

100 Jahre Messwandler

Autor(en): **Imhof, A.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **70 (1979)**

Heft 5

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-905357>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

100 Jahre Messwandler

Von A. Imhof

62-799(091): 621.317.3(091);

Die Geschichte der Messwandler begann vor ungefähr hundert Jahren. Sie ist von reicher technischer Phantasie, lebhaftem Erfindergeist und der erfolgreichen Mitwirkung auch kleiner Firmen geprägt. Die nachfolgende Darstellung ordnet die grosse Zahl der Wandler Systeme in mehrere charakteristische, historische Etappen. Nicht einbezogen wurde das Gebiet der Gleichstrom-Messwandler.

L'histoire des transformateurs de mesure a commencé il y a près de cent ans. Elle est caractérisée par une imagination technique riche, par un vif esprit d'invention et également par des succès de petites entreprises. Les nombreux systèmes de ces transformateurs sont groupés par étapes caractéristiques historiques. Il n'est toutefois pas tenu compte des transformateurs de mesure à courant continu.

1. Erste historische Hinweise

Die Messwandler sind Apparate, die Spannung und Stromstärke auf für Messinstrumente geeignete Grössenbereiche wandeln. Mit wenigen Ausnahmen aus neuerer Zeit gehören sie deshalb zu den Transformatoren. Diese wurden, als Leistungstransformatoren, im Jahre 1885 erfunden durch *Déri*, *Blathy* und *Zipernowsky*.

Es gibt aber in der Literatur einzelne Hinweise, die den Messwandlern doch ein etwas früheres Entstehungsdatum zubilligen. Die Möglichkeit dazu bestand durchaus, denn das Induktionsgesetz, auf dem sie beruhen, kannte man schon seit dessen Entdeckung durch *Faraday* im Jahre 1830. Es interessierte die Erfinder zunächst für das eigentlich kompliziertere Problem der Generatoren (ohne dessen Lösung ja keine Transformatoren benötigt wurden). Der erste Spannungswandler soll bereits 1879 bei der «Kalifornischen Lichtkompagnie San Francisco» verwendet worden sein [39]. Es gibt auch Hinweise, die vermuten lassen, dass der Stromwandler schon 1882 erdacht, aber kaum beachtet wurde. Sehr bestimmt lautet eine den Stromwandler betreffende Äusserung von *G. Benischke* Anno 1918 [4]: «Die jüngeren Elektrotechniker scheinen die Schwierigkeiten, die früher bestanden, und die man durch Messinstrumentengehäuse aus Isolierstoff nebst isolierender Befestigung derselben, durch isolierte Aufstellung der ganzen Schalttafel samt Bedienungsgang, durch Schutzfenster usf. zu überwinden suchte, gar nicht mehr zu kennen. Die Schwierigkeiten waren so gross, dass eine Anwendung von mehr als 10000 V im praktischen Betriebe unmöglich war. Das wurde erst anders durch die Erfindung der Stromwandler vom Verfasser im Jahre 1898 (ETZ 1899, S. 86).»

Wie wenig Beachtung die Messwandlertechnik damals noch fand, wird auch durch die Feststellung beleuchtet, dass ein 1270 Seiten umfassendes Handbuch des Jahres 1906 über die elektrische Messtechnik [1] den Messwandlern kaum zwei Seiten einräumt. «Doch benötigen alle diese Messeinrichtungen, die an Verwendung immer mehr zunehmen, wie die sogenannten Stromtransformatoren und der Dietze-Anleger (das war ein Stromwandler, dessen Eisenkern sich wie eine Zange öffnen liess, um einen Stromleiter ohne dessen Unterbrechung umfassen zu können) beweisen, eine empirische Wechselstromwicklung, und zwar bei der später zu benutzenden Periodenzahl.» Den Spannungswandler erwähnt das Handbuch nicht. Nur wenige Jahre darnach befasst sich dann *Orlich* mit der Beschreibung von Strom- und Spannungswandlern [2].

