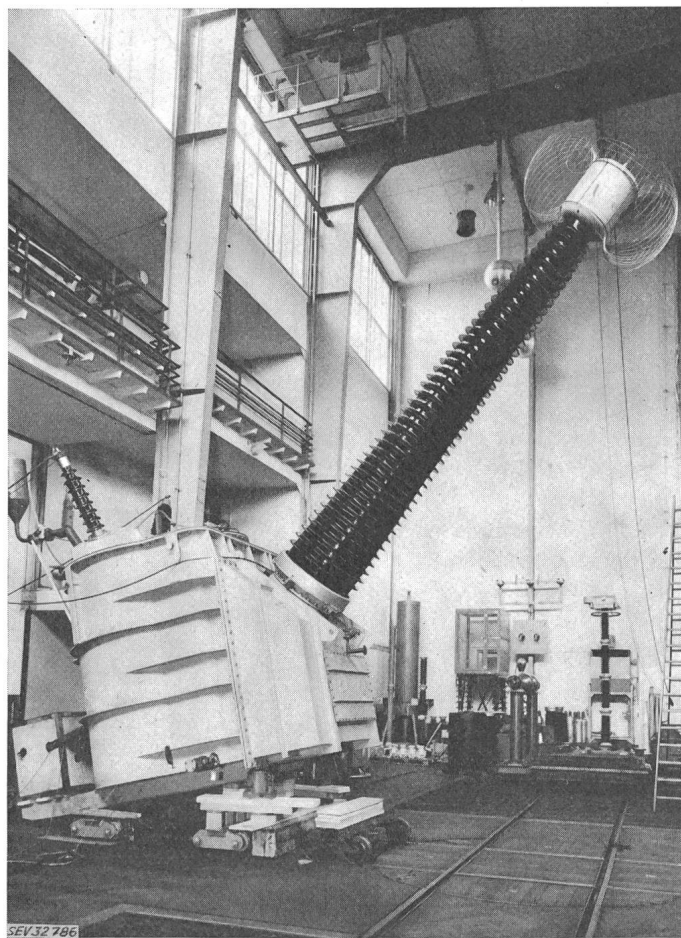


Fig. 4

750-kV-Transformatormodell für Wechselspannungsversuche
(Brown Boveri)

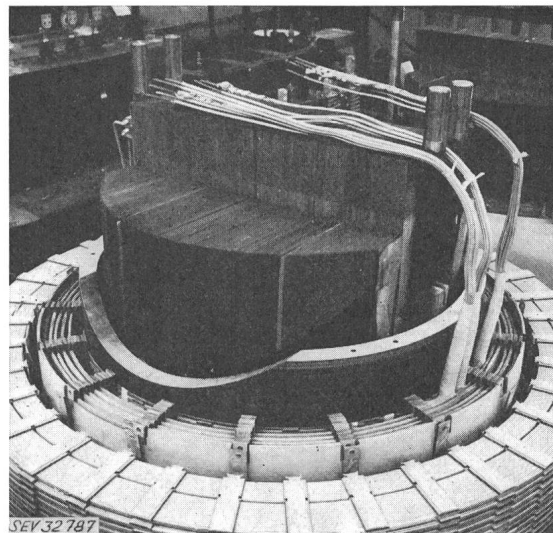


Fig. 5

Oberes Wicklungsende mit Hauptisolation (Presspan-Barrieren) eines
750-kV-Prototyp-Transformators
(Maschinenfabrik Oerlikon)

sehr hoch hinaufgesetzt werden, was einmal einen besonderen Dom erfordert, und zum andern den Kessel gerade an jener Stelle verbreitert, wo sich das Transportprofil verengt. Man wird darum für diese Spannungen, wenn immer möglich, die Lösung in Fig. 3b bevorzugen, wo der Hochspannungseingang in der Mitte der Spule liegt. Allerdings muss dann die Spannung auf die halbe Kernlänge verteilt werden. Dies ergibt bei ungesteuerten Wicklungen hohe Spannungsgradienten am Wicklungseingang, welche noch verschärft werden durch das gleichzeitig vorhandene radiale Feld. Bei gesteuerten Wicklungen sind die Beanspruchungen allerdings wieder wesentlich geringer. Schon 1951 hat Hurre [6] eine Untersuchung über den Entladungseinsatz an Spulenenden von Hochspannungswicklungen unter Öl publiziert. Durch eine, auf Versuchen im elektrolytischen Trog beruhende Erweiterung der dort erhaltenen Resultate in der Richtung auf grössere Streukanalbreiten und dickere Leiterisolationen erhält man die Grundlagen für die Berechnung der Gleitfunken-Einsatzspannung längs der Oberspannungswicklung. Das Hauptproblem besteht nun darin, die einzelnen Wicklungsparameter so zu wählen, dass bei einer maximalen Sicherheit gegen einen Gleitüberschlag doch mit einer Kernlänge ausgekommen werden kann, welche im Transportprofil noch Platz hat. Je nach der Art der Oberspannungswicklung ist im übrigen die Prüf-Wechselspannung oder die Stoßspannung die letztlich bestimmende Grösse. Bei 750 kV kommt allerdings der Wechselspannung in den meisten Fällen die grössere Bedeutung zu.

