

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 52 (1961)
Heft: 23

Artikel: Auslegung und Bau von 400-kV-Transformatoren
Autor: Lutz, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916885>

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>

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Auslegung und Bau von 400-kV-Transformatoren

Von H. Lutz, Zürich

621.314.21.027.840

Der Aufsatz gibt einen generellen Überblick über die Anforderungen, welche an die Transformatoren gestellt werden beim Übergang auf eine Netzspannung von 400 kV, wobei insbesondere die schweizerischen Verhältnisse ins Auge gefasst sind. Neben den zentralen Fragen der Spannungsfestigkeit werden die konstruktiven Möglichkeiten erörtert. Ein besonderer Abschnitt befasst sich mit den Regeltransformatoren, welche bei diesen Spannungen meist nicht mehr in der konventionellen Art hergestellt werden können. Ferner wird noch kurz auf einige Fragen bezüglich Transport und Aufstellung eingegangen.

L'exposé donne un aperçu général des exigences auxquelles doivent répondre les transformateurs prévus pour un réseau à 400 kV, tout en observant les conditions exigées en Suisse. A côté des questions primordiales de rigidité diélectrique, les diverses possibilités de construction sont commentées. Un chapitre particulier traite des transformateurs de réglage qui, pour ces très hautes tensions, ne peuvent plus être exécutés de la manière classique. Enfin, quelques problèmes de transport et de mise en place sont brièvement expliqués.

1. Einleitung

Im Dezember 1952 wurde im Rahmen einer Diskussionsversammlung des SEV [1]¹⁾ erstmals in der Schweiz über die Probleme der 380-kV-Übertragung gesprochen. Obschon damals bereits solche Höchstspannungsnetze, z. B. in Schweden, erfolgreich im Betrieb standen, dachte wohl kaum jemand daran, dass fast genau zehn Jahre später bereits auch in der Schweiz ein erstes 380-kV-Netz in Betrieb genommen werden müsste. In den Anfängen der 380-kV-Übertragung war man der Auffassung, dass solche hohe Spannungen vor allem für den Energietransport über sehr weite Distanzen vorteilhaft seien, Distanzen, welche in der Schweiz gar nicht vorkommen. Mittlerweile zeigte sich aber ein anderer Grund, welcher den Übergang auf 380 kV als dringende Notwendigkeit erscheinen liess. Die weitere Ausnützung der Wasserkräfte, vor allem im Kanton Graubünden, brachte ein starkes Anwachsen der in die Verbrauchszentren zu übertragenden Energiemengen, so dass ein Transport mit 220 kV wegen der Vielzahl der dazu nötigen Freileitungen bereits grosse Schwierigkeiten gebracht hätte, und zwar aus Gründen der zur Verfügung stehenden Trassées und auch des Naturschutzes. Dadurch, dass die übertragbare Energie bei 380 kV pro Leitung etwa dreimal so gross ist wie bei 220 kV, ergab der Übergang auf die höhere Spannung die Möglichkeit, die Zahl der neu zu verlegenden Leitungen bedeutend zu reduzieren, ganz abgesehen davon, dass mit höherer Spannung die Anlagekosten eher sinken [2].

Etwa 1956 traten zwei grosse schweizerische Elektrizitätsunternehmen [Motor-Columbus und Nordostschweizerische Kraftwerke (NOK)] an diese neue Aufgabe heran. Bereits gegen Ende 1957 wurden die ersten 400-kV-Transformatoren für die Schweiz in Auftrag gegeben; die erste 400-kV-Leitung vom Bündnerland in die Gegend von Bassersdorf (ZH) befindet sich gegenwärtig im Bau. Für eine spätere Nord-Süd-Verbin-

dung ist auch der Ausbau der Gotthard- und Lukmanierleitung auf 380 kV vorgesehen, weil sich inzwischen gezeigt hat, dass es für die Schweiz unumgänglich ist, sich in das europäische 400-kV-Netz einzumaschen.

2. Die wichtigsten Arten von 400-kV-Transformatoren

Grundsätzlich können in einem 400-kV-Netz die gleichen Typen von Transformatoren zur Anwendung gelangen wie in einem Netz mit niedrigerer Spannung. In der Praxis ist die Bedeutung der einzelnen Arten jedoch sehr unterschiedlich und es traten bisher bei 400 kV hauptsächlich die einfachen Auftransformatoren und die Kuppeltransformatoren in Autoschaltung sowie Kombinationen davon in Erscheinung.

2.1 Der Auftransformator

Der Auftransformator mit einer Übersetzung von beispielsweise 16/410 kV ist bestimmt zur Aufstellung in einem Kraftwerk. Eine bestimmte Einschränkung wird hier aber durch die Grösse der Kraftwerkleistung auferlegt. Transformatoren für 400 kV sind infolge des benötigten grossen Aufwandes für die Isolationen nur wirtschaftlich, wenn sie eine gewisse minimale Grösse aufweisen. Aus der Literatur geht hervor, dass die wohl kleinsten bisher gebauten Dreiphasen-Gruppen eine Leistung von immerhin 130 MVA besitzen. In der Mehrzahl sind solche Transformatoren jedoch für bedeutend höhere Leistungswerte (bis 600 MVA) ausgelegt, so dass sie meist nur in relativ grossen Kraftwerken wirtschaftlich betrieben werden können. Reine Kraftwerktransformatoren erhalten normalerweise keine Spannungsregelung unter Last, doch werden teilweise spannungslos umschaltbare Anzapfungen am Sternpunkt der Oberspannungswicklungen vorgesehen [3].

2.2 Der Kuppeltransformator

Weiter verbreitet als der Auftransformator ist der Kuppeltransformator. Für diese hohen Spannungen ist

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

er wohl die wichtigste Transformatorart. Er wird im Sammel- oder Verteilpunkt von Energietransport-Leitungen mit niedrigeren Spannungen eingesetzt. Meistens beträgt diese niedrigere Spannung 220 kV, seltener 150 oder 110 kV. Naturgemäss sind die Gruppenleistungen dieser Transformatorart im Durchschnitt noch grösser als bei reinen Auftransformatoren. Sie variieren bei den bekannten Ausführungen zwischen 270 und 1000 MVA. Kuppeltransformatoren werden normalerweise in Autoschaltung gebaut und sind — wie übrigens auch bei tieferen Netzspannungen — in vielen Fällen mit einer Spannungsregelung unter Last ausgerüstet. Im Gegensatz zu ähnlichen Einheiten für tiefere Spannungen wird hier die Regelung aber zweckmässigerweise in einen separaten Regeltransformator gelegt, damit der leistungsstarke Haupttransformator nicht durch eine Regeleinrichtung und Regelwicklung kompliziert werden muss.

2.3 Kombierter Auf- und Kuppeltransformator

Aus den im Zusammenhang mit den reinen Auftransformatoren dargelegten Gründen gewinnt bei Höchstspannungen der kombinierte Auf- und Kuppeltransformator an Bedeutung. Er kann trotz seiner grossen Einheitsleistung in einem kleineren Kraftwerk aufgestellt werden, das aber zugleich noch Sammelpunkt für die Energie von benachbarten kleineren Kraftwerken ist. Die Zuführung dieser Energie geschieht bereits mit Spannungen von 150 oder 220 kV. Zur gegenseitigen Anpassung der verschiedenen Spannungen müssen solche Transformatoren häufig auch wieder mit einer Spannungsregelung unter Last ausgerüstet werden. Sie arbeiten im übrigen sowohl als Zweiwicklungs-Transformatoren für die Auftransformierung wie auch in Autoschaltung für die Netzkupplung. Naturgemäss bieten diese Einheiten die meisten Probleme bei der berechnungsmässigen und konstruktiven Auslegung. Die ersten in der Schweiz aufgestellten 400-kV-Transformatoren gehören in diese Kategorie [5; 6].