Um dem Leser zu erleichtern, sich in den Stand der damaligen Elektrotechnik einzufühlen, sei hier daran erinnert, dass die ersten Wechselstromanlagen Europas nach dem System *Déri*, *Blathy* und *Zipernowsky* 1886 in den Werken Thorenberg (Schweiz), Mailand und Rom in Betrieb kamen. In London wurde in jenem Jahr die Grosvenor Gallery Station nach dem

Wechselstromsystem von *S. Z. de Ferranti* eröffnet mit einem 2,4-kV-Freileitungsnetz von 130 km Gesamtlänge.

Die Zahl der sich folgenden Bauarten der Messwandler ist so beträchtlich, dass es nicht möglich ist, darüber auf wenigen Seiten zu berichten, ohne sich auf die wesentlichen charakteristischen Etappen mit zugehörigen Beispielen zu konzentrieren. Aus einer Zeittafel der wichtigsten Erfindungen lassen sich Gruppen bilden, die zwar jeweils mehrere verschiedene, aber unter sich doch verwandte Lösungen umfassen. Zu jeder Gruppe werden nachfolgend einige Beispiele dargestellt.

2. Erste Bauarten

Bis etwa 1915 waren die Messwandler primitive kleine Transformatoren, deren Eisenblechkerne, entliehen aus dem Generatoren- und Transformatorenbau, noch keine Rücksicht auf die Sonderprobleme der Wandler nahmen. Bleche von 0,5 mm Dicke wurden zusammengenietet und stumpf gestossen [32]. Bis zu Nennspannungen von einigen tausend Volt bestand die Isolation vorwiegend aus aufgewickelmtem Lacktuch und Lackband (Fig. 1). Für Nennspannungen bis zu einigen zehntausend Volt fertigte man etwa von 1905 an Topfwandler mit Masse- oder Ölfüllung und mit Durchführungen aus Porzellan (Fig. 2). Immer noch spielten dabei Lacktuchbänder und -schläuche eine dominierende Rolle, für die höhern Spannungen unter Öl fast ausschliesslich Preßspan. Um 1904 begann die Zeit der Verwendung von Hartpapierzylindern, be-

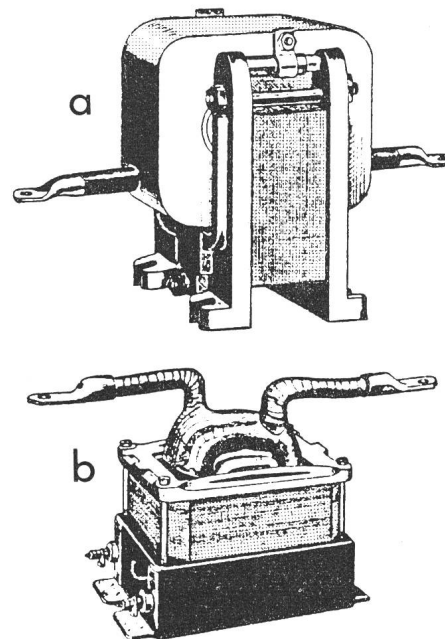


Fig. 1 Zwei Stromwandler mit Lackbandisolation der Primärspule [8]

sonders als deren Schellackbindung ab 1912 durch die ölbeständige Bakelitlackbindung abgelöst wurde. Die Abmessungen und Gewichte waren in Anbetracht der noch kärglichen Beherrschung der Hochspannungstechnik relativ gross. Einige Beispiele von Spannungswandlern 110 kV in mit Mineralöl gefülltem Kessel zeigen Fig. 3 und 4 [8]. Die physikalischen Zusammenhänge in den Wandlern waren noch wenig bekannt, und es fehlte an guten Prüfverfahren; man eichte Wandler und Messgeräte zusammen. *W. Jaeger* gibt in seinem Werk «Elektrische Messtechnik» aus dem Jahre 1917 [3] immerhin einige Weisungen betr. Eisenquerschnitt, Eisenqualität, magnetischen Widerstand und magnetische Streuung für Wandler. Und er macht klare Angaben über die Abweichungen von Übersetzungsverhältnis und Phasenverschiebung zwischen Primär- und Sekundärstrom von Messwandlern. Ausführlich werden die damaligen Methoden zur Bestimmung des Übersetzungsverhältnisses und des Phasenwinkels dargestellt.