Um für jede dieser Beanspruchungen optimale Versuchsbedingungen zu haben, sind von Brown, Boveri in Baden zwei separate Wicklungsmodelle hergestellt und geprüft worden [7]. Fig. 4 zeigt ein Wechselspannungsmodell von BBC, mit welchem eine angestrebte Isolationsfestigkeit von 1050 kV bei 250 Hz mit grosser Sicherheit erreicht und nachgewiesen werden konnte.

Auf der Basis dieser Versuchsergebnisse entstand der später noch gezeigte Prototyp eines 750-kV-Leistungstransformators.

Fig. 5 zeigt schliesslich die praktische Ausführung der Hauptisolation eines 750-kV-Transformators der Maschi-

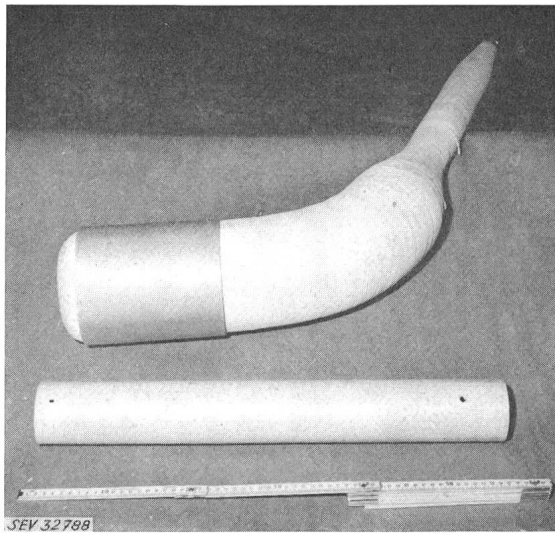


Fig. 6
750-kV-Anschlußstück für einen Prototyp-Transformator
(Maschinenfabrik Oerlikon)

nenfabrik Oerlikon. Der Hochspannungseingang befindet sich in der Spulenmitte, während in der Figur das geerdete obere Wicklungsende zu sehen ist.

Die weiteren mit der hohen Spannung zusammenhängenden Probleme beziehen sich vornehmlich auf die *Verbindungen* und *Durchführungen*. Bei den Wicklungsanschlüssen ist die einfachste Lösung die beste. Da die Verbindungen hier schon sehr dick isoliert sein müssen (40 mm Auftrag einseitig), versucht man das Umbündeln mit Papierstreifen zu ersetzen, z. B. durch ein Umpressen des Leiters mit einzelnen Schichten von Preßspan. Fig. 6 zeigt einen noch mit konventionellen Mitteln isolierten 750-kV-Anschluss des MFO-Prototyps, der im übrigen gleich wie der Transformator von BBC an der Expo 1964 ausgestellt sein wird.

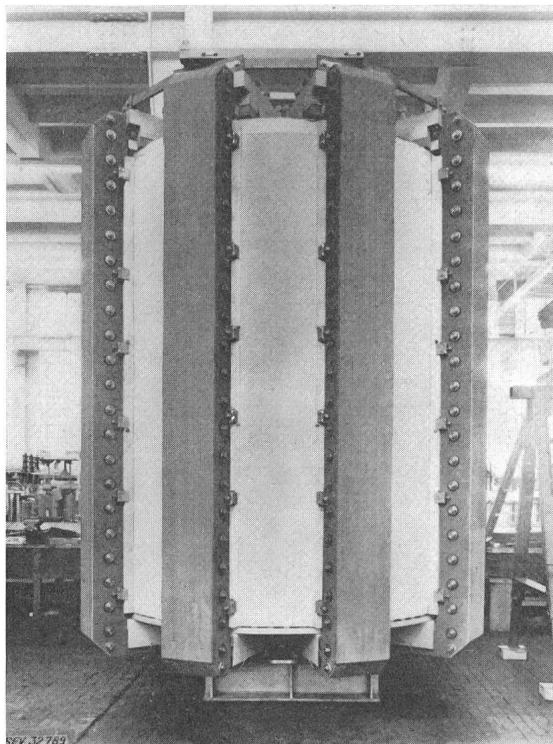


Fig. 7
Aktivteil eines 750-kV-Transformators
(Brown Boveri)