3. Übersicht über die bisher gebauten Einheiten

Wenn für eine bestimmte Anwendung die Transformatorart gewählt ist, so wird die detaillierte Aus-

legung wie üblich von der Grösse der Nennleistung, der Phasenzahl und dem Übersetzungsverhältnis bestimmt. In Tabelle I sind diese Hauptdaten einiger bereits ausgeführter 400-kV-Transformatoren zusammengestellt. Es zeigt sich daraus, dass die Transformatoren durchwegs mit relativ hohen Einheitsleistungen gebaut wurden, und aus diesem Grunde die meisten Ausführungen einphasig sind. Gegen dreiphasige Typen spricht einmal der relativ grosse Platzverlust zwischen den Oberspannungswicklungen der einzelnen Phasen, und zum anderen die Schwierigkeit, so grosse Maschinen überhaupt zu transportieren. Dadurch, dass die Kuppeltransformatoren fast ausschliesslich in Autoschaltung gebaut sind, lassen sich bekanntlich die Typenleistungen und damit die Kosten stark reduzieren. Da vor allem bei 400 und 220 kV, aber auch noch tiefer, die Netze starr geerdet sind, bringt die Autoschaltung keinerlei Nachteile, im Gegenteil, die Übertragungsverluste im Transformator werden dadurch noch verringert. Wie schon bei tieferen Spannungen, erhalten auch hier die Autotransformatoren für reinen Kuppelbetrieb eine in Dreieck geschaltete Tertiärwicklung, welche neben dem Ausgleich der höheren Harmonischen im Magnetisierungsstrom meistens dem Anschluss eines Blindlastkompensators dient. Es ist interessant, dass die 400-kV-Übertragung vor allem in Europa und Russland eingeführt wurde, während in den USA erst heute die Vorversuche dazu beginnen. Allerdings besteht dort die Absicht, eventuell gleich noch höher, nämlich auf Spannungen von 650...750 kV zu gehen [8]. In der Schweiz wurde vor 4...5 Jahren von Dreiphasengruppen mit Leistungen von 250...300 MVA gesprochen. Bei den ersten Ausführungen wählte man aber bereits Gruppenleistungen von 400 und neuestens sogar 600 MVA.

4. Das Isolationsproblem

Was bei Höchstspannungstransformatoren die meisten Entwicklungsprobleme aufgeworfen hat, sind nicht zuerst die grossen Einheitsleistungen sondern eben die sehr hohen Betriebs- und Prüfspannungen. Die Verhältnisse seien auf Grund der in Fig. 1 darge-

Zusammenstellung verschiedener bisher ausgeführter Transformatoren für Höchstspannung

Tabelle I

Kategorie	Land	Leistung pro Einheit MVA	Phasenzahl pro Einheit	Übersetzung der 3phasigen Gruppe kV	Totalgewicht ohne Öl, ohne Kühler t	Bemerkungen
A. Auftransformatoren	Schweden	43	1	13,8/400		Erster 400-kV-Transformator 1951 [4]
	Schweden	43,5	1	17,7/400		
	Schweden	100	3	13,5/400		
	Schweden	115	1	16 /370	155	
	Schweden	200	1	18 /400	185	
	Frankreich	88	3	10,3/403	129	
B. Kuppeltransformatoren	Deutschland	220	1	400/231	208	mit eingebautem Regeltransformator [7]
	Schweden	220	1	400/150	170	
	Schweden	170	1	425/146		
	Schweden	333	1	400/217	≈ 200	mit Regelung unter Last mit separatem Regeltransformator
	Finnland	140	1	380/238	≈ 85	
	Russland	270	3	400/110	252	
	Russland	90	1	525/115	128	
	Frankreich	100	1	380/225	≈ 105	
	Schweiz	200	1	400/242	120	
C. Kombinierte Transformatoren	Schweden	195/150/64	1	400/235/13,5		mit separatem Regeltransformator
	Schweden	165/125/60	1	389/148/12,4		
	Schweden	155/105/50	1	405/241/14		
	Schweden	150/75 /75	1	388/150/16		
	Schweden	125/85 /40	1	405/241/12,5		
	Schweiz	133/93 /40	1	410/248/13		

stellten typischen Wicklungsanordnungen näher erläutert. Bei den Isolationsfestigkeiten unterscheidet man bekanntlich zwischen Durchschlag- und Überschlag- oder Längsfestigkeit. So werden z. B. in Fig. 1a die Isolierstrecken a und b auf Durchschlag beansprucht während die Oberspannungswicklung zwischen dem 400-kV-Anschluss und den geerdeten Enden eine Längsfestigkeit aufweisen muss, welche von den Isolationen c und d mitbestimmt wird.

Die Dimensionierung eines 400-kV-Transformators bezüglich der auf Durchschlag beanspruchten Isolierstrecken lässt sich zur Hauptsache auf die Überlegungen bei tieferen Spannungen zurückführen. Im Prinzip müssen die Distanzen a und b so gewählt werden, dass nur wenig höhere spezifische Beanspruchungen als z. B. bei 220 kV auftreten. Es ist dabei allerdings zu beachten, dass die Durchschlagfestigkeiten bei Vergrößerung der Isolationsabstände nicht proportional hierzu anwachsen. Modellversuche mit naturgrossen Isolationanordnungen für diese Spannungen sind verständlicherweise sehr kostspielig und zeitraubend. Um die Schwierigkeiten von grossen inhomogenen Bean-

drückungen an den Wicklungsenden möglichst zu umgehen oder im Falle von Kuppeltransformatoren (Fig. 1b) mindestens zu mildern, legt man in der Regel den 400-kV-Anschluss in die Mitte der Wicklung einer Säule. Die Enddistanz b ist dann im einen Fall nur noch nach dem Isolationsniveau des Sternpunktes, im andern nach demjenigen der Unterspannung zu isolieren. In der Bemessung der Isolierstrecke a ist man im allgemeinen räumlich gebunden, weil der radiale Wicklungs- und Isolationsaufbau die totale Transportbreite des Transformators bestimmt. Für die schweizerischen Fabrikanten ist diese maximale Breite in den meisten Fällen durch das Bahnprofil der Schweiz. Bundesbahnen (SBB) gegeben. Um bei 400 kV in den Transformator also möglichst viel Leistung einbauen zu können, muss die Hauptisolation a hoch beansprucht werden. Das ist dann zulässig, wenn entweder der ganze Streukanal vollständig mit festem Isoliermaterial (Papier) gefüllt wird, oder wenn er durch Preßspanbarrieren so fein unterteilt wird, dass die verbleibenden Ölkanäle sehr schmal werden und dadurch ebenfalls eine höhere dielektrische Festigkeit aufweisen. Die Zunahme der Sicherheit gegen Durchschlag mit steigender Barrierenzahl ist aus den berechneten Kurven der Fig. 2 ersichtlich. Hieraus lässt sich zwar ableiten,

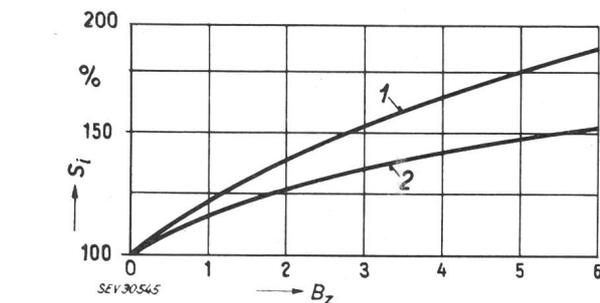


Fig. 2

Zunahme der Durchschlags-Sicherheit eines 100 mm breiten Streukanals mit steigender Unterteilung durch Preßspan-Barrieren von 5 mm Dicke

- 1 Sicherheit bei Wechselspannungs-Beanspruchung
 - 2 Sicherheit bei Stossbeanspruchung
- B_z Barrierenzahl

Schwieriger als das Problem der Streukanal- (a) bzw. der Enddistanzisolation (b) ist bei diesen hohen Spannungen die Frage der Längs-Überschlagfestigkeit zu lösen. Da die Höhe des Transformators und damit die ausnutzbare Länge des Eisenkerns auch wieder durch das Transportprofil gegeben ist, steht für die Länge der Oberspannungswicklung kaum ein grösserer Raum als bei tieferen Spannungen zur Verfügung. Die Beanspruchungen bei der Prüfung, vor allem mit Stossspannung, werden daher bei den in Tabelle II zusammengestellten Prüfspannungen ausserordentlich gross. Die Möglichkeiten zur Erreichung einer genügend grossen Längsfestigkeit können hier nur angedeutet werden. Sie sind anderweitig schon im Detail beschrieben worden [10].

