

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: 72 (1981)

Heft: 5

Artikel: Die ersten hundert Jahre des Transformatorenbaus 1851-1951

Autor: Imhof, A.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-905085>

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: 30.01.2025

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

Die ersten hundert Jahre des Transformatorenbaus 1851–1951

Von A. Imhof

621.314.21(091);

Die Geschichte des Transformators in den hundert Jahren von etwa 1851–1951 wird geschildert, ausgehend vom «Induktionsapparat» als erstem Transformator. Für die Wechselstromtransformatoren werden einige besonders bedeutende Etappen der Konstruktion und der Werkstoffe dargestellt. Schliesslich finden die zahlreichen Transformatoren für Sonderzwecke Erwähnung.

Historique de l'évolution centenaire du transformateur, de 1851 à 1951, à partir de l'inducteur, premier des transformateurs. Description de quelques étapes particulièrement importantes de la construction et des matériaux de transformateurs à courant alternatif, puis mention des nombreux transformateurs pour applications spéciales.

1. Induktionsgesetz und Induktionsapparate

Dem Transformator liegt das 1831 von *Michael Faraday* [43] entdeckte Induktionsgesetz zugrunde. «Derselbe fand, dass das Nähern und Entfernen, das Entstehen und Vergehen, ja das Verstärken und Schwächen elektrischer Ströme und Magnete in einem benachbarten Leiter elektrische Ströme hervorruft oder induciert, und zwar Ströme von momentaner Dauer, in welchen demnach die Öffnungs- und Schliessungswirkung zusammenfallen und dadurch besonders starke Zuckungen und Funken hervorrufen.» Dies eine Belehrung aus dem Jahre 1873 [1], die sich dann auch über die Anwendungen solcher Erscheinungen äussert:

«Für die medicinische Anwendung der Zuckungen construierte *Dubois-Reymond* [43] 1848 seinen 'Schlittenapparat' (Fig. 1), dessen wesentlicher Bestandteil, der automatische Stromunterbrecher, der sog. *Neeffsche Hammer* (Fig. 2), schon 1838 von *Wagner* [43] in Frankfurt erfunden sein soll. *Sin-steden* ist es zuerst gelungen, durch Vermehrung der Drahtwindungen der Inductionsspirale und durch möglichst vollständige Isolierung derselben, Funkeninductoren, d. h. solche Inductionsapparate zu construiieren, welche Funken zu liefern imstande waren. Für eine ununterbrochene Funkenwirkung, für einen constanten stromstarken Funken erbaute *Rühmkorff* [43] 1851 den Funkeninductor, der von *Fizeau* 1853 durch Hinzufügung eines Kondensators verbessert wurde (Fig. 3). Unter dessen zahlreichen wissenschaftlichen und practischen

Anwendungen ist besonders die Erleuchtung der mit verdünnten Gasen erfüllten *Geisslerschen Röhren* [43] zu erwähnen, welche allein die Spectralanalyse der Gase ermöglichte.»

Über *Rühmkorff's* «Funkeninductor», bei welchem sich die unbewegliche sekundäre Spule coaxial über der primären Spule befindet, wird des weitern berichtet: «Zum Zwecke noch stärkerer Wirkung sind beide Drähte, der Hauptdraht und der Nebendraht, nach heutiger Sprache der primäre und der sekundäre Draht, wohl isoliert auf ein und dieselbe Spule gewunden, der Hauptdraht, der wegen der geringen Widerstandsfähigkeit des Hauptstromes aus wenigen hundert Metern von 2 mm dickem Kupferdraht besteht, zuerst auf die Spule, und auf dessen Windungen der Inductionsdraht, 1 bis 10 Meilen lang, aber nur $\frac{1}{4}$ mm dick, da der Inductionsstrom starke Widerstände überwinden kann. Werden nun durch die Messingknöpfe zwei Drahtspitzen gesteckt, so erhält man zwischen denen je nach der Stärke des Apparates ununterbrochen überspringende Funken von 2 bis 50 cm Länge, die beim Einschalten einer Leydenerflasche zwar kürzer, aber blendend hell und stark knallend werden und eine solche Stärke erreichen, dass sie dicke Glasplatten durchbohren und einen Ochsen tödten können. Als der französische Physiker *Quet* zufällig mit den Knöpfen in Berührung kam, wurde er zu Boden geworfen und würde wahrscheinlich das Leben verloren haben, wenn ihm nicht *Rühmkorff* zu Hilfe gekommen wäre.» [1; 2; 3; 4].

Eine der grössten und nützlichsten physikalischen Entdeckungen, diejenige der «unsichtbaren durchdringenden Strahlen» durch *Röntgen* [43] am 8. November 1895 im Physikalischen Institut der Universität Würzburg, erfolgte unter Verwendung eines *Rühmkorff*-Apparates für eine Funkenlänge von etwa 4...6 Zoll. *Rühmkorff's* Apparate waren noch bis etwa 1915 in Schaufenstern und Katalogen der Optikerläden zu sehen; sie waren ein sehr beliebtes Experimentierobjekt der reiferen Jugend. In vielen Oberrealschulen und Hochschulen gehörten grosse Ausführungen solcher Apparate zum wichtig-

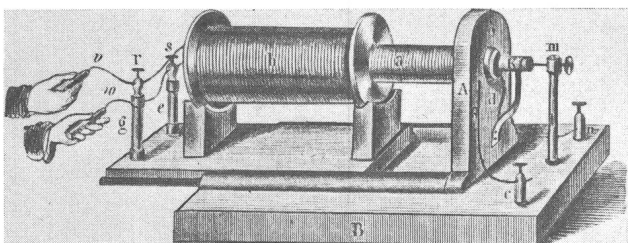


Fig. 1 Induktionsapparat, Ausführung als «Schlittenapparat» [1]

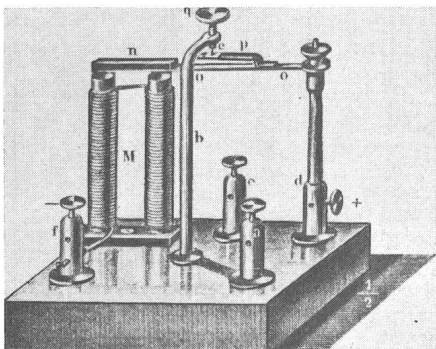


Fig. 2 Der Wagnersche Hammer [1]

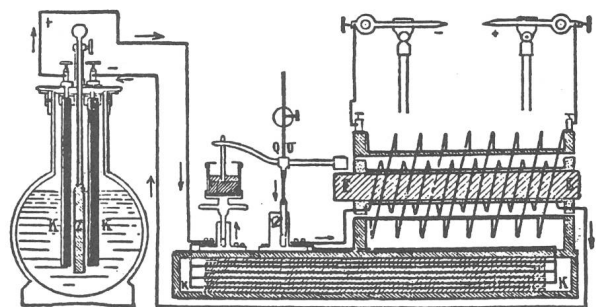


Fig. 3 Funkeninductor mit Quecksilberunterbrecher und Kondensator K [2]

sten Instrumentarium des Physikunterrichtes. Der Wagnersche Hammer und andere Unterbrecher aus jener Zeit, wie zum Beispiel der mittels einer Kurbel zu betätigende nach Figur 4, sind im Laufe der Zeit einigen wirkungsvolleren Unterbrechersystemen gewichen, u. a. dem Quecksilberstrahlunterbrecher, dem Turbinenunterbrecher (AEG), dem Wehnelt-Unterbrecher.

2. Erste Leistungstransformatoren

Die erste Verwendung des Induktionsprinzips in zwei elektrisch voneinander getrennten Wicklungen, deren eine mit Wechselstrom gespeist wird, benutzte den Vorteil der Spannungsübersetzung noch nicht oder nur in untergeordnetem Masse; vielmehr ging es bei diesen von *Gaulard* [43] und *Gibs* 1883 in Serieschaltung benutzten Transformatoren nur um die Möglichkeit der Teilung der Wechselstromleistung einer Dynamomaschine und deren Verteilung an verschiedene Konsumenten. Das war immerhin ein sehr wichtiger, in der Geschichte zuwenig gewürdigter Schritt. Als dann das Problem der Fernleitung elektrischer Wechselstromenergie auftrat und hierfür höhere Spannungen erzeugt werden sollten, war der Wagnersche Hammer nicht nötig, weil das Magnetfeld im Eisenkern der Spulen ohnehin pulsiert.