Die sehr grossen Durchführungen ergeben auch ausserhalb des Transformators gewisse Probleme, vor allem hervorgerufen durch die nötigen Luftdistanzen ihrer spannungsführenden Enden. Es kann unter Umständen schwierig werden, alle Durchführungen richtig zu plazieren, besonders wenn es sich um eine dreiphasige Einheit handeln sollte.

Besondere Aufmerksamkeit ist im weiteren einer wirkungsvollen *Kühlung* der Wicklungen zu schenken. Die grossen Transformatorleistungen ergeben grosse Ströme und relativ breite Wicklungen, und die hohen Spannungen erfordern gute Isolation. Beides wirkt im Sinne einer Verschlechterung der Wärmeabfuhr. Fig. 7 zeigt den aktiven Teil eines 750-kV-Transformators von BBC, Fig. 8 denjenigen der MFO. Aus beiden Bildern ist der grosse Isolationsaufwand zu erkennen. Die Isolation erreicht bei dem früher

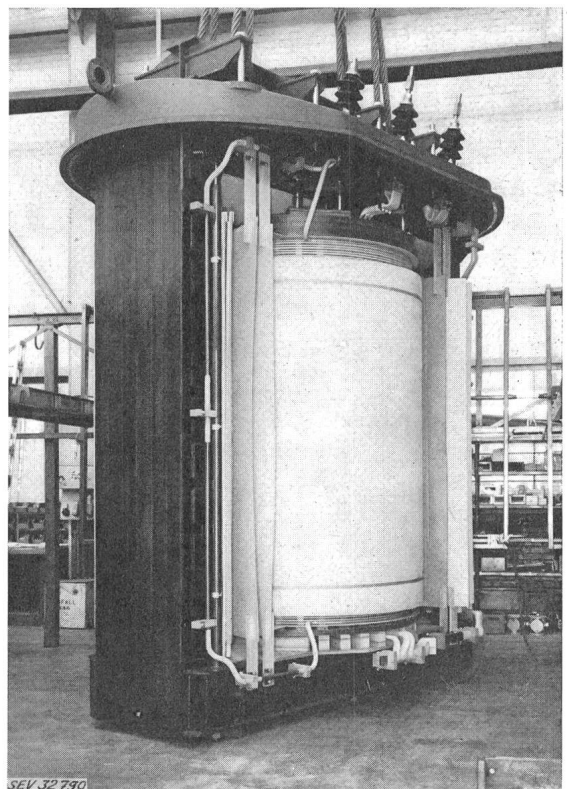


Fig. 8
Aktivteil eines 750-kV-Transformators
(Maschinenfabrik Oerlikon)

erwähnten 500-MVA-Autotransformator 15,3 % des Transformatorgewichtes ohne Öl. Um die Kühlung der Wicklungen zu verbessern, müssen genügend axiale Kühlkanäle im Innern der Spulen vorgesehen sein. Daneben pumpt man hier mit Vorteil das Kühlöl direkt durch die Wicklungen (forcierte innere Ölzirkulation). Dies ist ohne weiteres möglich, da bei solchen Einheiten schon wegen den äusseren Kühlern Ölpumpen vorhanden sein müssen.

Eine kurze Bemerkung sei noch zur Frage der *Kurzschlussfestigkeit* gemacht. Es wurde schon verschiedentlich auf die Tatsache hingewiesen, dass in diesen Höchstspannungsnetzen sehr hohe Kurzschlussleistungen auftreten können. Das viele Isoliermaterial im Transformator ergibt andererseits eher verhältnismässig «weiche» Wicklungen. Man wird daher durch sehr sattes Wickeln, eine sorgfältige Vorbehandlung und Pressung der Spulen sowie durch stark dimensionierte Abstützungen dafür sorgen müssen, dass der

Transformator den vorkommenden Netzkurzschlüssen dauernd standhält.