Prüfspannungen in verschiedenen Ländern für Höchstspannungstransformatoren

Tabelle II

Land	Jahr	Netzspannung kV	Prüf-Stoßspannung		Wechselspannungsprüfung kV
			Vollwelle kV	abgeschnittene Welle kV	
Schweden [4]	1952	400	1775	—	780
	1958	400	1500	—	660
Russland (ca.)	1955	400	1500	?	700
	1958	500	1750	?	945
	1960 ¹⁾	500	1550	1650	750
Frankreich	1958	400	1450	—	630
Deutschland	1958	400	1425	1640	640
Finnland	1957	400	1650	1900	725
Schweiz	1957	400	1550	—	680
CEI (Entwurf)	1959	400	1550	min. 1550	680
			1425	min. 1425	630

¹⁾ Schutz durch verbesserte Ableiter [9].

spruchungen an den Wicklungsenden möglichst zu umgehen oder im Falle von Kuppeltransformatoren (Fig. 1b) mindestens zu mildern, legt man in der Regel den 400-kV-Anschluss in die Mitte der Wicklung einer Säule. Die Enddistanz b ist dann im einen Fall nur noch nach dem Isolationsniveau des Sternpunktes, im andern nach demjenigen der Unterspannung zu isolieren. In der Bemessung der Isolierstrecke a ist man im allgemeinen räumlich gebunden, weil der radiale Wicklungs- und Isolationsaufbau die totale Transportbreite des Transformators bestimmt. Für die schweizerischen Fabrikanten ist diese maximale Breite in den meisten Fällen durch das Bahnprofil der Schweiz. Bundesbahnen (SBB) gegeben. Um bei 400 kV in den Transformator also möglichst viel Leistung einbauen zu können, muss die Hauptisolation a hoch beansprucht werden. Das ist dann zulässig, wenn entweder der ganze Streukanal vollständig mit festem Isoliermaterial (Papier) gefüllt wird, oder wenn er durch Preßspanbarrieren so fein unterteilt wird, dass die verbleibenden Ölkanäle sehr schmal werden und dadurch ebenfalls eine höhere dielektrische Festigkeit aufweisen. Die Zunahme der Sicherheit gegen Durchschlag mit steigender Barrierenzahl ist aus den berechneten Kurven der Fig. 2 ersichtlich. Hieraus lässt sich zwar ableiten,

Die Längsfestigkeit hängt hauptsächlich ab von den zwischen den einzelnen Scheibenspulen (c) auftretenden Beanspruchungen. Diese wiederum sind eine Funktion der Höhe der zwischen diesen Scheiben entstehenden Spannungen und der dazwischenliegenden Isolation. Aus Gründen der Kühlung besteht ein Teil dieser Isolation aus Öl, ein anderer Teil aus der Papier-

isolation der einzelnen Leiter (*d*). Die Längsfestigkeit kann also erhöht werden entweder durch eine Verstärkung dieser Längsisolation oder durch eine Reduktion der zwischen den Scheiben auftretenden Spannungen, besonders bei Stoss. Eine Verbesserung der Längsisolation durch Vergrößerung des Abstandes der Scheibenspulen, durch Erhöhung der Leiterisolation oder durch Winkelringe zwischen den Scheiben (Fig. 3) hat zur Folge, dass der axiale Raum für das Kupfer

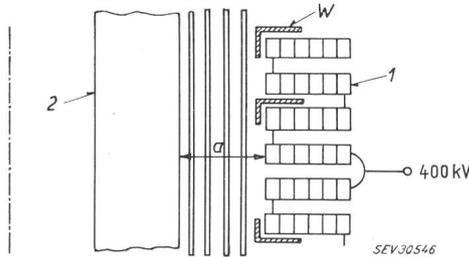


Fig. 3

Verstärkung der axialen Isolation der Hochspannungsspule durch eingelegte Winkelringe *W*

1 Oberspannungsspule; 2 Unterspannungsspule; *a* Hauptisolation

reduziert wird und die Wicklung daher in radialer Richtung vergrößert werden muss. Dies führt jedoch zu sehr breiten Spulen, die schlechter zu kühlen sind und andererseits dem Transformator eine zu grosse Gesamtbreite aufzwingen. Erheblich wirtschaftlicher ist es daher, die Spannungsverteilung bei Stoss zwischen den Scheibenspulen so zu steuern, dass an keiner Stelle der Wicklungen übermässig hohe Teilspannungen in Längsrichtung entstehen. Hiefür sind eine ganze Reihe von mehr oder weniger wirksamen Methoden bekannt. Alle laufen darauf hinaus, der Wicklung eine möglichst hohe Längskapazität C_s zu geben im Verhältnis zu ihrer Erdkapazität C_e .

Als Mass für die Güte der Spannungsverteilung definiert man bekanntlich eine Grösse α :

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_e}{C_s}}$$

Je mehr α sich dem Wert 1 nähert, um so günstiger verhält sich die Wicklung bei Stossbeanspruchung. Eine sehr gute Methode zur Niedrighaltung von α ist die Anwendung von sog. verschachtelten Wicklungen, wie sie erstmals von einer englischen Firma [11] vorgeschlagen und seither in zunehmendem Mass und auch

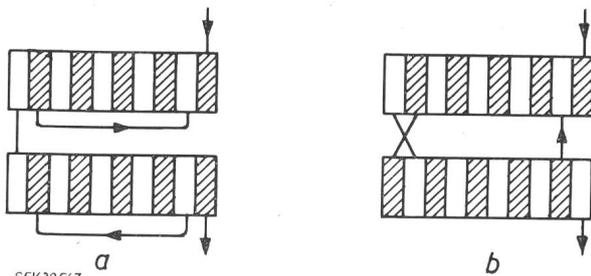


Fig. 4

Verschachtelte Wicklungen mit erhöhter Seriekapazität

a verschachtelte Einfach-Scheibenspulen;
b verschachtelte Doppel-Scheibenspulen

in verschiedenen Abwandlungen angewendet worden sind. Das Prinzip besteht darin, dass jede Scheibenspule ganz oder teilweise zweimal von einem Serieleiter durchlaufen wird (Fig. 4). Die Wirkung ist umso grösser, je mehr Windungen ein Leiter zurücklegt bis

er zum Ausgangspunkt zurückkehrt, um den gleichen Wicklungsteil ein zweites Mal zu durchlaufen. Die Grenze ist jedoch gegeben durch die Spannung zwischen benachbarten Leitern, die ebenfalls um so grösser wird, je später diese Rückkehr stattfindet.

Die Verbesserung der Spannungsverteilung bei Stoss, z. B. durch verschachtelte Wicklungen, bringt noch den weiteren Vorteil mit sich, dass die ganze Wicklung fast durchweg gleich stark isoliert werden kann, was sich durch die Vermeidung von Unstetigkeitsstellen nochmals günstig auf das Schwingungsverhalten der Spule auswirkt, so dass sich als Resultat eine optimale Ausnützung des vorhandenen Wickelraumes und eine sehr einfache, störungsempfindliche Wicklung ergibt.