Der Vorteil des in sich geschlossenen «magnetischen Kreises» gegenüber dem offenen war durch die Entwicklung der Dynamomaschine bereits bekannt, als die ersten Leistungstransformatoren gebaut wurden. Dieser freilich bedeutsame Schritt erfolgte 1884 durch die Ingenieure *Déri* [43], *Blathy* und *Zipernowsky*. In jenem Jahre wurden in der Ausstellung in Turin die ersten Transformatoren gezeigt. Der Durchbruch des Wechselstromsystems erfolgte ab 1886, als in Montreux die Erstellung einer Wechselstromanlage beschlossen wurde. Die Transformatoren stammten von der Firma Ganz & Co., Budapest. Brown Boveri lieferte schon 1891 kleine Lufttransformatoren, 1903 aber bereits Öltransformatoren mit Wasserkühlung.

Von sehr grossem Einfluss auf den Transformatorenbau war die Erfindung des Drehstromsystems. *N. Tesla* [43] hat

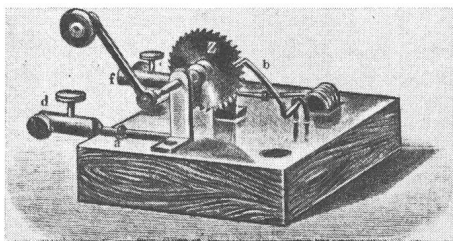


Fig. 4 Zahnradunterbrecher für Induktionsapparate [2]

Fig. 5 Einphasen-Luft-Transformator aus der Zeit um 1900
Berliner Maschinenbau-Aktien-Gesellschaft
vormals L. Schwartzkopf [17]

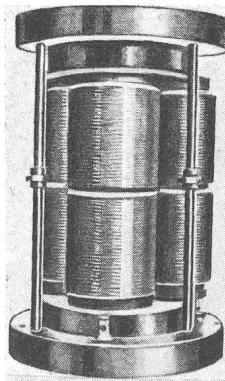
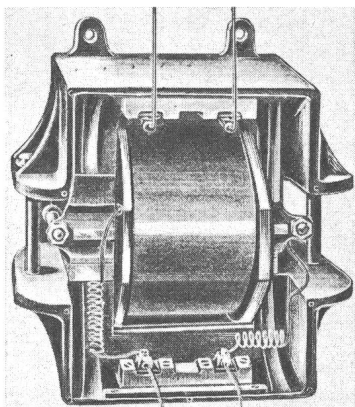


Fig. 6 Drehstrom-Lufttransformator mit Ringjoch aus der Zeit um 1900 (BBC) [16]

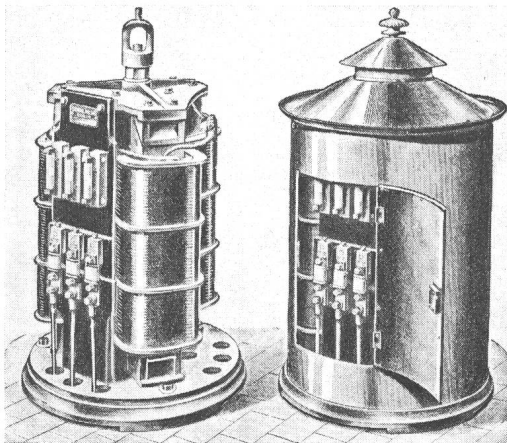


Fig. 7 Drehstrom-Lufttransformator mit Sternjoch, links mit abmontiertem Blechgehäuse. Um 1905, Siemens & Halske [17]

schon 1887 ein grundlegendes Patent hierfür angemeldet [5; 6; 7]. Die Westinghouse Company erwarb seine diesbezüglichen Rechte. *Heinke* und *Ebert* [5] nennen als Begründer des Drehstromes *G. Ferraris* [43], unter Hinweis auf dessen berühmte Abhandlung «Rotazioni elettrodinamichi prodotte per mezzo di correnti alternate», Torino 1888. Der weitere Ausbau dieser elektrophysikalischen Grundlagen erfolgte durch *Tesla*, *Dolivo-Dobrowolsky* [43] und andere. Die erste Vorführung des Drehstromsystems fand an der Internationalen Elektrotechnischen Ausstellung in Frankfurt a. M. 1891 statt.

Der Name *Tesla* ging jedoch besonders durch dessen etwa 1890 erfolgte Erfindung des eisenlosen Hochspannungstransformators für hohe Frequenzen in die Geschichte ein [6; 7].

3. Schwerpunkte der weiteren Entwicklung [6; 8...15]

Da die Transformatoren ermöglichen, die mit den Dynamomaschinen erzeugte elektrische Energie auf grössere Distanzen zu übertragen, erwuchs ihre Technik sehr rasch zu höchster Bedeutung. Bald befassten sich zahlreiche Firmen des Elektromaschinenbaues mit ihnen, wodurch die praktische Durchentwicklung in mannigfacher Weise erfolgte. Eine klare und auskunftreiche, von hoher Fachkenntnis geprägte Darstellung, die mit dem Jahre 1891 beginnt, also wenige Jahre nach der grundlegenden Erfindung, ist der von *J. Kübler* am Ende seiner lebenslangen Tätigkeit verfasste Aufsatz [16]. Als Chef der Transformatorenabteilung der Firma BBC war es *Kübler* gegeben, die zahlreichen nach und nach erfolgten Entwicklungen in trefflicher Weise darzustellen. Ein Lehrbuch, das gute Informationen über die «Jugendzeit» des Transformatorenbaues, etwa bis 1906, gibt, ist dasjenige von *G. Kapp* [17]. Aus

diesen beiden Darstellungen ist ein beträchtlicher Teil der nachfolgenden technischen Angaben und der Bilder entnommen.

Die Entwicklungsschritte im Bau der Transformatoren sind so zahlreich, dass hier eine Auswahl der wichtigsten getroffen werden muss.

3.1 Leistung und Oberspannung

Die Grösse der Transformatorleistungen und die Höhe der Oberspannung nahmen, entsprechend der Leistung der an Zahl und Grösse rasch wachsenden Kraftwerke, ständig zu. In den Jahren um 1905 lagen die Leistungen in der Grössenordnung von 10 bis etwa 300 kW; um 1910 gab es Drehstromtransformatoren von 20000 bis 30000 kW, 1940 solche bis etwa 150000 kW. Die Oberspannungen wuchsen ebenfalls ständig: 1902 bis 30 kV, 1903 bis 40 kV, 1910 bis 90 kV, 1928 bis 220 kV. Einige weitere Zahlen, unter Angabe der Kraftwerke, sind in den Tabellen I...III enthalten. Das Transportproblem zwang manchmal zur Aufteilung der Leistung.

3.2 Feste Isolation

Die hohen Spannungen verlangten entsprechende Entwicklungen der Isolation. Ein erster Schritt bestand darin, den Abstand zwischen Ober- und Unterspannungswicklungen und gegen den Eisenkern zu vergrössern und den gut isolierten Endschutzring einzuführen (Fig. 8). Dieser ist 1911 durch die Hochspannungsgesellschaft Frankfurt patentiert und von der AEG angewandt worden; BBC konnte jedoch mit Erfolg die Vorbenutzung geltend machen [16].

Am Anfang wurden die Hülsen, welche die Isolierung zwischen Ober- und Unterspannung bilden, aus ziemlich dickem Papier hergestellt, das auf der Drehbank auf einen Dorn gewickelt wurde und dessen Lagen mit Tischlerleim verklebt wurden. Etwa 1904 begann die Zeit des Hartpapiers [18; 20]. Auf von *Emil Haefely* erstmals gebauten Maschinen wurde mit Schellack bestrichenes Papier durch heisse Walzen während des Aufwickelns Lage auf Lage gepresst, so dass harte, aber wenig hitzebeständige Isolierzylinder entstanden. Ab etwa 1910 trat anstelle des Schellacks das ölfeste und hitzebeständigere Kunstharz Bakelit, wonach es freilich vieler Jahre bedurfte, bis man der Tücken desselben vollständig Meister geworden war. Die Fertigung solcher Hülsen und Rohre wurde von

Spezialfirmen der Isolationstechnik vorgenommen; in der Schweiz waren es die Firmen Emil Haefely, Micafil und Isola-Werke Breitenbach.