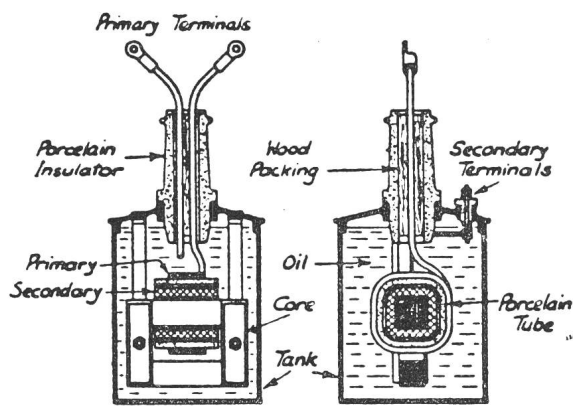


Fig. 2 Ölgefüllter Stromwandler [8]

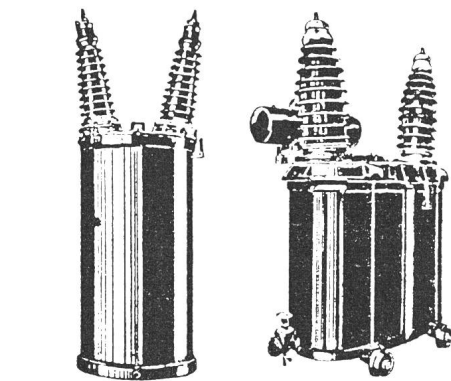


Fig. 3 Ölgefüllte Spannungswandler 110 kV aus der Zeit 1910-1925 [8]

Links: General Electric Company
Rechts: Sachsenwerk

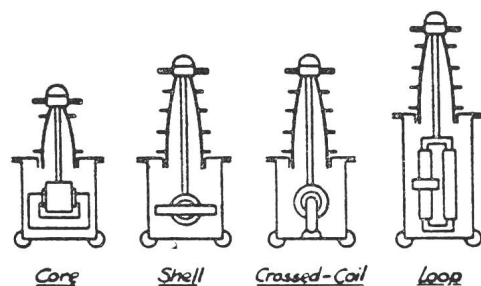


Fig. 4 Typische Anordnungen des aktiven Teils in ölgefüllten Stromwandlern aus der Zeit 1910-1925 [8]

3. Entwicklung guter magnetischer Werkstoffe

Die zweite Etappe bietet in konstruktiver Hinsicht noch nicht Fortschritte bedeutender Art, wirkte aber revolutionär in bezug auf Genauigkeit und Abmessungen der Messwandler infolge höchst wichtiger Studien und Entwicklungen bezüglich der magnetischen Eigenschaften von Eisen-Nickel-Legierungen. 1889 testete *J. Hopkinson* das magnetische Verhalten von Legierungen mit verschiedenen grossen Beimengungen von Nickel. Systematische Studien einer beträchtlichen Serie von Legierungen wurden 1912 durch *Burgess* und *Aston* unternommen. *Hopkinson* und *Hadfield* befassten sich 1911 besonders mit dem Einfluss starker Felder. 1913 stellte dann *Yensen* durch Schmelzen von Elektrolyteisen im Vakuum in einem Hochfrequenzofen sehr reines Eisen her und fand, dass es hohe magnetische Qualitäten aufweist. Mit derselben metallurgischen Technik untersuchte *Yensen* eine grosse Zahl von Legierungen von Eisen mit andern Metallen, besonders um solche mit höherer magnetischer Sättigungsintensität zu finden. 1920 publizierte er ausführlich über seine epochemachenden Ergebnisse und gab der 50%-Legierung den Namen *Hypernik* (Fig. 5). In den Laboratorien der American Telegraph & Telephone Co. wurde eine Legierung studiert, die in sehr schwachen Feldern eine bessere Permeabilität aufweist als alle bisher bekannten Legierungen; sie erhielt den Namen *Permalloy*. Obwohl diese Legierungen zunächst für andere Zwecke entwickelt wurden, empfahl sich deren hohe Permeabilität in schwachen Feldern und durch die kleinen Ummagnetisierungsverluste besonders für Stromwandler, wie dies 1925 durch *C. V. Drysdale* dargelegt wurde [8].