Ähnlich wie bei Netzkupplungen bei tieferen Spannungen muss auch bei Autotransformatoren mit 750 kV Oberspannung voraussichtlich häufig eine *Spannungsregulierung* auf der Seite der tieferen Netzspannung vorgesehen werden. Die einfachste und nach Dafürhalten des Autors betrieblich sicherste Lösung besteht in der indirekten Regulierung durch einen separaten Booster-Transformator auf der Unterspannungsseite. Man muss dann allerdings einen entsprechenden Schalter zur Verfügung haben, der für die betreffende Unterspannung isoliert ist. Bisher sind Stufenschalter bis max. 300 kV gebaut worden. Ob es auch bei 400...450 kV noch wirtschaftlich möglich ist, Lastschalter herzustellen, wird erst die Zukunft zeigen. Andernfalls müsste bei einer Unterspannung von 400 kV auf eine Regulierung verzichtet und diese erst bei der nächsten Transformationsstufe von z. B. 400/220 oder 400/150 kV vorgesehen werden. Sofern der Regelbereich nicht zu gross ist, bestünde allerdings noch die Möglichkeit einer direkten Regulierung am geerdeten Nullpunkt des Auto-Transformators, was nur einen Schalter von etwa 50 kV Nennspannung bedingen würde. Dabei hätte man dann aber bekanntermassen eine variable Induktion und damit auch eine variable Tertiärspannung in Kauf zu nehmen. Auch eine Regulierung im Nullpunkt lässt sich natürlich in einen separaten Regulierungstransformator verlegen.

3. Prüfung, Transport und Montage

Obschon bei der Prüfung kaum grundsätzlich neue Aspekte auftreten, erfordern auch diese Fragen eingehende Vorstudien.

Die nötigen Spannungen für die *Stossprüfung* sind meistens vorhanden. Hingegen werden grössere Stossleistungen erforderlich sein, um die normale Wellenform zu erreichen.

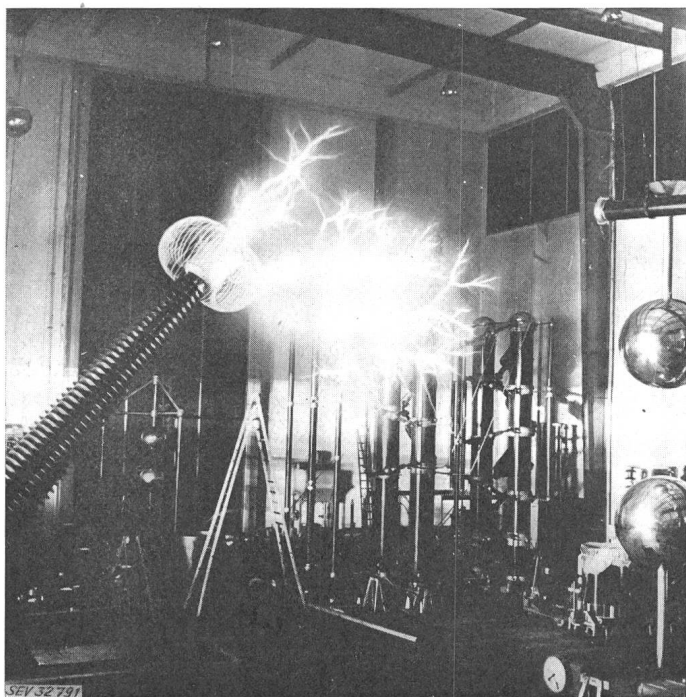


Fig. 9

Entladungen am Abschirmkorb der Durchführung bei der Prüfung des BBC-Wechselspannungsmodells mit 850 kV, 250 Hz

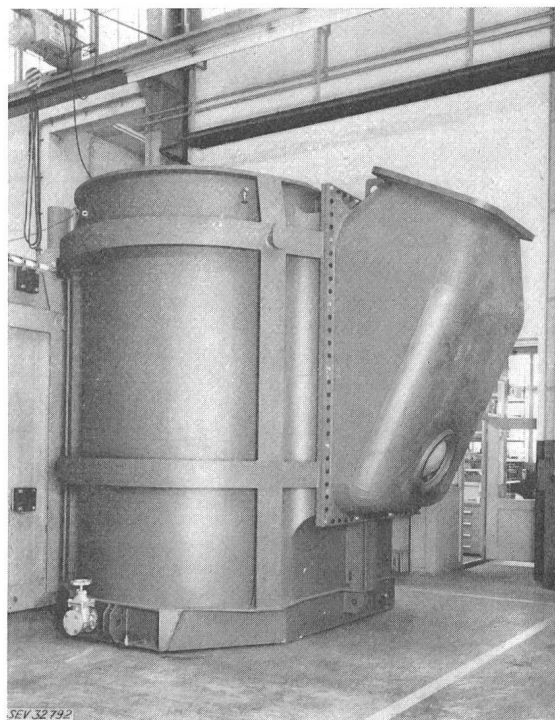


Fig. 10

Kesselanbau für die Aufnahme einer 850-kV-Durchführung (Maschinenfabrik Oerlikon)