Andere übliche Bauarten von Hochspannungstransformatoren verwendeten Preßspan hoher Qualität, u. a. sog. Transformerboard, zur Isolation zwischen Ober- und Unterspannungswicklung und gegen den Eisenkern [20; 41]. Etwa von 1940 bis 1950, da und dort auch früher oder später, schenkte der Transformatorbau der «Kabelisolation», das heisst dem aufgewickelten und dann unter Vakuum gut getrockneten, öl-impregnierten Kraftpapier, grosse Aufmerksamkeit, denn diese Isolation ist nicht nur von höchster elektrischer Festigkeit, sondern auch mannigfach anwendbar. Im Höchstspannungsmesswandlerbau und Prüftransformatorenbau wurde sie geradezu zur unentbehrlichen, wesentlichsten Isolationsart. Die in den ersten Jahrzehnten des Transformatorbaues reichlich verwendeten Lactuchbandagen (bei einzelnen Firmen bis etwa 1950) verloren auf diesem Gebiet ihre Bedeutung weitgehend.

Die Erkenntnis, dass im Öl quer zu den elektrischen Kraftlinien angeordnete Isolierschichten die Durchbruchfestigkeit erhöhen, führte für die Enden der Wicklungen zur Anwendung von Winkelringen aus Hartpapier oder aus Preßspan (Fig. 9d).

Typische technische Daten von Transformatoren von 1923 bis 1942 [40]

Tabelle I

| | 1923 | 1930 | 1942 |
|--------------------------|------------|------------|------------|
| Leistung bis ca. ... kVA | 30 000 | 60 000 | 60 000 |
| Eisenkörper | 5 Schenkel | 3 Schenkel | 3 Schenkel |
| Schenkel- | | | |
| durchmesser | mm 840 | 770 | 650 |
| Schenkellänge L | mm 2 200 | 1 550 | 1 650 |
| Mittenabstand M | mm 1 700 | 1 400 | 1 400 |
| Induktion B_{max} | T 1,3 | 1,35 | 1,4 |
| Legiertes Blech | t 39,4 | 31,5 | 25,0 |
| Kupfergewicht | t 6,7 | 8,65 | 9,6 |
| Eisenverluste | kW 115 | 140 | 70 |
| Wicklungsverluste | kW 200 | 390 | 370 |
| ϵ_k -% | 8 | 8 | 11,5 |
| Gesamtgewicht mit Öl | t 119 | 116 | 89 |

Entwicklung des Wirkungsgrades von Transformatoren [12]

Tabelle II

| Jahr der Erstellung | Werk | Leistung kVA | Verluste in % bei $\cos \varphi = 1$ und Vollast | | | Wirkungsgrad bei $\cos \varphi = 1$ | |
|-------------------------------|--------------|--------------------|--|--------------------|-------|-------------------------------------|--------|
| | | | Eisen | Kupfer | Total | Vollast | ¼ Last |
| Auftransformatoren | | | | | | | |
| 1905 | Obermatt | 700 ¹⁾ | | | 2 | 98 | 97 |
| 1906 | Campocologno | 1250 ¹⁾ | | | 2,5 | 97,5 | 96,5 |
| 1908 | Löntschi | 4600 | | | 1,4 | 98,6 | 97,8 |
| | Löntschi | 5250 | | | 1,1 | 98,9 | 98,8 |
| 1910 | Arniberg | 2700 | 0,67 | 0,90 | 1,6 | 98,4 | 98,0 |
| 1910 | Albula | 2450 | 1,0 | 0,7 | 1,7 | 98,3 | 97,7 |
| 1914/17 | Gösigen | 7050 | 0,53 ²⁾ | 0,73 ³⁾ | 1,4 | 98,6 | |
| 1914/20 | Eglisau | 5150 | 0,57 | 1,05 | 1,6 | 98,4 | |
| Verteiltransformatoren | | | | | | | |
| 1900 | | 170 | 1,35 | 1,18 | 2,53 | 97,4 | 94,6 |
| 1908 | | 170 | 1,06 | 1,41 | 2,47 | 97,5 | 95,6 |
| 1915 | | 170 | 0,65 | 1,95 | 2,6 | 97,4 | 97,0 |

¹⁾ einphasig ²⁾ bei Leerlauf ³⁾ bei Vollast

Damit war eine beträchtliche Reduktion des Gesamtgewichtes von Grosstransformatoren möglich. Eine weitere Reduktion der Abmessungen ermöglichte der sog. Spreizflansch von Meyerhans (BBC), Figur 9e [16]. Die Enden der aus Papier gewickelten Hülsen werden direkt zu einem mit Distanzierungen gespreizten Flansch umgebogen. Mit der dadurch gewonnenen Reduktion des Streukanals konnte der Querschnitt des aktiven Eisens erheblich vermindert werden. Zusammen mit andern konstruktiven Verbesserungen ergaben sich wiederum

starke Gewichtsverminderungen, zum Beispiel für Drehstromtransformatoren 50 Hz mit Öl:

1926: 25000 kVA 8/150 kV 50 Hz 87 t
 1928: 24000 kVA 26/158 kV 44 Hz 74 t
 1940: 30000 kVA 150/50 kV 50 Hz 64 t

Eine Lösung zur Erhöhung der Stossfestigkeit von Transformatoren der English Electric Co Ltd beruht auf einer teilweise starken Erhöhung der Seri kapazität zwischen den Eingangsspulen, erreicht durch Ineinanderschachteln von Windungen [22].

Mit den immer höher steigenden Spannungen wurden die Durchführungen der Transformatoren zu einem wichtigen Problem [23]. Anfänglich fertigten die Transformatorenfabriken ihre Durchführungen noch selber; mit fortschreitender Erhöhung der Anforderungen wurden diese ein Gebiet für Spezialfabriken. Für Nennspannungen über etwa 80 kV kamen bald nur noch Kondensatordurchführungen, die sich durch schlanke Bauart und hohe Betriebssicherheit auszeichnen, in Betracht [24].

Als man sich, zunehmend in den Jahren um 1920, entschloss, Schaltanlagen ins Freie zu bauen, wurden an den Transformatoren mehrere Verbesserungen vollzogen: Die Durchführungen wurden, anstatt der anfänglich durchwegs seitlichen Anordnung, nun in den Kastendeckel eingebaut. Die früher zur Ablesung der Temperaturen nötige Anbringung von Leitern und Plattformen erübrigte sich durch den Einbau von Thermoelementen mit Temperaturfernmeldung. Auch die Ölstandskontrolle geschah nun mittels Fernablesung.

3.3 Flüssige Isoliermittel

George Westinghouse erhielt im Jahre 1887 ein US-Patent auf die Verwendung von Öl in Transformatoren. Diese Erfindung hatte einen tiefgreifenden Einfluss auf die Entwicklung grosser Leistungstransformatoren.

Turner und Hobart widmeten in [25] im Jahr 1906 dem Öl für Transformatoren, Schalter und Anlasser erheblichen Raum. Die ersten Öluntersuchungen (1892) hinsichtlich der Elektrotechnik rühren von Steinmetz [25, 43] her, sie betreffen gekochtes Leinöl, Terpentinöl und rohes Schmieröl (Mineralöl). Untersuchungen von Hughes [43] 1892 veranlassten ihn zu der Weisung: «Bei der Auswahl von Öl mit hoher Isolierfähigkeit muss man den Zweck, zu dem es angewendet wird, berücksichtigen».