Darnach befassten sich zahlreiche Arbeiten mit Verbesserungen der Stromwandler im Sinne höherer Präzision, besonders auch des Ringstromwandlers. Zwei ganz verschiedene Entwicklungen liessen diesen, etwa von 1928 an, grosse Verbreitung erlangen: Erstens die dargestellte Verbesserung der Bleche für den Kern, zweitens die Verwendung der einen kleinen Flanschdurchmesser aufweisenden Kondensatordurchführungen und deren Entwicklung zu hoher Betriebssicherheit. Fördernd auf Anwendungsmöglichkeiten wirkte des weitern die Verwendung in Kabelendverschlüssen. Seiner Einfachheit,

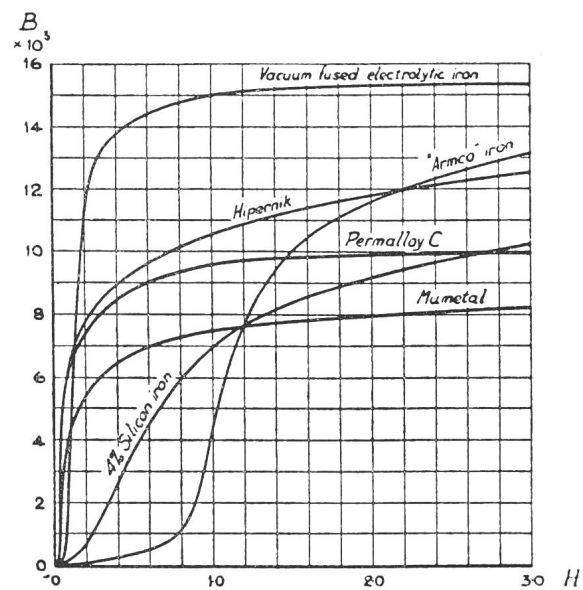
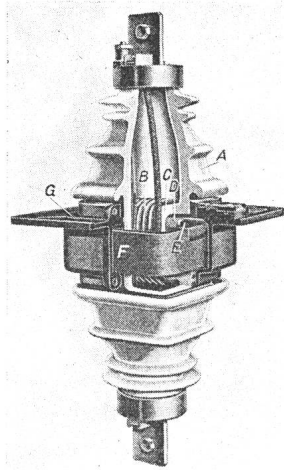


Fig. 5 B-H-Kurven für verschiedene Magnetbleche [8]

Fig. 6
Porzellan-Querloch-Durchführungs-
stromwandler für Innenraum [6]



Betriebssicherheit, geringen Kosten und des kleinen Raumbedarfs wegen waren die Hersteller bestrebt, ihn auch für kleinere Stromstärken verwendbar zu machen, und dies mit Erfolg.

4. Erste Trockenwandler

Die Nachteile ölgefüllter Messwandler, wie hohes Gewicht und Volumen, Brand- und Verrussungsgefahr, gaben Anlass zur Entwicklung einer dritten Phase: Die Jahre um 1927 bis 1930 brachten eine Reihe von Ideen für ölfreie und compoundfreie sog. Trocken-Messwandler. Sehr bekannt wurden die diesbezüglichen Erfindungen von *F. J. Fischer* der Firma Koch & Sterzel AG in Dresden für die untern Spannungsreihen, für viel höhere Spannungen die Erfindungen von

A. Imhof, für welche Koch & Sterzel eine Lizenz erwarb. Die Wandler von *Fischer* besaßen fugenlose Isolierkörper aus Porzellan. Berühmt wurde besonders der «Querloch-Stromwandler» (Fig. 6). Die Primärwicklung der Spannungswandler (Fig. 7) ist mit einer salbenartigen, feines Quarzmehl enthaltenden Substanz durchsetzt, weshalb die Bezeichnung «trocken» nur annähernd richtig ist. Eine Besonderheit dieser Wandler ist der hohe Spannungsgradient der Spulenflanken. Durch Reihenschaltung zweier Spulen wurde die Verwendung für Nennspannungen bis 40 kV möglich. Mehrere Ausführungsarten beleuchteten die weite Phantasie des Erfinders [6].