Als interessantes Phänomen bei der Betrachtung der elektrischen Längsfestigkeit ist die Abhängigkeit derselben von der radialen Beanspruchung zu erwähnen. Wenn der Abstand zwischen Ober- und Unterspannungswicklung immer kleiner gemacht wird, so sinkt bei gleicher axialer Isolation der Oberspannungsspule ihre Längs-Überschlagsfestigkeit τ_{is} mit der steigenden radialen Feldstärke E_{rad} erst langsam und dann immer rascher, wie dies die in Fig. 5 dargestellten Messwerte ergeben haben. Das bedeutet, dass auch bei bester Isolation der Hauptstreuspalt noch eine gewisse minimale Breite aufweisen muss, wenn man nicht unüberwindlichen Schwierigkeiten bei der Längsisolation begegnen will.

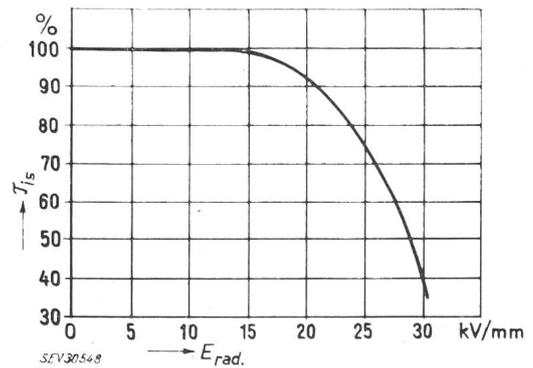


Fig. 5

Reduktion der axialen Überschlagsfestigkeit einer Wicklung bei Vergrößerung der radialen Beanspruchung gegenüber der benachbarten Wicklung

Der Nachweis der Spannungsfestigkeit ist normalerweise durch die üblichen Prüfungen mit induzierter Wechselspannung und Stoss zu erbringen. Obschon diese Versuche praktisch mit genügender Sicherheit die Betriebstauglichkeit des Objektes nachweisen, besteht heute, besonders bei Hochspannungstransformatoren, der Wunsch nach noch feineren Messmethoden. Eine solche ist die Ionisationsprüfung, bei welcher der Nachweis erbracht werden soll, dass bis zu Wechselspannungen vom 1,2...1,3fachen Wert der höchsten Betriebsspannung auch keine Glimmentladungen im Innern des Transformators auftreten. Die Zweckmässigkeit und Durchführbarkeit solcher Messungen ist jedoch heute in der Fachwelt noch umstritten, da einerseits nicht genau feststeht wie schädlich solche Entladungen überhaupt sind, und andererseits die Messmethoden, wie auch die Interpretation der Messresultate noch sehr im Entwicklungsstadium sind. Diese Fragen werden 1962 in Paris an der CIGRE-Tagung erneut Gegenstand der Diskussionen sein.

5. Konstruktive Aspekte

Wie andere Grosstransformatoren erhalten auch solche für 400 kV üblicherweise Eisenkerne aus kornorientierten und geglühten Dynamoblechen, um sowohl die Eisenverluste wie auch die gesamten Abmessungen möglichst klein zu halten. Häufig werden bei Einphasen-Einheiten zwei bis drei bewickelte Säulen und magnetische Rückschlüsse vorgesehen (Fig. 6). Dadurch ist es möglich, die Säulenlänge gross zu machen, was sich aus den oben erwähnten Gründen günstig auf die elektrische Längsfestigkeit der Hochspannungsspulen auswirkt. Ferner lässt sich so die bei 400 kV relativ hohe Zahl von Windungen besser unterbringen. Die gleichen Vorteile werden auch mit der einsäuligen radial geblechten Bauart erreicht (Fig. 7).

nehmen selbst bei völlig symmetrischer Wicklungsanordnung Werte an, die über 100 kg/cm² betragen können, bezogen auf die Abstützfläche der Preßspandistanzierungen zwischen den Scheibenspulen. Dabei rechnet man mit der Möglichkeit einer Beschädigung der Wicklung, wenn die Druckbeanspruchungen im Bereich von etwa 160...200 kg/cm² liegen. Fig. 8 zeigt den einfachen, robusten Aufbau einer 400-kV-Wicklung.

Im weiteren wäre noch ein Wort zu den Verbindungen zu sagen. Es kommen hierfür zur Hauptsache papierisolierte Kupferleiter, oft mit rohrförmigem Querschnitt, zur Anwendung. Der Durchmesser muss gross sein, damit die elektrischen Feldstärken an der Oberfläche klein bleiben. Die so entstehenden relativ dicken Leitungen verlangen eine möglichst einfache

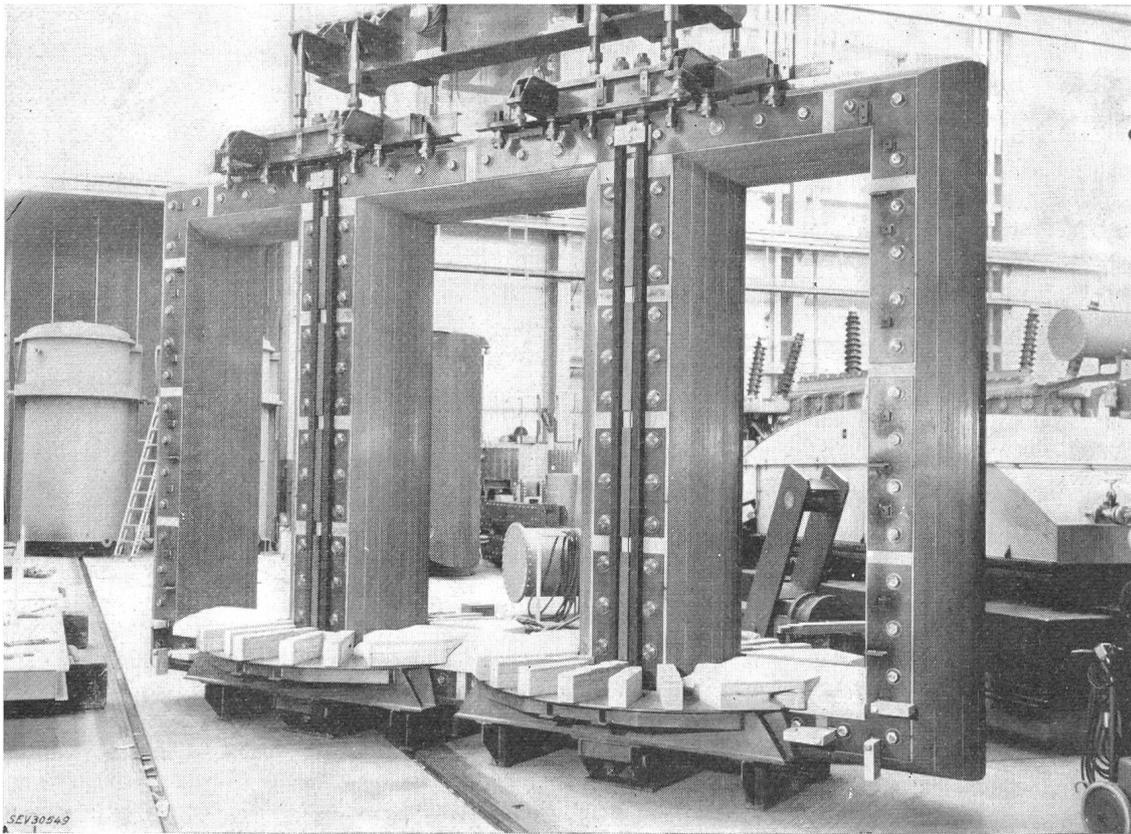


Fig. 6
Eisenkern für einen einphasigen Autotransformator
(Typ MFO)