Volle Stösse bieten messtechnisch kaum Schwierigkeiten. Dagegen müssen bei abgeschnittenen Stössen mit Spannungen von mehr als 2 MV besondere Massnahmen für die geeignete Erdung getroffen werden, damit keine sekundären Hochfrequenzimpulse in den Oszillogrammen störend in Erscheinung treten.

Etwas schwieriger zu bewältigen ist schon die Prüfung mit induzierter *Wechselspannung*. Bei diesen hohen Spannungen fliessen entsprechend grosse kapazitive Ströme, welche entweder eine grosse Maschinenleistung oder eine Kompensation mit entsprechenden Induktivitäten erfordern. Die starke, geräuschvolle Koronabildung auf den Durchführungen muss natürlich durch entsprechende Abschirmkugeln möglichst eingedämmt werden. Fig. 9, welche die Prüfung des Wechselspannungsmodells von BBC mit 850 kV darstellt, vermittelt einen für sich selbst sprechenden Eindruck von den prüftechnischen Problemen, welchen die Versuchslokale bei diesen Spannungen gegenüberstehen.

Überhaupt machen sich bei diesen hohen Spannungen alle Glimmerscheinungen in Luft sehr störend bemerkbar, insbesondere dann, wenn auch noch der innere Ionisationspegel des Transformators gemessen werden sollte. Man wird deshalb gezwungen sein, die ganzen Hochspannungs-Installationen möglichst koronafrei zu gestalten. Dass das keine einfache Aufgabe ist und einen hohen Aufwand erfordert, dürfte wohl einleuchtend sein. Dass es aber möglich ist, eine bis zu 1 MV ionisationsfreie Anlage zu bauen, hat beispielsweise die Micafil AG mit ihrem neuen Hochspannungslaboratorium bewiesen.

Es sei hier allerdings noch beigelegt, dass sich das Problem der *Ionisationsmessung* in Transformatoren noch immer im Stadium der Erforschung der Grundlagen befindet. Ein aus Vertretern verschiedener Fachkollegien des Schweiz. Elektrotechnischen Komitees gebildeter Arbeitsausschuss vergleicht gegenwärtig an Hand eines Normalmodells die

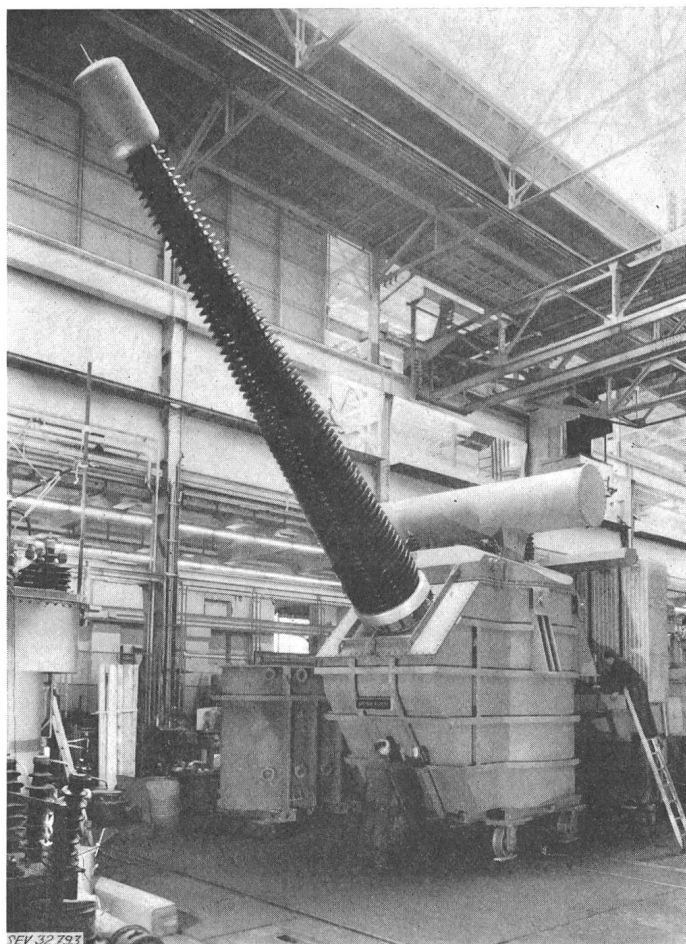


Fig. 11
Fabrikationsreif entwickelter Transformator-Prototyp für 750 kV
(Brown Boveri)

in verschiedenen schweizerischen Laboratorien und mit verschiedenen Methoden gemessenen Ionisationspegel. Von einer routinemässigen Ionisationsprüfung bei diesen hohen Spannungen kann also noch einige Zeit kaum die Rede sein.