Eine andere Bauart porzellanisolierter Trockenspannungswandler für 10 und 20 kV aus der Zeit um 1932 beschreibt *H. Hartmann* (BBC) in [12]. Fadenspulenförmige Porzellankörper (Fig. 8) sind auf der dem Eisenkern zugewandten Seite metallisiert, damit der Luftraum nicht beansprucht ist.

Es sei hier vermerkt, dass das damalige Porzellan noch hohe dielektrische Verlustfaktoren und starken Temperaturanstieg aufwies, wodurch die Höhe der beherrschbaren Spannung begrenzt war.

Bei den damaligen Trockenspannungswandlern nach *A. Imhof* (1927) steht der extrem schlanke Eisenkern unter der Meßspannung und befindet sich in der Achse eines Durchführungsisolators. Dies erlaubt, den Wandler zugleich als Ringstromwandler zu konzipieren (Fig. 9). Damit war erstmals auch ein kombinierter Spannungs- und Stromwandler realisiert. Mit der Variante eines geschlossenen Eisenkerns des Spannungswandlers nach Fig. 10 kann der Stromwandler als Schleifenwandler mit mehreren Primärwindungen ausgeführt werden [5]. Der Spannungswandler wurde auch als potential-

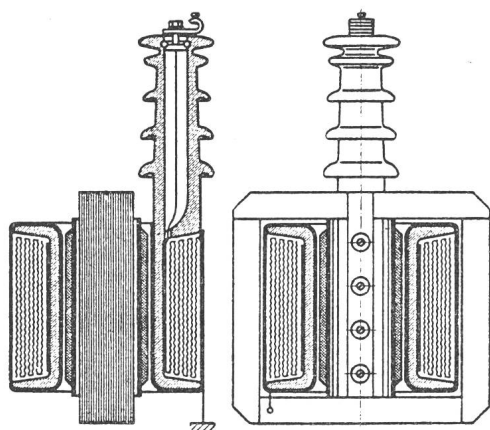


Fig. 7 Porzellan-Trockenspannungswandler 20 kV Pol-Erde von Koch und Sterzel (*Fischer*) [6]

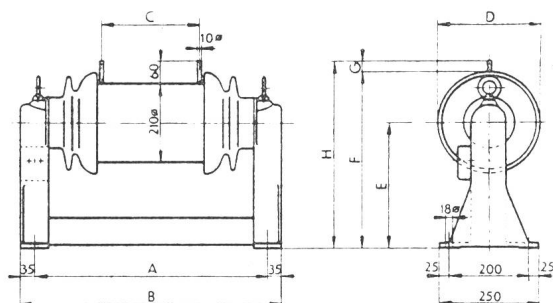


Fig. 8 Porzellan-Trockenspannungswandler 10 und 20 kV Pol-Pol für Innenraum

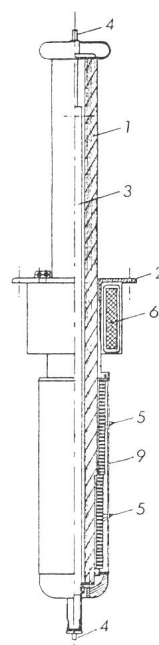


Fig. 9
Trocken-Durchführungs-Spannungs- und
Stromwandler 110 kV mit offenem
Spannungswandler-Eisenkern, 1927 [5]

- 1 Kondensatordurchführung
- 2 Befestigungsflansch
- 3 Eisenblechkern
- 4 Anschlussklemmen
- 5 Spulen des Spannungswandlers
- 6 Ringkern des Stromwandlers
- 9 Isolier-Schutzzyliner

gesteuerte Durchführung (Fig. 11) vorgeschlagen, deren Steuerung durch die in Lagen eingebettete Spannungswandler-Primärwicklung erfolgt [6]. Die Realisierung dieser Idee war zur Zeit der Kresol-Formaldehydharztechnik (Bakelit) noch etwas problematisch, erfolgte aber in einwandfreier Weise später, als Kunstharze erfunden wurden, die ohne Abspaltung flüchtiger Bestandteile aushärten (ungesättigte Polyesterharze und Äthoxylharze).