Beispiele zur Entwicklung der Energieübertragungsspannung bzw. Oberspannung der Transformatoren [12; 33]

Tabelle III

| Jahr | Spannung kV | Ort; Land |
|-------------|--|---|
| 1886 | 2 | EW Reichenhall |
| 1890 | 2, 2,5, 3,2 | EW Deptford |
| 1891 | 2, 15, 40 | EW Köln |
| 1892 | 12, 40 | Int. El.-Ausstellung Frankfurt |
| 1895 | 10 | USA |
| 1896 | 16,5 | |
| 1898 | 8, 50-60 | |
| 1899 | 60 | |
| 1900 | 10,1 | USA |
| 1907 | 45 | |
| 1911 | 16 | |
| 1912 | 100 | |
| 1913 | 150 | |
| 1917 | 100 | |
| 1923 | 66 | KW Amsteg und Ritom |
| 1924 | 130 | |
| 1925 | 220/380 | |
| 1926 | 132, 66; 150 | KW Vernayaz, KW Mühleberg |
| 1928 | 100 | England |
| 1930 | 220/380 | |
| 1952 | 400 | Schweden |
| 1965 | 420 | |
| 1965 | 735 | Quebec Hydro Electr. Comm. |
| 1954 | 400 | Dreiergruppe von Einphasentransformatoren |
| Von 1965 an | Leistungen pro Transformator bis 10 ⁶ kVA | 43 500 kVA |

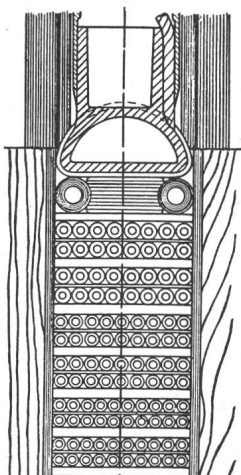


Fig. 8 Wicklung mit Endschutzring und gegen den Rand abnehmendem Spannungsgradient [16]

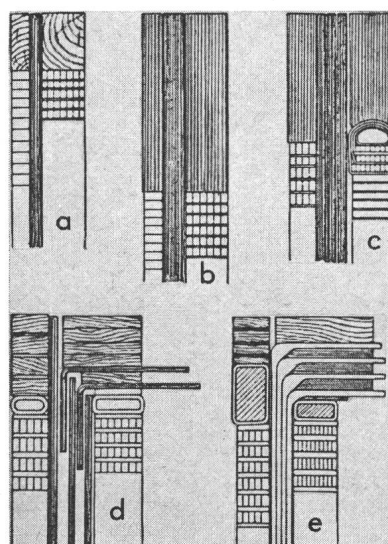


Fig. 9 Enddistanzkonstruktionen [16]

- a Ursprüngliche Ausführung
- b Unbefriedigende Ausführung für höhere Spannungen
- c Verbesserte Enddistanz-isolation für höhere Spannungen
- d Winkelringkonstruktion
- e Spreizflanschkonstruktion

sichtigen. So ist für Kondensatoren, Transformatoren und eng gewickelte Spulen ein dünnes Harzöl, wie Harzspiritus, das geeignetste; für Kabel, namentlich Erdkabel, ist reines Harzöl das beste, da es besser isoliert und nicht so schnell entweicht. Harzöl ist immer dick und zäh, kann dies aber, falls nötig, in noch höherem Masse werden durch Zusatz von festem Harz oder Palmölrückständen.»

In dem genannten Buch [25] wird dann für die Zeit um 1905 vermerkt: «Für Transformatoren wird viel ein Mineralöl, sog. 'Transil-Öl' mit grossem Erfolg angewendet. Es hat sich herausgestellt, dass die Destillate der Kohle viel weniger Schwierigkeiten machen als die vegetativen Öle.» Dies war eine für die Entwicklung der Transformatoren sehr wichtige Erkenntnis. Mehrere Weisungen aus dem Jahre 1904 von *Skinner* sind der Untersuchung von flüssigen Isoliermaterialien gewidmet, so ein achtseitiges Kapitel, in welchem u. a. auf eine Abhandlung vom Mai 1904 im «The Electric Club Journal» hingewiesen wird. Welch grosses Interesse in den dreissig folgenden Jahren den Problemen des flüssigen Dielektrikums geschenkt worden ist, zeigt das Buch «Das flüssige Dielektrikum» von *A. Nikuradse* vom Jahre 1934 [26].

Der Ölüberwachung im Betrieb der Transformatoren wurde mit den Jahren steigende Bedeutung geschenkt: Über den Einfluss des Wassers im Öl war man sich in den Jahren gegen 1920 bereits durch zahlreiche Forschungsarbeiten bewusst. Eine dauernde Kontrolle auf Feuchtigkeit wurde empfohlen; üblich waren die Durchschlagsprobe und die Siedeprobe. Die Prüfung des Öls war zu jener Zeit schon sehr entwickelt; es gab hiefür eingehende Vorschriften, z. B. die VDE-Vorschriften für Transformatoren- und Schalteröle (ETZ Bd. 44, 1923 und 1924) und das «Cahier de Charge pour la fourniture des huiles de transformateurs». *F. Tobler*, der damalige Chef der SEV-Prüfanstalten, schrieb im Bull. SEV 1924 eine Abhandlung über die Behandlung des Isolieröles vor dem Einfüllen in Schalter und Transformatoren und die periodische Revision der Öle im Betriebe [42]. Der SEV befasste sich eingehend mit Normalien zur Prüfung und Bewertung von Mineralölen für Transformatoren und Schalter (z. B. Bull. SEV 1925, S. 188, 241, 475). Über die dielektrische Festigkeit des Öles gab es schon früh eine erhebliche Zahl umfangreicher Forschungsarbeiten.

Der Ölaufbereitung wurde seit etwa 1915 grosse Aufmerksamkeit geschenkt. Besondere Apparate sind hiefür entwickelt worden, unter ihnen die «Laval-Ölzentrifuge» und Filterpressen zur mechanischen Reinigung.

Hier ist auch der seit etwa 1927 sehr viel angewandte «Buchholz-Schutzapparat» zu erwähnen, der beginnende Schäden meldet, bei welchen sich Gas bildet, sei es durch Eisenbrand, Windungschluss, Überschlag oder Durchschlag, ferner Druckwellen infolge plötzlicher starker Gasbildung, Lufttritt in den Kessel sowie Absinken des Ölspiegels.

Auch *Kübler* äussert sich [16] ausführlich zur Verwendung von Öl: «Das anfänglich verwendete Harzöl war viel zu dickflüssig, um gut zu kühlen. Der dünnflüssige Teil verdunstete nach und nach, und was zurückblieb, war eine dickflüssige Masse. 1906 tauchte das dünnflüssige Mineralöl auf, das aber zuerst schwere Störungen verursachte, denn es griff Isolierteile, Papier und Baumwolle an, setzte an Kastenwänden und am Transformator derart Depots an, dass fast jede Kühlung aufhörte. Bald zeigte sich, dass der Luftsauerstoff die Ursache der Zersetzung war. So entstand zur Kontrolle in Deutschland die

«Schlammprobe» und in England der «Sludge test». Der Krieg von 1914–1918 machte dann allerdings alle gewonnenen Erfolge zunichte, so dass man nach 1920 neu anfangen musste.» Noch 1925 fand das Thema «Mineralöl» in Fachkreisen grosse Beachtung.

Beginnend schon 1917, ist die erste chlorierte organische Flüssigkeit als Ölersatz auf dem Markt erschienen. Sie erwies sich aber noch als ganz unbrauchbar, da sie sich in der Wärme zersetzte [11]. Für «unbrennbare» Transformatoren haben sich etwas später etliche künstliche Isolierflüssigkeiten als brauchbar erwiesen. Sie erfuhren besonders in den USA Beachtung und wurden mit Erfolg auch für Kondensatoren verwendet [20; 21; 23]. Die Verwendung für Transformatoren blieb aber bescheiden.

Der Ölkonservator, für Transformatoren auch Expansionsgefäss genannt, ist mit der Absicht der Verhütung von Kondenswasser entstanden; erst viel später lernte man auch seine wichtigere Eigenschaft der Verminderung der Ölzerersetzung kennen. Er gehört zu den bedeutenden Fortschritten im Transformatorbau.