Über die *Transportprobleme* wurde eingangs bereits ausführlich gesprochen. Wichtig ist in dieser Phase die unbedingte Trockenhaltung der Isolationen. Dies erfordert unter anderem eine rasche Demontage und Wiedermontage der Kesselanbauten, welche z. B. die Hochspannungsdurchführungen tragen (Fig. 10).

Trotzdem wird man nach der *Montage* am Aufstellungs-ort den Transformator nochmals nachtrocknen, wozu heute sehr gute Einrichtungen existieren. Dass schlussendlich auch das gut aufbereitete Öl unter einem guten Vakuum von mindestens 0,1...0,3 Torr in den Kessel eingezogen werden muss, ist wohl selbstverständlich. Gewisse Schwierigkeiten könnten noch beim Einsetzen der langen Durchführungen auftreten. Diese erfordern spezielle Einrichtungen und eine sehr sorgfältige Handhabung.

Wie bereits früher erwähnt, sind in der Schweiz nun zwei Transformatoren für 750 kV fertiggestellt worden. Fig. 11 zeigt die Gesamtansicht der Ausführung von BBC. Dieser Transformator ist gebaut für eine Leistung von 250/3 MVA auf der Oberspannungsseite und 50/3 MVA unterspannungsseitig bei einer Frequenz von 50 Hz. Seine Übersetzung beträgt $750/\sqrt{3}/50-8$ kV. Als oberspannungsseitige Prüfspannungen wurden folgende Werte festgesetzt:

Induzierte Wechselspannung	1050 kV
Vollstoss	2400 kV

Abgeschnittener Stoss	2750 kV
Fremdspannung	70 kV

Fig. 12 zeigt den analogen Prototyp der MFO beim Einsetzen der 850-kV-Durchführung. Er ist konzipiert als Zweiwicklungstransformator mit einer Leistung von 100/3 MVA bei 50 Hz und einer Übersetzung von $750/\sqrt{3}/17,5$ kV.

Als Prüfspannungen für die Oberspannungswicklung sind vorgesehen:

Induzierte Wechselspannung	1000 kV
Vollstoss	2300 kV
Abgeschnittener Stoss	2650 kV
Fremdspannung	95 kV

Im Zusammenhang mit diesen beiden Prototyp-Transformatoren sei noch ein kurzes Wort zur hierfür gewählten Transformatorenart gesagt. Es ist wesentlich, dass solche Prototypen möglichst konform sind mit einer realen konstruktiven Disposition, wobei nach früher Gesagtem hierunter eher der Autotransformator und nicht ein Zweiwicklungstransformator zu verstehen ist. Auf Grund von früheren Untersuchungen ist jedoch bekannt, dass beim Zweiwicklungstransformator sowohl bei Stoss wie auch bei Wechselspannung überall (ausgenommen an der Enddistanz) höhere Beanspruchungen auftreten als beim Autotransformator. Beherrscht man also den ersten, so ist man auch in der Lage den zweiten zu bauen. Für die Enddistanz sollten separate Versuche an einfacheren Modellen gemacht werden, da bei einem Autotransformator von 750/400 kV die 400-kV-Enddistanz mit Wechselspannung gar nicht richtig geprüft wer-