133 MVA, $\frac{410}{\sqrt{3}} / \frac{248}{\sqrt{3}}$ kV mit zwei bewickelten Schenkeln und zwei magnetischen Rückschlüssen

Bezüglich der Wicklungen und Isolationen ist im vorhergehenden Abschnitt bereits das Wesentliche gesagt worden. Es ist wohl nicht besonders zu betonen, dass bei den sehr grossen Netzleistungen in 400-kV-Netzen (10 000...20 000 MVA) der Kurzschlussfestigkeit der Wicklungen ganz besondere Beachtung geschenkt werden muss. Man liegt bei Hochleistungstransformatoren mit der Zugbeanspruchung des Kupfers in der aussenliegenden Wicklung bereits im Gebiet der 0,2-0/-Streckgrenze des Leitermaterials. Für verarbeitete Kupferleiter befindet sich diese Grenze bei statischer Beanspruchung im Gebiete von etwa 4...10 kg/mm². Für dynamische Beanspruchung kann nur mit unwesentlich höheren Werten gerechnet werden. Auch die axialen mechanischen Druckbeanspruchungen

Linienführung, und man trachtet auch danach, sie kurz zu machen. Aus diesem Grunde wird die 400-kV-Durchführung meist so plaziert, dass ihr unteres Ende möglichst nahe an den Anschlusspunkt in der Mitte der Oberspannungswicklung heranreicht. Wenn möglich versucht man auch die Verbindungen so zu halten, dass keine Kriechwege gegen die geerdeten Teile entstehen können. Wegen der hohen Ströme, welche grosse Kupferquerschnitte ergeben, ist eine neue Art der Verbindung mit den Durchführungen entwickelt worden. Statt als unhandliches Kabel durch die Klemme zu führen, endet die Verbindung in einem Steckkontakt im unteren Ende der Durchführung. Fig. 9 zeigt eine aufgeschnittene Steckbuchse, welche auch bei den hohen auftretenden Kurzschlußströmen noch einwand-

frei arbeitet, wie dies durch Kurzzeitstrom-Versuche von 3 s Dauer mit 30fachem Nennstrom nachgewiesen werden konnte. Solche Steckanschlüsse erlauben ein sehr einfaches Einsetzen bzw. Entfernen von grossen Durchführungen.

6. Die Spannungsregelung bei 400-kV-Transformatoren

Wie in Abschnitt 2 bereits erwähnt wurde, erhalten die Kuppel- bzw. die kombinierten Auf- und Kuppeltransformatoren häufig eine Spannungsregelung unter Last, und zwar auf der Unterspannungsseite. Die Gründe, weshalb die Regelung praktisch immer in einen separaten Transformator verlegt wird, sind zum Teil schon erörtert worden. Die wichtigsten Argumente gegen 400-kV-Transformatoren mit Spannungsregelung in einer einzigen Einheit sind die Transportgängigkeit und die Betriebssicherheit, wobei sich diese beiden Eigenschaften entgegenstehen. Die Transportgängigkeit verlangt möglichst kleine Dimensionen, was die Betriebssicherheit vermindert und umgekehrt. Eine Auf-

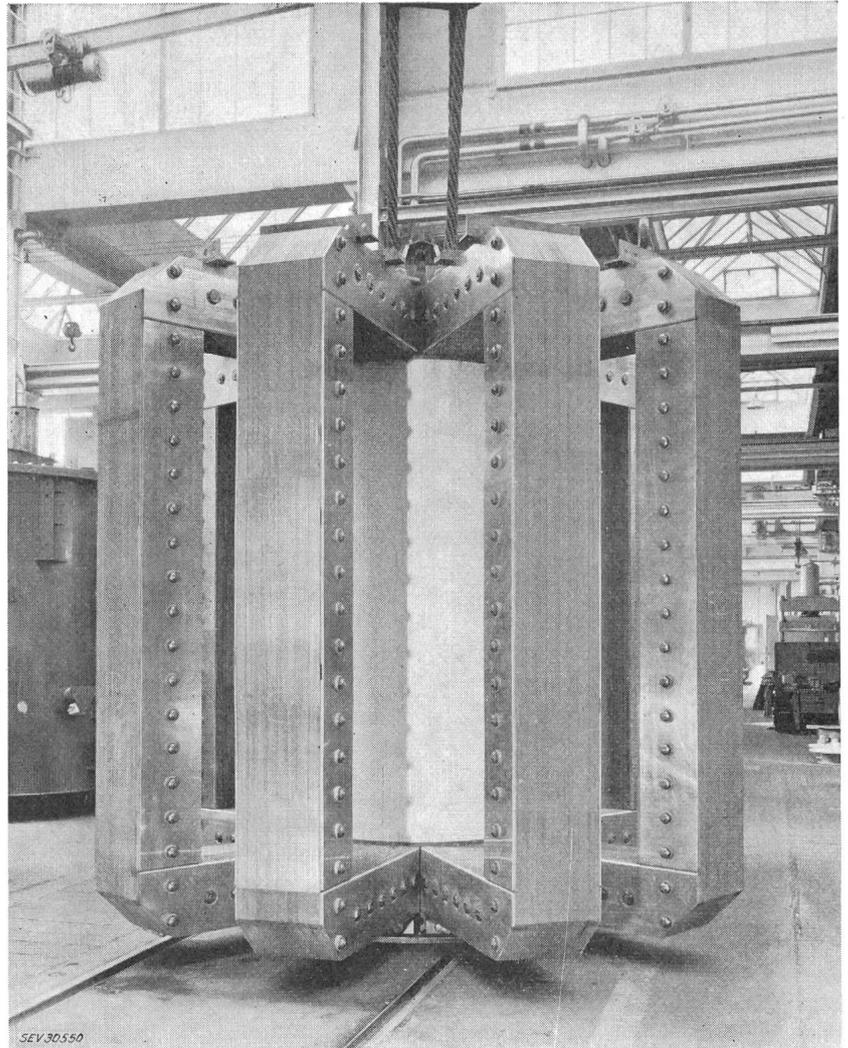


Fig. 7
Radial gebogener Eisenkern eines einphasigen Autotransformators (Typ Brown Boveri)

133 MVA, $\frac{490}{\sqrt{3}} / \frac{250}{\sqrt{3}}$ kV; die Kerngrösse entspricht einer Typenleistung von 100 000 kVA

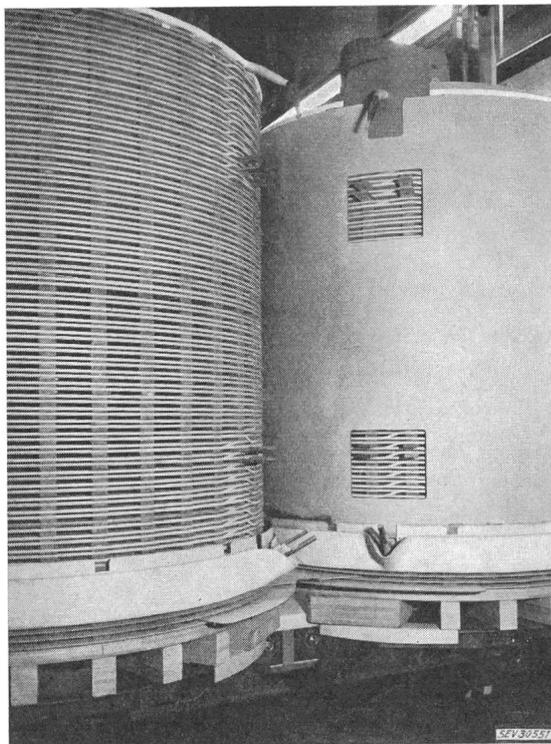


Fig. 8
400-kV-Wicklung mit Hochspannungseingang in der Säulenmitte Steuerung der Stoßspannungsverteilung durch Verschachtelung der Windungen

teilung in einen leistungsstarken Autotransformator und einen bedeutend kleineren Serie-Reguliertransformator, z. B. nach dem Schema in Fig. 10, ist daher allgemein üblich (sog. indirekte Regelung). Der Serie-transformator wird dabei von der ohnehin vorhandenen Tertiärwicklung des Autotransformators gespeist. Ein Vorteil dieser Anordnung liegt noch darin, dass die im Regeltransformator erzeugte positive oder negative Zusatzspannung in Phase oder phasenverschoben zur Unterspannung des Autotransformators addiert werden kann, je nachdem der Regeltransformator vom gleichphasigen oder von einem andersphasigen Autotransformator aus erregt wird (sog. Längs- bzw. Schrägregelung).