5. Kaskaden-Messwandler

Zeitlich ungefähr parallel kennzeichnet sich eine Etappe der Kaskaden-Messwandler [6; 7; 8]. Der erste Kaskaden-Spannungswandler ist eine Erfindung von *E. Pfiffner*, 1926. Darauf folgten einige Varianten von Kaskaden-Spannungswandlern und auch -stromwandlern durch verschiedene Erfinder. Das Prinzip aller dieser Systeme ist eine Serieschaltung einiger, je für eine Teilspannung bemessener Wandler auf der Primärseite derart, dass sie räumlich aufeinander gestellt werden können (Fig. 12). Dadurch ist die Beherrschung auch sehr hoher Spannungen möglich, und dies mit zylindrischen Wandlern relativ kleinen Durchmessers. Das Kaskadenprinzip wurde auch für Stromwandler angewandt (Fig. 13; 14). Die zulässige Bürde der Kaskadenwandler ist jedoch kleiner als diejenige der Einzelwandler.

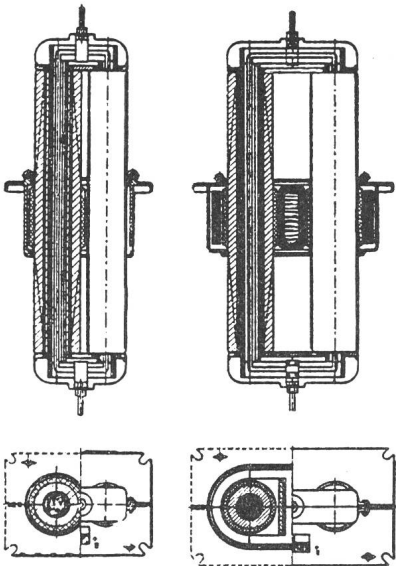


Fig. 10 Trocken-Durchführungs-Spannungswandler (links) und kombinierter Spannungs-Stromwandler (rechts), 1927, nach Imhof [6]

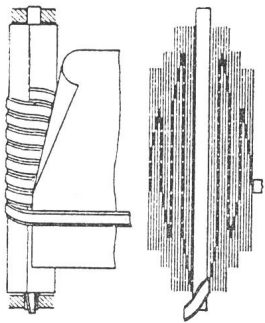


Fig. 11 Hochspannungswicklung des Trocken-Durchführungs-Spannungswandlers, 1927. Prinzipskizze [6]

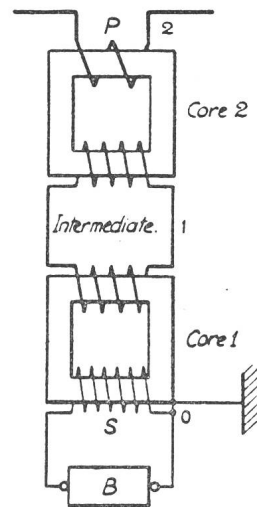


Fig. 13 Prinzipschema eines Kaskaden-Stromwandlers mit 2 Kernen [8]

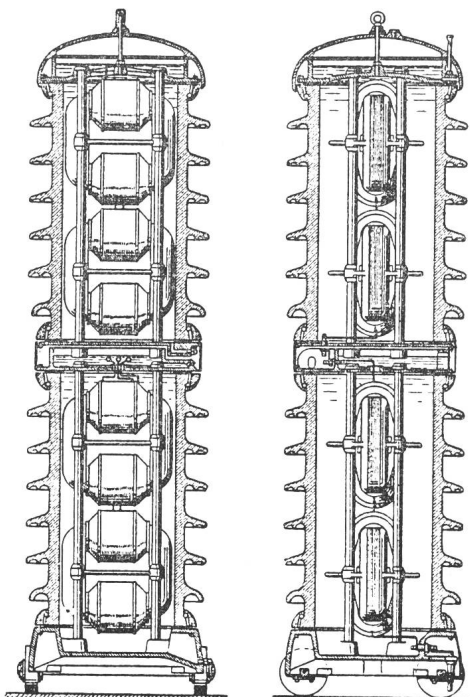


Fig. 12 Freiluft-Kaskaden-Spannungswandler 220 kV von Koch & Sterzel [6]