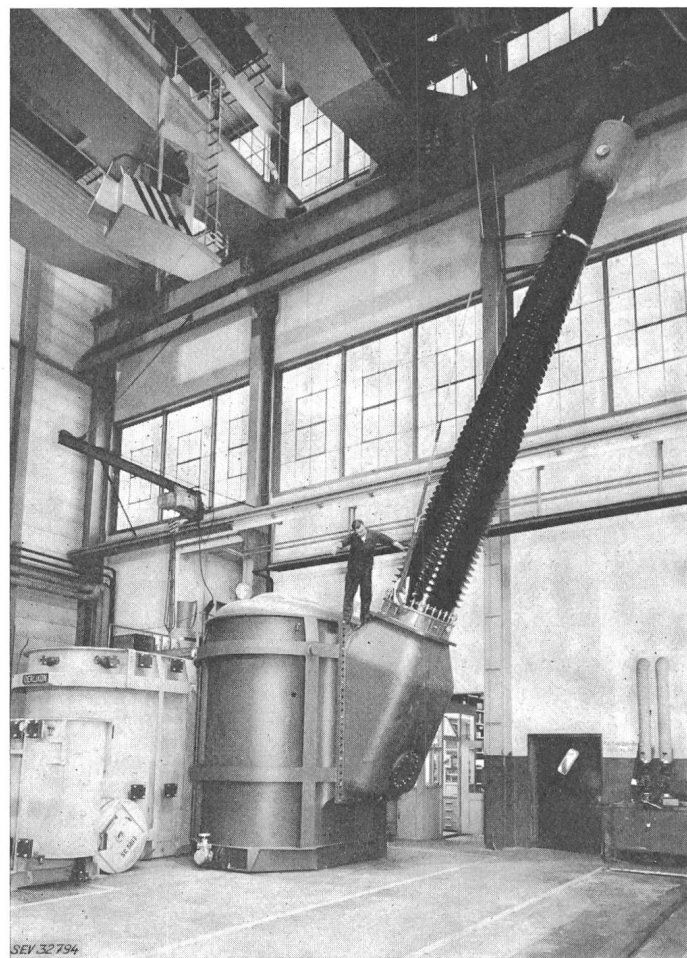


Fig. 12
Transformator-Prototyp für 750 kV beim Einsetzen der Hochspannungsdurchführung
(Maschinenfabrik Oerlikon)

den kann. Infolge des Übersetzungsverhältnisses tritt an dieser Stelle statt der normalen Prüfspannung von 680 kV eine solche von nur etwa 500 kV auf, was nahezu der Beanspruchung einer Enddistanz für nur 220 kV entspricht.

Naturgemäss liegen heute noch keine Betriebserfahrungen mit 750-kV-Transformatoren vor. Immerhin wird der Transformator von BBC während der Expo unter Spannung stehen, so dass sich bis zum Herbst dieses Jahres vielleicht doch schon einige Schlussfolgerungen werden ziehen lassen. Es ist jedoch zu erwarten, dass Transformatoren, welche die vorher genannten Spannungsprüfungen bestanden haben, genau so betriebssicher arbeiten werden wie ihre für 400 kV ausgelegten Vorgänger. Selbstverständlich müssen dazu auch die entsprechenden Schutzeinrichtungen für diese höchsten Spannungen zur Verfügung stehen, was anerkannterweise heute schon weitgehend der Fall ist.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die mit dem Bau von Transformatoren für Spannungen von 500...750 kV zusammenhängenden technischen Probleme heute von der schweizerischen Elektroindustrie weitgehend

gelöst sind, und dass dazu die nötigen Fabrikations- und Prüfeinrichtungen vorhanden sind, um in Zukunft solche Transformatoren liefern zu können.

Literatur

- [1] Hch. Lutz: Auslegung und Bau von 400-kV-Transformatoren. Bull. SEV 52(1961)23, S. 915...923.
- [2] J. P. Geibel, C. B. Lindh, A. Rowe: 460 and 650 kV Autotransformers for Penelec and Project EHV. AIEE Conference Paper 62-266, 7 S.
- [3] Apple Grove Test Station Dedicated at 775 kV: Sets New Record. Electrical World, 3 July 1961, S. 30...31.
- [4] The first 735 Power Transmission System of the world. ASEA-Journal 36(1963)5-6, S. 84...86.
- [5] K. J. R. Wilkinson: Supraconductive windings in power transformers. Proc. IEE 110(1963)12, S. 2271...2279.
- [6] K. Hurre: Untersuchung über den Entladeinsatz an Spulenkannten von Hochspannungswicklungen unter Öl. Archiv für Elektrotechnik 40(1951), S. 75...88.
- [7] B. Gänger: Einige Ergebnisse der Spannungsprüfungen an Transformatormodellen und Apparaten für extrem hohe Übertragungsspannung (750 kV). Brown Boveri Mitt. 50(1963)3, S. 159...175.