Es ist verständlich, dass eine aus zwei in getrennten Kesseln untergebrachten Teiltransformatoren bestehende Einheit einen etwas höheren Aufwand erfordert, als dies bei einem einzigen Auto-Regeltransformator der Fall wäre. Man erhält bei einer Spannungsübersetzung von 410/200...295 kV und 133 MVA einphasiger Durchgangsleistung ungefähr das folgende Verhältnis der totalen Typenleistungen:

- a) Auto- plus Regeltransformator 100 %
- b) Autotransformator mit direkter Regelung in Reversierschaltung 84 %
- c) Zweiwicklungs-Regeltransformator 133 %

Die etwas höhere Typenleistung bei der zweiteiligen Einheit a) ergibt gegenüber b) einen um etwa 8 % höheren Preis, was sich aber im Vergleich zu den

damit erkaufte Vorteile doch relativ bescheiden ausnimmt. Naturgemäss wirft ein Regeltransformator bezüglich Stoßspannungsfestigkeit noch weit grössere

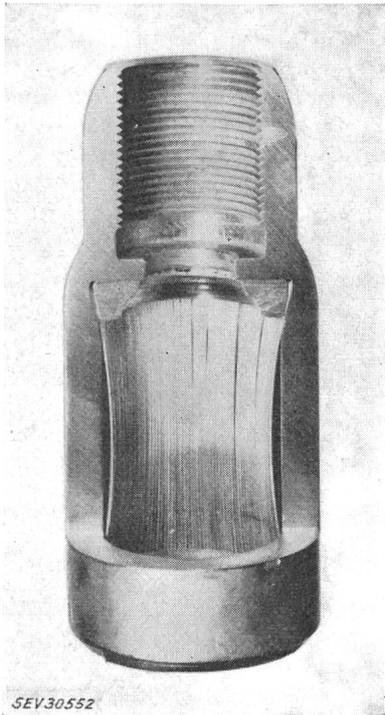


Fig. 9

Schnitt durch eine Federbuchse eines Steckkontaktes (Multi-Contact) für Hochspannungsdurchführungen mit grossen Strömen

Probleme auf als eine unregelmässige Einheit. Es muss dabei vor allem vermieden werden, dass an irgend einer Stelle der Regelwicklung bei beliebiger Stellung des Stufenschalters die Spannung auf wesentlich höhere Werte aufschwingt als der Nennisolationsspannung dieses Punktes entspricht [6]. In diesem Zusammenhang sind Anordnungen bekannt geworden [12], die Überspannungsableiter bzw. spannungsabhängige Widerstände zur Begrenzung der auftretenden Stoßspannungen verwenden. Solche Ableiter werden z. B. an beiden Enden der Regelwicklung gegen Erde sowie auch zwischen den beiden Enden dieser Wicklung angebracht. Ein Nachteil dieser Schutzvorrichtungen liegt darin, dass sie eine einwandfreie Stossprüfung der kombinierten Transformatoreinheit erschweren. Im übrigen erfüllen sie aber bei richtiger Dimensionierung sicher die ihnen gestellte Aufgabe.

Fig. 11

Einphasiger Autotransformator

$$\frac{410}{\sqrt{3}} / \frac{249}{\sqrt{3}} / 13 \text{ kV,}$$

für 133 MVA Durchgangsleistung aus einer indirekt geregelten Gruppe Vorn die 220-kV-Klemme und zwei Anschlussstützen für die Tertiärverbindungen

In konstruktiver Hinsicht stehen für die Kombination von Auto- und Regeltransformator zwei Wege offen. Sie können als selbstständige Einheiten sowohl

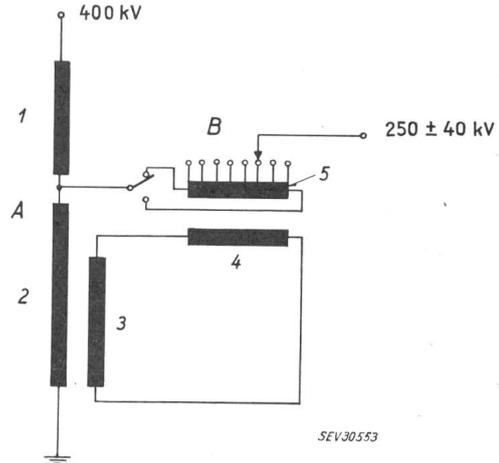
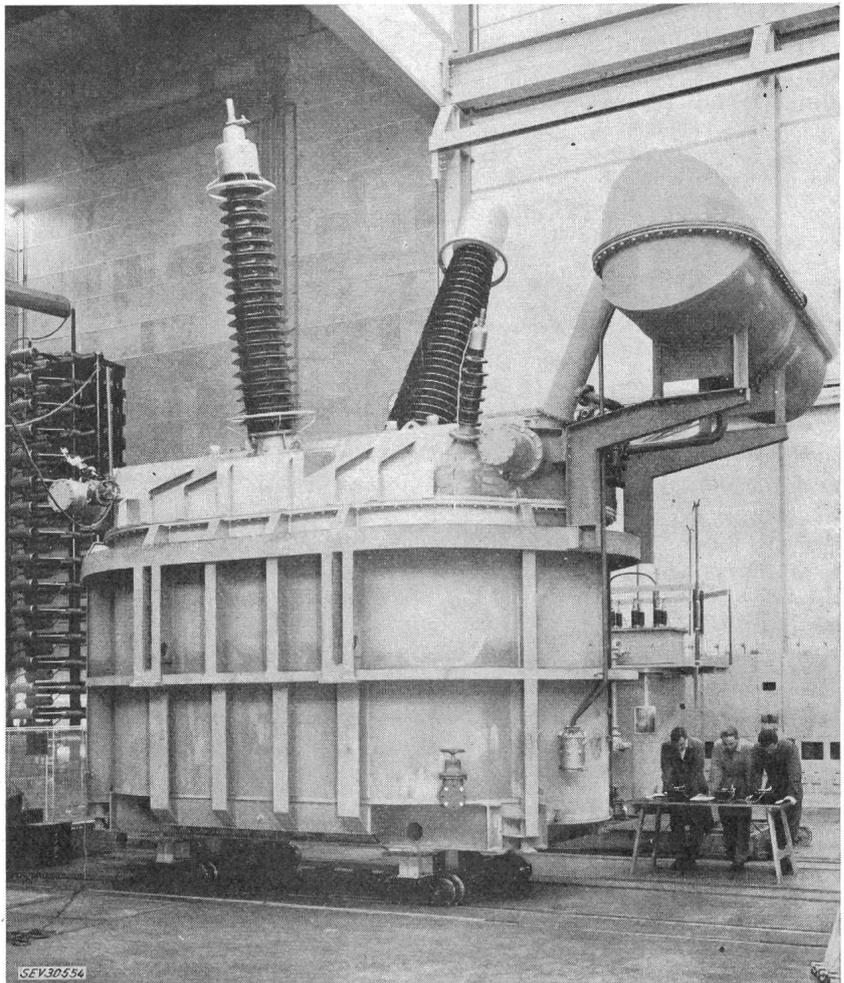