3.4 Gasförmige Isoliermittel

An Stelle von Öl haben sich für Sonderzwecke, vor allem für Messwandler, auch Druckgase eingeführt, so vor allem Luft oder Stickstoff unter Druck. Um 1940 wurden von BBC Spannungswandler bis 60 kV mit Stickstoffisolation hergestellt. Von 1958 an wird in den USA, auf Vorschlag von *G. Camilli*, auch für Leistungstransformatoren das Schwefelhexafluoridgas SF₆ unter mässigem Überdruck verwendet [20]. Für Grosstransformatoren kam die Druckgasisolation nicht in Frage; hingegen revolutionierte sie einige Jahre später den Schalter- und den Schaltanlagebau [21; 23; 27].

3.5 Eisenkern

Der Eisenkern der Transformatoren (Fig. 10, 11) war für dessen Entwicklung von sehr erheblichem Einfluss. Schon 1889, also in den ersten Jahren des industriellen Transformatorbaues, untersuchte *J. Hopkinson* [43] den Einfluss verschieden grosser Beimengungen von Nickel auf das magnetische Verhalten der Eisen-Nickel-Legierungen. Gemeinsamen Arbeiten der Hysteresis-Kommission des VDE, der Physikalisch-technischen Reichsanstalt und einiger deutscher Hüttenwerke gelang es etwa um 1905, ein legiertes Blech mit 3,45% Si und 0,38% Mn herzustellen, welches zwar in mechanischer Beziehung minderwertig war, in magnetischer Beziehung aber weit besser als das damals übliche Dynamoblech [28]; es wurde im

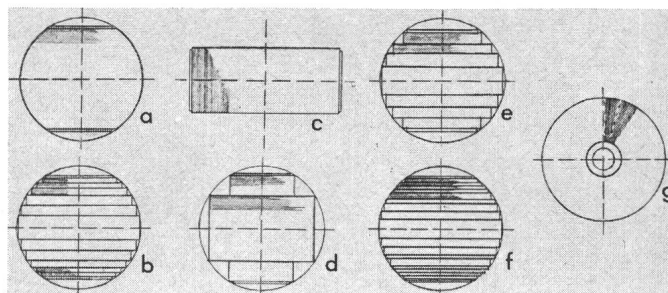


Fig. 10 Die Entwicklung des Kernquerschnittes [16]

- a Überdrehter runder Kern
- b Feingestufteter runder Kern
- c Rechteckkern
- d Kreuzkern
- e Feingestufteter runder Kern
- f Besonders feingestufteter runder Kern
- g Radialkern

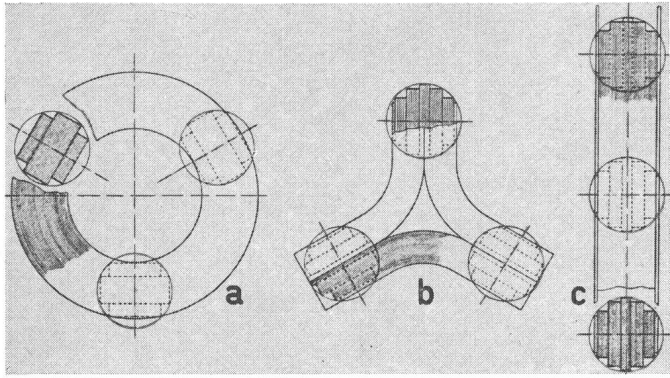


Fig. 11 Jochsysteme [16]
a Ringjoch b Sternjoch c Gerades Joch

Transformatorbau mit grossem Vorteil angewandt. Es hatte ungefähr die Hälfte der Wirbelstromverluste und zwei Drittel der Hysterisisverluste des gewöhnlichen Dynamobleches. Seine Permeabilität betrug etwa 80 % von jener des Dynamobleches. In bezug auf das Altern, d.h. die Vergrösserung der Verluste infolge monate- oder jahrelanger Erwärmung, war es nicht besser und nicht schlechter als das bisher verwendete gute Blech. Die Ursache des Alterns war um 1905 noch nicht erforscht, die Grösse der Verluste überstieg aber selten 15 % [17]. Es folgten mehrere weitere Studien zur Verbesserung der Bleche, so 1912 durch *Burgess* und *Aston*, 1911 durch *Hopkinson* und *Hadfield*, 1913 durch *Yensen*. 1920 berichtete *Yensen* über die ausgezeichneten Ergebnisse einer Legierung, die er *Hypernik* nannte. In den Laboratorien der American Telegraph & Telephon Co. wurde eine mit *Permalloy* bezeichnete Legierung entwickelt, die sich durch hohe Permeabilität in schwachen Feldern und durch kleine Ummagnetisierungsverluste auszeichnet [29]. Die Forschung zur Verbesserung der Bleche brachte nach und nach weitere Erfolge, besonders seitens amerikanischer Firmen. Im Zweiten Weltkrieg stritten sich die Transformatorfabriken um das zur Mangelware gewordene «Trancorblech». Einige Jahre später kamen die kornorientierten Elektrobleche auf den Markt.

Die Reduktion des Eisengewichtes und der Bauhöhe und die Aufteilung sehr grosser Dreiphasenleistungen auf drei Einphasentransformatoren machte es möglich, die Transportfrage zu lösen. Eine erste solche Gruppe mit einer Gesamtleistung von 42000 kVA wurde 1946 bei einer schweizerischen Elektrizitätsgesellschaft in Betrieb gesetzt.

Die Querschnitte des Eisenkerns erfuhren nach und nach zahlreiche Variationen. Viel angewandte Beispiele zeigen die

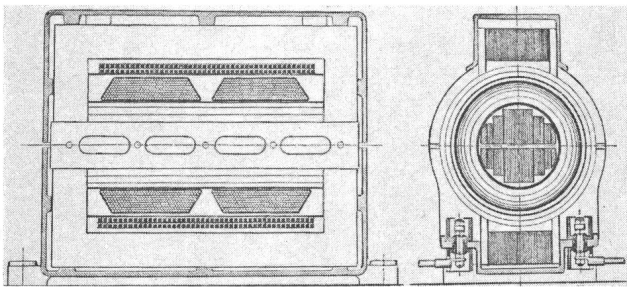


Fig. 12 Einphasen-Lufttransformator für 20 kV/220 V mit horizontalem Mantelkern, der auf angenäherte Kreisform gestuft ist

Oberspannungswicklung innen, Unterspannungswicklung aussen. Schutzgehäuse. Um 1905 (MFO) [17]

Figuren 10 und 11. Ein Ausführungsbeispiel ist in Figur 12 enthalten. Figur 10g zeigt die radialgeblechte Säule (*Meyers* 1930) mit ringsherum angebrachten Rückschlussjochen, wie sie um 1945 vorzugsweise für einsäulige Transformatoren, zum Beispiel Lokomotivtransformatoren, ausgeführt wurde. Die radialgeblechte Säule ragt oben und unten in eine Jochscheibe hinein, die den magnetischen Fluss zu den ausserhalb der Wicklungen ringsherum angebrachten Jochen leitet [30].

Im Gebiet der Messwandler und der Prüftransformatoren für sehr hohe Spannungen ist man, etwa von 1930 an, mehrmals vom geschlossenen Eisenkern abgewichen und auf den offenen, stabförmigen Kern runden Querschnittes zurückgekehrt, wie er einst für die Induktionsapparate und den Röhrenkorff-Apparat verwendet wurde. Dies geschah im Interesse der leichteren Beherrschung des Isolationsproblems zwischen Wicklung und Eisenkern. Das historisch wahrscheinlich älteste Beispiel ist der Durchführungs-Spannungswandler und kombinierte Strom-Spannungs-Wandler mit Ring-Sekundärkern von *A. Imhof* [27]. Ein viel neueres und grösseres Beispiel (Fig. 13) ist der SEV-Prüftransformator 1200 kV [31].