Adresse des Autors:

H. Lutz, dipl. Ingenieur, Chef der Konstruktionsabteilung für Transformatoren, Maschinenfabrik Oerlikon, Zürich 11/50.

Stromwandler für 750 kV

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 20. Januar 1964 in Zürich,
von L. Erhart, Aarau

621.314.224.8

1. Anforderungen

Die hauptsächlichen Anforderungen, die an Stromwandler für 750-kV-Netze gestellt werden sind folgende:

- a) Die höchste Betriebsspannung liegt bei etwa 765 kV, wobei die Prüfspannungen stark reduziert sind.
- b) Der Beginn der inneren und äusseren Ionisation soll über der 1,2fachen Phasenspannung liegen.
- c) Zu führende Nennströme sind etwa 2000...2500 A, während die dynamische Kurzschlussfestigkeit ca. 75 kA (Scheitelwert) betragen soll.
- d) Eine hohe Messgenauigkeit und Messleistung sowie ein einwandfreies transientes Verhalten bei Überströmen ist einzuhalten.

Während die meisten Punkte durchwegs auch für Stromwandler tieferer Spannung gelten können, ist die wohl bedeutendste neu gegebene Forderung die der höheren Betriebsspannung. Somit kann der Stromwandler für 750 kV vorerst als ein Isolationsproblem betrachtet werden [1]¹⁾.

2. Prinzip

Das Bauprinzip von Stromwandlern für Spannungen von 750 kV ist massgebend durch die Wahl und Anordnung der Isolation sowie Eisenkern und Wicklung gekennzeichnet. Ausgehend von den bisherigen Konstruktionen für 420 kV und tiefer, von denen mehrjährige Herstellungs- und Betriebserfahrungen vorliegen, können nachfolgende Lösungen angegeben werden, wenn man von einer andern als transformatorischen Stromumformung absieht. Als Isolationsmedium wird dabei wie bei tieferen Spannungen, die öl-impregnierte Papierisolation mit ihren guten Isoliereigenschaften, zur Erzielung von kleinsten Abmessungen zur Anwendung gelangen. Alle mit der Papier-Öl-Isolation verbundenen Fragen, wie Wahl der Isolierstoffe, des Isolieröls, der einwandfreien Herstellung, Trocknung und Imprägnierung,

müssen auf das Beste gelöst sein. Auf die Einzelheiten soll hier jedoch nicht näher eingegangen werden [2]:

- a) Der Stromwandler aufgesteckt auf der Durchführung des Transformators ist die einfachste Lösung, die heiklen Probleme liegen mehr bei der Kondensator-Durchführung.
- b) *Einstufige Isolation*. Eine Fortsetzung der einstufigen Isolierung, z. B. auf der Primärwicklung wie sie bei 420-kV-Stromwandlern angewendet wird, stellt den Konstrukteur vor zahlreiche neue und bisher unerprobte Probleme. Die dielektrische Erwärmung sowie die Gefahr des Wärmekippens bei fortschreitender Isolierstoff-Alterung, die einwandfreie Vakuum-Trocknung und Imprägnierung der erforderlichen grossen Papierdicken sind etwa die wichtigsten zu lösenden Probleme.
- c) *Zweistufige Isolation*. Unterteilt man die Isolation auf Primärwicklung einerseits und Kern mit Sekundärwicklung andererseits, so erhält man bereits Spannungs- und Isolationsstufen, wie sie heute für tiefere Spannungen üblich sind. Der transformatorische Teil ist unverändert wie bei tieferen Spannungen.
- d) *Zwei- und mehrstufige Isolation und Kaskade*. Wird der magnetische Teil in zwei Stufen und in Serie als Kaskade geschaltet, so kann die Isolation in zwei bis vier Stufen unterteilt werden. Damit ist es auch möglich, den Stromwandler in zwei Teile trennbar auszuführen. Durch entsprechende Dimensionierung kann die Messgenauigkeit im normalen Betrieb durchaus gewährleistet werden.

Aus dieser Gegenüberstellung ist ersichtlich, dass vor allem die Lösungen nach isolationstechnischen Gesichtspunkten für eine erste Realisierung vorteilhaft in Betracht gezogen werden können.

3. Lösungen

Von den bis jetzt bekannt gewordenen Lösungen über 750-kV-Stromwandler, von denen auch Prototypen ausgeführt wurden, sollen zwei typische Konstruktionen näher betrachtet werden, zunächst jene der AG Brown, Boveri & Cie.

Der konstruktive Aufbau entspricht dem unter Ziff. 2d) genannten Prinzip. Aus Fig. 1 ist der Aufbau sowie die Schaltung ersichtlich. Der Wandler wurde unter Anwendung

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.