Fig. 10

Einphasiges Schaltungsschema einer Regeleinheit, bestehend aus Auto- (A) und Serietransformator (B)

1 Oberspannungswicklung des Autotransformators; 2 Unterspannungswicklung des Autotransformators; 3 Tertiärwicklung des Autotransformators; 4 Erregerwicklung des Serietransformators; 5 Regulierwicklung des Serietransformators

in einem gemeinsamen [12] als auch in getrennten Ölkesseln [5; 6] untergebracht werden. Im ersten Fall ist natürlich der Transport wieder erschwert, weshalb z. B. in der Schweiz der zweiten Lösung der Vorzug gegeben wurde. Um bei getrennten Kesseln die Anlage mög-



lichst einfach zu gestalten, stellt man die beiden Einheiten nach Möglichkeit nahe nebeneinander auf. Fig. 11 zeigt einen Autotransformator, der mit dem zugehörigen Regeltransformator auf der 220-kV-Seite über Durchführungen und auf der Tertiärspannungsseite über in ölgefüllten Rohren verlaufende Kupferschienen verbunden wird. Bei einer Ausführung von Brown Boveri (Fig. 12) verlaufen sogar alle elektrischen Verbindungen zwischen den beiden Teiltransformatoren in Öl.

Ein besonderes Kapitel im Zusammenhang mit den Regeltransformatoren bilden die Last-Stufenschalter für 220 kV. Es handelt sich hier um Spezialausführungen, wobei die Spannungsfestigkeiten der einzelnen Teile auf die Anforderungen der ganzen Regeltransformatorgruppe abgestimmt werden müssen. Wie aus dem Schema in Fig. 10 hervorgeht, treffen die vom 220-kV-Netz kommenden Überspannungen direkt auf den Stufenschalter auf. Wegen der grossen Leistungen sind diese Schalter natürlich auch für sehr hohe Ströme und Überströme auszulegen, was ziemlich voluminöse Apparate ergibt.

7. Transport und Aufstellung

Gewichte und Abmessungen für den Transport werfen bei diesen grossen 400-kV-Einheiten erhebliche Probleme auf. Man ist daher versucht, die Frage zu prüfen, ob solche Transformatoren ev. in zerlegtem Zustand versandt werden könnten, wie das ja bei kleineren Spannungen schon oft ausgeführt wurde. Aber

Fig. 12

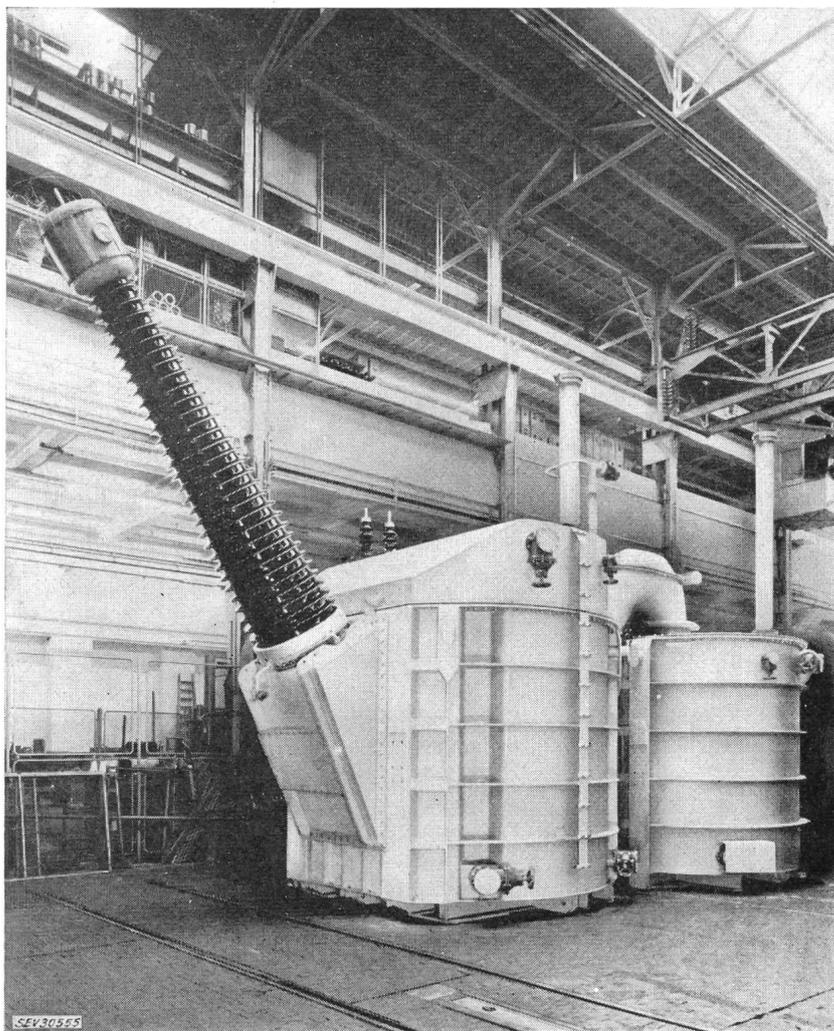
Kombinierte Einphaseneinheit
(Typ Brown Boveri)

bestehend aus Auto- und Serientransformator,
133 MVA Durchgangsleistung bei

$$\frac{429}{\sqrt{3}} \left/ \frac{250}{\sqrt{3}} \right. \begin{matrix} +17 \\ -15 \end{matrix} \times \frac{3,29}{\sqrt{3}} \left/ 10,5 \text{ kV} \right.$$

in dieser Beziehung liegen bei 400 kV die Dinge etwas anders. Von den beiden Möglichkeiten: a) im Werk prüfen — zerlegen — spedieren — zusammenbauen, bzw. b) montieren — zerlegen — spedieren — zusammenbauen — auf Platz prüfen, kann keine völlig befriedigende. Im Falle a) nehmen die bereits ölgetränkten Wicklungen und Isolationen während der Wiedermontage Feuchtigkeit auf, welche bekanntlich nur sehr schwer wieder zu entfernen ist, besonders mit den beschränkten am Montageort vorhandenen Trocknungsmöglichkeiten. Absolute Trockenheit ist bei 400 kV eine zwingende Voraussetzung für ein gutes Betriebsverhalten des Transformators. Der Fall b) weist diesen Nachteil nicht auf. Dafür ist hier eine Prüfung der dielektrischen Festigkeit praktisch unmöglich, da die grossen dazu benötigten Apparate, wie z. B. ein Stoss-generator, nicht transportabel sind. Diese Gründe haben bisher einen Transport von 400-kV-Einheiten in zerlegtem Zustand verhindert.

Natürlich wird man die Dislokation solcher Transformatoren dadurch erleichtern, dass man das Isolieröl separat mitschickt und statt dessen ein gut getrocknetes Gas in den Kessel einfüllt. Das oberste Ziel muss aber auch hier sein, nachträglich absolut keine Feuchtigkeit mehr in die ölprägnierten Wicklungen einzulassen. Durch das Ablassen des Öles wird wohl das Gewicht reduziert, die Dimensionen bleiben jedoch selbstverständlich dieselben. Diese müssen darum von allem Anfang an so gewählt werden, dass die auf Bahn



oder Strasse zugelassenen maximalen Abmessungen nicht überschritten werden. Damit diese Grenzmasse für den Transformator optimal ausgenutzt werden können, müssen auch die Transportunternehmen gewisse Konzessionen machen. Dies geschieht durch Bereitstellung entsprechender Transportwagen, Zulassung kleinerer Fahrdrahtabstände, Wegräumung von Hindernissen usw. Besonders kritisch sind Transporte auf Schmalspurbahnen. So war z. B. für die ersten schweizerischen 400-kV-Transformatoren im Kanton Graubünden ein Transportgewicht von nur wenig über 90 t zulässig und man arbeitete mit Abständen zwischen Schiene und Transformator von 10 cm (Fig. 13 a), bzw. Transformator und eingeschaltetem 10-kV-Fahrdraht von 5...10 cm (Fig. 13 b), wobei in diesen Fällen zur Sicherheit eine Isolierplatte oben auf dem Transformator zu befestigen war.