3.6 Kühlung

Mit wachsender Leistung der Transformatoren erforderte das Kühlproblem grosse Aufmerksamkeit, dies trotz der hohen Wirkungsgrade. Für kleine Leistungen waren bei ölfreien

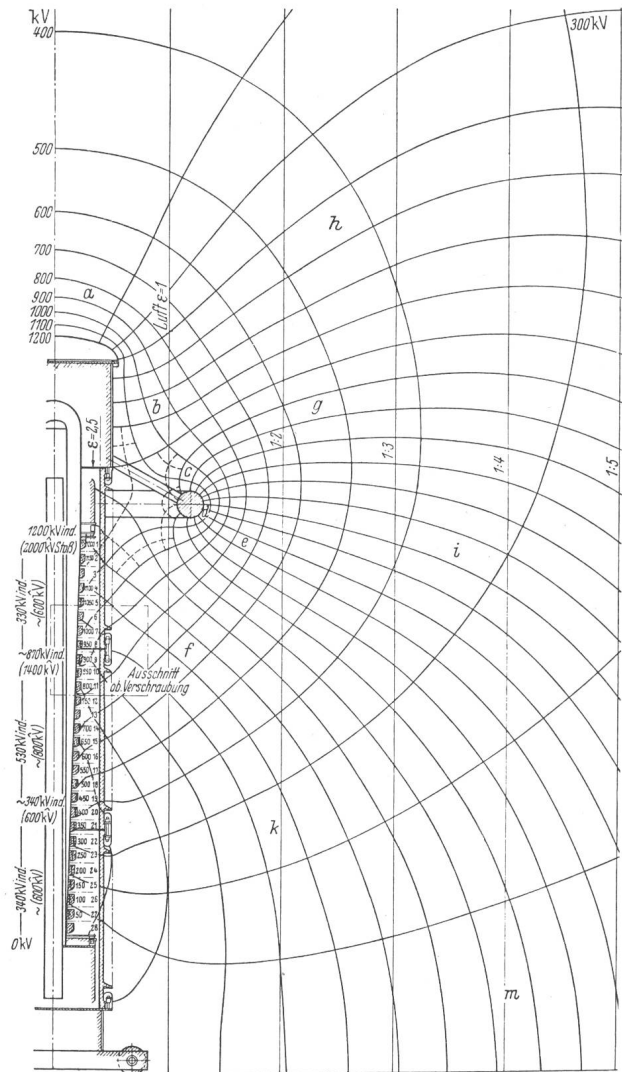


Fig. 13 Das elektrische Feld eines 1-MV-Prüftransformators mit offenem Eisenkern. (Moser-Glaser & Co. AG) [31; 31a]

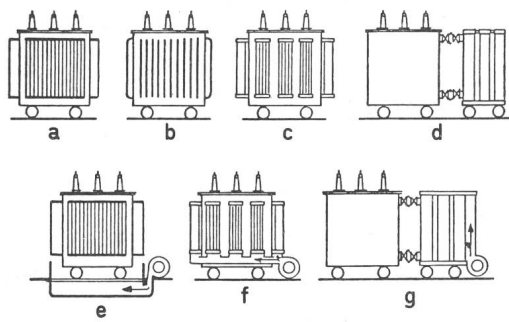


Fig. 14 Die Bauarten der luftgekühlten Transformatoren [13]

Natürliche Kühlung: a Wellblechkessel

b Röhrenkessel

c Angebaute Radiatoren

d Separate Radiatoren

Forcierte Kühlung: e Wellblech- oder Röhrenkessel (Innenanlagen)

f Angebaute Radiatoren

g Separate Radiatoren

Transformatoren zwecks natürlicher Luftkühlung perforierte Blechgehäuse üblich. Die schweren Gusskästen, wie sie in den ersten Zeiten der Öltransformatoren verwendet wurden, sind bald zugunsten von Wellblechkästen verlassen worden (Fig. 14). Die Wellbleche waren anfänglich genietet und weichgelötet, aber als etwa 1908 die autogene Schweißung aufkam, schweisste man die Nähte des Wellblechs, baute geschweisste Wellblechradiatoren an, änderte die Wellenform usw. Etwa um 1900 folgten ins heisse Öl eingesetzte Kupferrohrschlangen, etwas später Gussrippenkörper, darnach schmiedeeiserne Rippenkörper. Etwa um 1908–1910 fing man an, auch zur Kühlung mit Ömlauf und getrenntem Wasserkühler überzugehen (Fig. 15). Einige empfindliche Punkte der Wasserkühlung gaben dann aber Anlass zur Entwicklung des rein luftgekühlten Transformators. So entstand der Rohrradiator. Da auch grosse Transformatoren ohne Wasserkühlung verlangt wurden, musste man hiefür zur künstlichen Bebläsung greifen.

Seit etwa 1950 ist die Verdampfungskühlung von Westinghouse bekannt. Diese Kühlmethode verwendet Fluorkohlenstoffverbindungen hohen Molekulargewichtes. Der Transformator-kessel und die Kühlelemente bilden ein hermetisch geschlossenes System, das sich deshalb für Innenraum und für Freiluftaufstellung eignet. Anstatt den Kessel ganz mit Flüssigkeit zu füllen, wird nur eine kleine Menge als Sumpf auf dem Kesselboden verwendet. Eine Pumpe versprüht diese gegen den Kern und die Spulen. Ein Teil der Flüssigkeit wird durch die Verlustwärme verdampft. Die Fluorkarbone sind chemisch inert und thermisch stabil. Die Dämpfe weisen eine hohe elektrische Festigkeit bei mässigem Druck auf. Solche Transformatoren sind frei von Feuergefahr. Ihre Abmessungen sind etwa gleich, ihr Gewicht ist niedriger als bei Öltransformatoren. Die Leistungsgrösse dampfgekühlter Transformatoren ist unbeschränkt [14].

3.7 Schaltapparate zur Spannungsregulierung

Schon etwa von 1920 an stellte sich bei den Abtransformatoren an den Enden der Hochspannungsübertragungsleitungen der Kraftwerke das Problem der Spannungsregelung, um das angeschlossene Stromnetz auf konstante Spannung zu speisen. Dies geschieht mittels einer Reihe von Anzapfungen der Se-

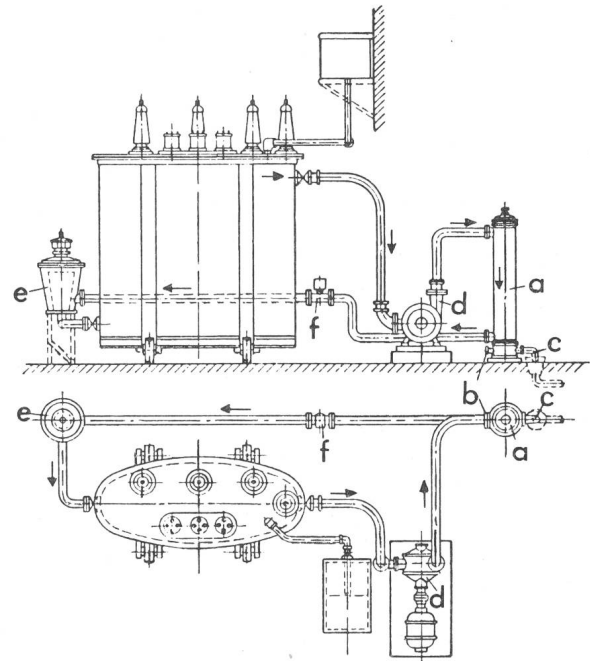


Fig. 15 Schema einer Ömlauf-Kühlanlage mit Wasserkühlung [11]

a Röhrenkühler d Ömlaufpumpe

b Wassereinlauf e Luftabscheider

c Wasserauslauf f Strömungsanzeiger

kundärwicklung und eines besonderen Schaltapparates, des Laststufenschalters, der mit dem Transformator zusammengebaut ist (Fig. 16). Dieser stellt hohe Anforderungen an die Kunst der Konstruktion und wird deshalb seit langem oft auf dieses Gebiet spezialisierten Firmen übertragen. Eine wesentliche Verbesserung des Laststufenschalters bedeutete dessen Giessharzbaueise (BBC 1953); sie genügte für die grössten Transformatoren [33].