Die Aufstellung in der Station geht wie üblich vor sich, indem vorerst alle beim Transport entfernten

Details, wie Durchführungen, Konservator, Kühler usw. wieder montiert werden. Der heikelste Punkt ist das Wiedereinfüllen des Öles, das man am besten in speziellen Containern unter Vakuum an Ort gebracht hat. Das Einziehen in den Transformator sollte mittels einer transportablen Aufbereitungsanlage unter sehr gutem Vakuum geschehen, damit alle Isolationen vollständig gasfrei mit Öl imprägniert werden. Die restlichen

Arbeiten, insbesondere das Verbinden von Auto- und Regeltransformator, bieten dann wieder weniger Probleme. Zum Schutz solcher Einheiten werden im übrigen sowohl ober- wie unterspannungsseitig Überspannungsableiter aufgestellt.

8. Schlussbemerkungen

Auslegung und Bau von 400-kV-Transformatoren erfordern sehr eingehende Vorstudien und detaillierte Entwicklungsarbeiten. Die wichtigsten, grundlegenden Probleme sind schon seit einigen Jahren auch in der Schweiz gelöst, und unsere Grossindustrie ist in der Lage, absolut betriebssichere und allen Anforderungen gewachsene Höchstspannungs-Einheiten zu fabricieren. Dass die Entwicklung bei 400 kV nicht stehen bleibt, zeigen die amerikanischen und russischen Versuche bzw. Ausführungen mit Netzspannungen von 525...750 kV. In der Schweiz sind ebenfalls schon Ansätze für Studien in dieser Richtung vorhanden, wie z. B. [13] zeigt. Auch die Nennleistungen zeigen immer steigende Tendenz, so dass gerade dem Transportproblem weiterhin grösste Aufmerksamkeit geschenkt werden muss.

Um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen, konnten die vielen Einzelfragen nur relativ kurz behandelt werden. Dies war umso eher gerechtfertigt, als Spezialliteratur über dieses Gebiet bereits in grossem Masse zur Verfügung steht.

Literatur

- [1] *Itchner, M.*: Transformatoren für 380-kV-Übertragungsleitungen. Bull. SEV 44(1953)4, S. 145...151.
- [2] *Roser, H.*: Rationalisierungserfolge in der Elektrizitätswirtschaft. Bull. SEV 52(1961)15, S. 575...585.
- [3] «Savoisienne»: Groupe de transformation 225/400 kV pour l'équipement du réseau français d'interconnexion. Rév. gén. Electr. 66(1957)3, S. 152...158.
- [4] *Stenkvist, E.*: Voltage Testing of the First 380 kV Transformer. Asea J. 25(1952)4/5, S. 67...69.
- [5] *Edlinger, A.*: Autotransformatoren 400/220 kV. Brown Boveri Mitt. 47(1960)5/6, S. 292...305.
- [6] *Lutz, H. und B. Gloor*: Die 400-kV-Transformatoren für die Zentrale Tavanasa der Kraftwerke Vorderrhein A.-G. Bull. Oerlikon -(1961)345, S. 26...36.
- [7] *Casper, W.*: Die 380-kV-Transformatorengruppe des Umspannwerkes Hyvinkää (Finnland), BBC-Nachr. 42(1960)9, S. 455...473.
- [8] *Anonym*: First Phase of Project EHV Nears Completion. (General Electric). Electr. Wld. 154(1960)9, S. 74.
- [9] *Kalinitchenko, I. S.*: Transformatoren mit Spannungen von 330 bis 550 kV. Vestnik Elektropromyshlemosti 32(1961)3, S. 1...4. (= russ.).
- [10] *Brechna, H. und F. Wittgenstein*: Entwicklungen auf dem Gebiete der 400-kV-Transformatoren. Bull. Oerlikon -(1958)331, S. 146...156.
- [11] *Chadwick, A. T., F. M. Ferguson, D. H. Ryder und G. F. Stearn*: Nouveau type d'enroulement pour transformateurs, améliorant la répartition des tensions de choc. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 13. Session 1950, Bd. 2, Rapp. 107.
- [12] *Drabeck, J., R. Kuchler und K. Schlosser*: Die 380-kV-Transformatoren in Rommerskirchen und Hoheneck. ETZ-A 79(1958)7, S. 207...216.
- [13] *Goldstein, A. und W. Frey*: Höchstspannungs-Energieübertragung. Brown Boveri Mitt. 46(1959)4, S. 227...250.

Adresse des Autors:

Heinrich Lutz, Chef der Konstruktionsabteilung für Transformatoren, Maschinenfabrik Oerlikon, Zürich 50.

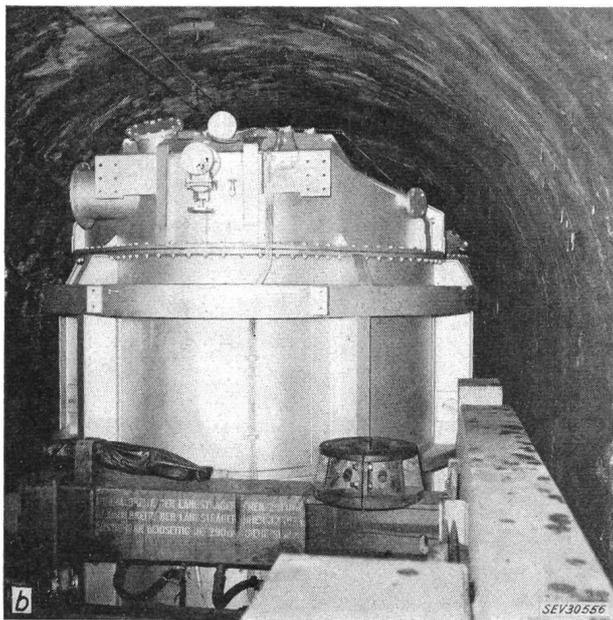
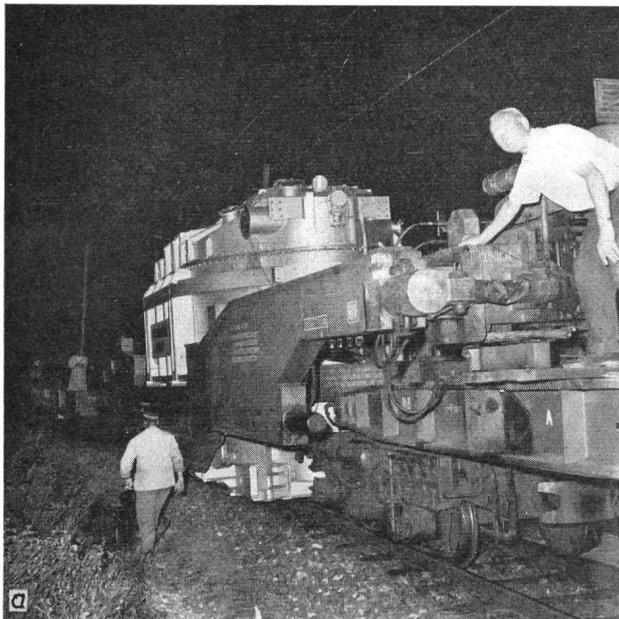


Fig. 13

Transport eines 400-kV-Autotransformators mit Spezialwagen auf der Rhätischen Bahn

Man beachte die sehr kleinen Schienen- und Fahrdrabt-Abstände
a Abstand zwischen Schiene und Transformator etwa 10 cm
b Abstand zwischen Transformator und Fahrdrabt 5...10 cm