3.8 Giessharztransformatoren

1947 erschienen die ersten Mitteilungen [19; 34] über Transformatoren, bei denen mindestens die Wicklungen in Epoxid-

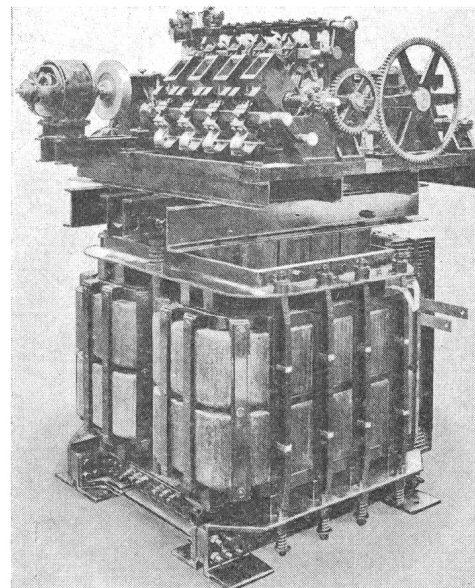


Fig. 16 Luftgekühlter Einphasen-Transformator der Lokomotiven 1-D-1 Nr. 351–352 der Rhätischen Bahn, aus der Zeit um 1912–1915 [32]

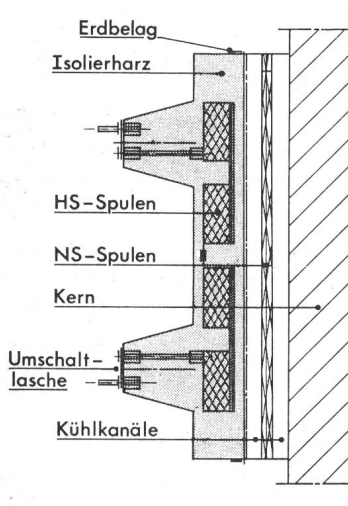


Fig. 17 Schnitt durch die Wicklungen eines Giessharztransformators (Moser-Glaser & Co. AG)
Ausführung dreiphasig bis 1600 kVA

giessharz oder in ungesättigtes Polyesterharz eingegossen sind. Damit erfuhr besonders der Messwandlerbau für Nennspannungen bis etwa 110 kV einen revolutionären Fortschritt im Sinne der «Trockenbauweise». Das Giessharzsystem wurde dann auch für Leistungstransformatoren mässiger Grösse angewandt (Fig. 17). Angefangen bei Moser-Glaser & Co. AG hat es sich, zuerst durch Lizenzen, rasch weltweit eingeführt.

3.9 Silikontransformatoren [35]

Als Träger der Wicklungen und als Trennwände zwischen Hoch- und Niederspannungsteilen dienen Zylinder aus mit Silikonlack imprägniertem Glasgewebe, als Abstandsklötze Porzellan oder silikonimprägnierte Formstücke aus Asbest, zur Isolierung der Zuleitungen Bänder aus Silikongummi. Die Kosten sind relativ hoch. Solche Trockentransformatoren mit Silikonisolierung werden seit etwa 1953 für Leistungen bis zu einigen tausend kVA mit Luftkühlung und für Spannungen der Reihen 6, 10 und 15 kV gebaut, zum Beispiel für Bergwerke. Da sie höhere Betriebstemperaturen als solche mit andern Isolierstoffen ertragen, wurden in den VDE-Bestimmungen die Isolationsklassen F und H mit der Höchsttemperatur von 155 bzw. 180 °C neu geschaffen.

3.10 Transformatoren für Sonderzwecke

Ein grosses Feld beanspruchen, neben den Leistungstransformatoren, die sehr zahlreichen Transformatoren für Sonderzwecke: Prüftransformatoren [39], Messwandler [27], Röntgentransformatoren, Transformatoren für Rundfunksender, für Elektrofilter, Ofentransformatoren für die Metallurgie und die chemische Technik, für Wasserelektrolyse, Schweisstransformatoren, Schubtransformatoren (Fig. 18, etwa seit 1920) [36]. Sie alle haben bis 1950 schon einen beträchtlichen Weg der Entwicklung durchschritten. Ihre Technik ist reich an Erfindungen und interessanten Lösungen der Probleme.

Im Jahre 1896 befasste sich die deutsche Firma C.H.F. Müller als erste Röntgenröhrenfabrik mit der serienmässigen Herstellung von Röntgenröhren. Die Leistungen wurden gesteigert und die Funkeninduktoren durch Transformatoren ersetzt. Bis 1950 erreichte man Leistungen bis 50 kW.

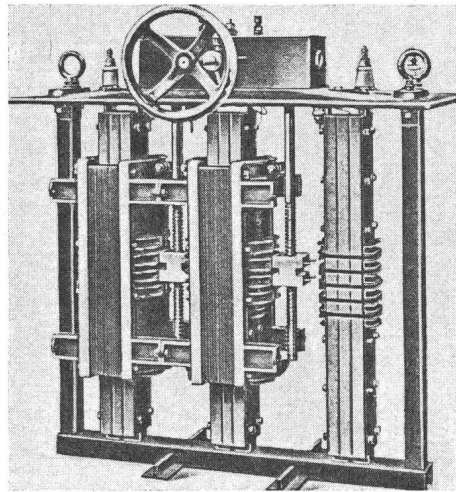


Fig. 18 Dreiphasen-Schubtransformator aus der Zeit um 1925.
Koch & Sterzel AG, Dresden [39]

Für die Prüfung der Isolierstoffe wird in [5] ein Transformator für 500 kV der Westinghouse Electric aus dem Jahre 1912 erwähnt. In [39] aus dem Jahre 1929 werden mehrere Prüftransformatoraggregate für 500 kV gezeigt, und es wird erwähnt, dass die Erhöhung der Spannungen auf mehr als 1000 kV gegen Erde keine Schwierigkeiten mehr bietet.

An einem Autogen-Schweissskurs im Jahre 1920 berichtete man über die elektrische Schweißung aus den Jahren 1880 bis 1885 (wozu es noch keine Transformatoren gab), die Wasserstoffschweißung 1899 sowie über die Acetylen-Sauerstoffschweißung 1902–1903, die damals zum wichtigsten Schweißverfahren wurde. Sie wurde dann aber durch die elektrischen Verfahren weitgehend verdrängt. Für die verschiedenen Systeme der Lichtbogen- und der Widerstandsschweißung wurden besondere Transformatoren entwickelt. Etwa um 1920 begann eine sehr starke Verbreitung der kleinen fahrbaren Schweisstransformatoren.

3.11 Supraleitende Transformatoren

Am Ende des hier betrachteten historischen Zeitabschnittes begannen vielfältige Studien über die Anwendung der schon 1913 entdeckten Supraleitfähigkeit in der Elektrotechnik und so auch für den Transformatorbau. Die dabei auftretenden Schwierigkeiten sind zahlreich und schwerwiegender Art; ein ausführliches Bild hierüber geben [37; 38].

4. Einige charakteristische Zahlen

Die Darstellung der Transformatorenentwicklung im Laufe der Zeit soll durch einige hierfür charakteristische Zahlen ergänzt werden: Tabelle I gibt für die Zeitspanne von 1923 bis 1942 einige technische Daten. Tabelle II enthält für die Zeitspanne 1900 bis 1915 Beispiele für die Leistung, die Verluste und den Wirkungsgrad. Tabelle III zeigt anhand ausgeführter Transformatoren, wie deren Oberspannung von 1886 bis 1965 zugenommen hat.

Seit dem Eintritt der Entwicklungsgeschichte des Transformators in ihr zweites Jahrhundert sind sowohl die Leistungen wie die Oberspannungen stark weiter gewachsen. Hierüber zu berichten mag späteren Betrachtungen überlassen werden.

Literatur

- [1] Die gesamten Naturwissenschaften. 3. Auflage. Essen, Verlag Bädeler, 1873.
- [2] *J. Müller*: Grundriss der Physik und Meteorologie. 12. Auflage. Braunschweig, Verlag Vieweg, 1875.
- [3] *J. Crüger*: Schule der Physik, eine Anleitung zur Anstellung einfacher Versuche und populäre Entwicklung der wichtigsten Naturgesetze. Leipzig, Verlag Körner, 1880.
- [4] *K. Sumpf*: Grundriss der Physik. Ausgabe A. 13. Auflage. Hildesheim, Verlag A. Lax, 1913.
- [5] *C. Heinke* und *H. Ebert*: Die Elektrophysik und die Theorie des Elektromagnetismus. 1. Abteilung. Handbuch der Elektrotechnik, Band 1/1. Leipzig, Verlag S. Hirzel, 1902.
- [6] *A. Bouwers*: Elektrische Höchstspannungen. Berlin, Verlag Julius Springer, 1939.
- [7] Die Enthüllungsfeier der Nikola-Tesla-Büste im Technischen Museum für Industrie und Gewerbe in Wien. Blätter für Technikgeschichte 14(1952)–, S. 8...10.
- [8] *F. Sallinger*: Transformatoren. Sammlung Göschen. Berlin/Leipzig, Verlag Walter de Gruyter, 1927.
- [9] *A. Imhof*: Sonderheft der STZ zum Abschluss der ersten Elektrifikations-etappe der Schweizerischen Bundesbahnen. Zürich, Orell Füssli Verlag, 1928.
- [10] *W. Kehse*: Der praktische Transformatorenbau. Anleitung für Entwurf, Berechnung und Konstruktion. Stuttgart, Verlag F. Enke, 1934.
- [11] *W. Schäfer*: Transformatoren. Sammlung Göschen, Band 952. Berlin, Verlag Walter de Gruyter, 1939.
- [12] *W. Wyssling*: Die Entwicklung der schweizerischen Elektrizitätswerke und ihrer Bestandteile in den ersten 50 Jahren. Zürich, SEV, 1946.
- [13] *W. Howald*: Elektrische Schaltanlagen und Verteilnetze. Zürich, Orell Füssli, 1947.
- [14] *A. Imhof*: Kühlung von Transformatoren durch Verdampfungsprozesse. Schweiz. Techn. Z. 48(1951)46, S. 789...791.
- [15] 50 Jahre Schweizerische Isola-Werke Breitenbach. Breitenbach, Schweiz. Isola-Werke, 1953.
- [16] *J. Kübler*: Die Entwicklung der Transformatoren-Konstruktionen von 1891 bis 1941 bei der A.G. Brown, Boveri & Cie., Baden. Brown Boveri Mitt. 29(1942)11/12, S. 319...335.
- [17] *G. Kapp*: Transformatoren für Wechselstrom und Drehstrom. Eine Darstellung ihrer Theorie, Konstruktion und Anwendung. 3. Auflage. Berlin, Verlag Julius Springer, 1907.
- [18] *A. Imhof*: Jubiläumsschrift 25 Jahre Micafil 1918...1943. Zürich, Micafil, 1943.
- [19] *A. Imhof*: Die Kunstharzeinbettung mit gleichzeitiger Formgebung als Isolation in der Elektrotechnik. Schweiz. Techn. Z. 49(1952)49, S. 769...774.
- [20] *A. Imhof*: Hochspannungs-Isolierstoffe. Karlsruhe, Verlag Braun, 1957.
- [21] *F. M. Clark*: Insulating materials for design and engineering practice. New York, John Wiley, 1962.
- [22] *G. A. Meier*: Stossfeste Transformatoren. Schweiz. Techn. Z. 48(1951)38, S. 673...674.
- [23] *A. Imhof*: Geschichte der elektrischen Isolationstechnik, ein Beitrag zur Geschichte der Elektrotechnik. Schweiz. Techn. Z. 64(1967)1, S. 2...43.
- [24] *A. Imhof*: Entwicklungsstadien der Hochspannungsdurchführungen. Bull. SEV/VSE 68(1977)20, S. 1066...1072.
- [25] *H. W. Turner* und *H. M. Hobart*: Die Isolierung elektrischer Maschinen. Berlin, Julius-Springer-Verlag, 1906.
- [26] *A. Nikuradse*: Das flüssige Dielektrikum. (Isolierende Flüssigkeiten.) Berlin, Julius-Springer-Verlag, 1934.
- [27] *A. Imhof*: 100 Jahre Messwandler. Bull. SEV/VSE 70(1979)5, S. 228...236.
- [28] Wasserkraftanlagen der Bernischen Kraftwerke A.G. in Bern. Das Elektrizitätswerk Mühleberg. Bull. SEV 18(1927)1, S. 2...35.
- [29] *H. Dickmann*: Aus der Geschichte der Transformatorenbleche. VDI-Beiträge zur Geschichte der Technik 17(1927)–, S. 163.
- [30] *M. Itschner*: Beiträge des Transformatorenbaues zur neueren Entwicklung der Einphasen-Triebfahrzeuge. Schweiz. Techn. Z. 44(1947)38/39, S. 677...680.
- [31] *E. Schneider*: Ein neuer 1-MV-Prüftransformator mit Stabkern. Bull. SEV 50(1959)15, S. 701...713.
- [31a] *A. Imhof*: Gestaltungskräfte im Apparatebau der Starkstromtechnik. Konstruktion 9(1957)12, S. 473...479.
- [32] Rhätische Bahn. Der elektrische Betrieb auf den Linien des Engadins. St. Moritz-Schuls-Tarasp und Samaden-Pontresina. Zürich, Orell-Füssli-Verlag, 1915.
- [33] Transformatoren. In: 1891...1966. 75 Jahre Brown Boveri. Baden, Brown Boveri, 1966; S. 75...78.
- [34] *A. Imhof*: Fortschritte im Bau von Trockentransformatoren und Messwandlern. Schweiz. Techn. Z. 44(1947)44/45, S. 760...761.
- [35] *M. L. Manning*: The application of class-H-insulation to transformers. Trans. AIEE 70(1951), p. 1427...1435.
- [36] Der Schubtransformator. Mitteilungen aus dem Arbeitsgebiet der Koch- und Sterzel AG, Dresden; Nr. T13, 1928.
- [37] *F. Gasser*: Supraleitende Leistungstransformatoren. Schweiz. Techn. Z. 59(1962)19, S. 399...404.
- [38] *A. Imhof*: Anwendung der Supraleitung in der Elektrotechnik. Schweiz. Techn. Z. 59(1962)19, S. 389...399.
- [39] Kaskaden-Transformatoren. Mitteilungen aus dem Arbeitsgebiet der Koch und Sterzel AG, Dresden; Nr. 1616, 1929.
- [40] *W. Kehse*: Handbuch des Transformatorenbaus. Stuttgart, Verlag F. Enke, 1950.
- [41] *H. P. Moser*: Die Entwicklung vom Preßspan zum Transformerboard. Bull. SEV/VSE 68(1977)24, S. 1285...1288.
- [42] *F. Tobler*: Die Behandlung des Isolieröles vor dem Einfüllen in Schalter und Transformatoren und die periodische Revision von Schalter- und Transformatorenöl im Betriebe. Bull. SEV 15(1924)8, S. 373...384.
- [43] Pioniere der Elektrotechnik. Rubrik im Bull. SEV/VSE:
Max Déri, 1854...1938. 55(1964)3, S. 112.
M. von Dolivo-Dobrowolsky, 1862...1919. 53(1962)5, S. 205.
Emil Heinrich Du Bois-Reymond, 1818...1896. 62(1971)12, S. 588.
Michael Faraday, 1791...1867. 57(1966)20, S. 930.
Galileo Ferraris, 1847...1897. 64(1973)11, S. 707.
Lucien Gaulard, 1850...1888. 55(1964)2, S. 61.
Heinrich Geissler, 1815...1879. 63(1972)4, S. 197.
John Hopkinson, 1849...1898. 64(1973)19, S. 1195.
David Edward Hughes, 1831...1900. 67(1976)16, S. 973.
Wilhelm Conrad Röntgen, 1845...1923. 61(1970)26, S. 1269.
Heinrich Daniel Rühmkorf, 1803...1877. 68(1977)24, S. 1288.
Karl August Rudolf Steinmetz, 1865...1923. 57(1966)7, S. 334.
Johann Philipp Wagner, 1799–1779. 67(1976)8, S. 393.
- [43a] *M. K. Landolt*: Aus dem Leben und Werk von Nikola Tesla. Bull. SEV 50(1959)19, S. 933...947.

Adresse des Autors

Dr.-Ing. h.c. *Alfred Imhof*, Winzerstrasse 113, 8049 Zürich.