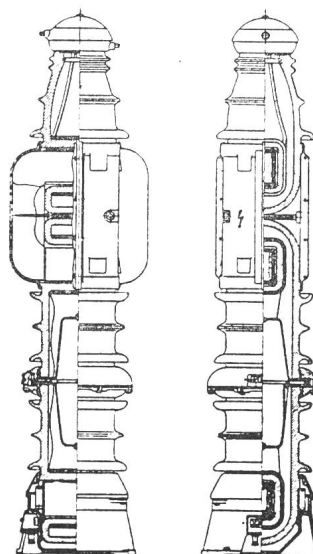


Fig. 14 Freiluft-Kaskaden-Stromwandler 100 kV [6]

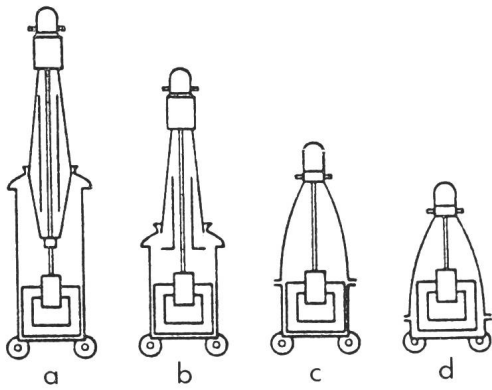


Fig. 15 Entwicklung der ölgefüllten Hochspannungs-Stromwandler bis zum Isoliermanteltyp [8]

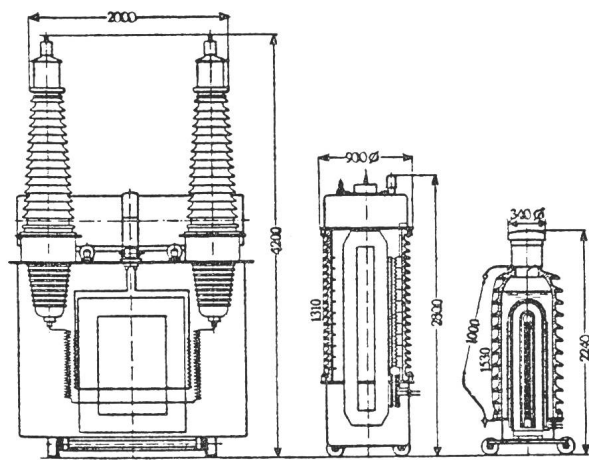


Fig. 16 Grössenvergleich von ölgefüllten Spannungswandlern der Nennspannung 150 kV aus verschiedenen Baujahren [12]

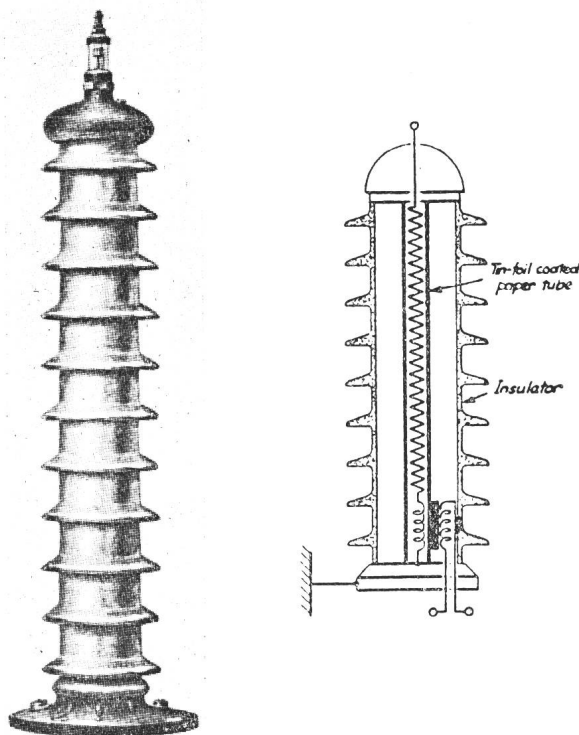


Fig. 17 Widerstands-Spannungswandler von A. Imhof, 1926 [5; 8]

6. Isoliermantelwandler

Eine sehr wichtige Etappe ist diejenige der Isoliermantelwandler mit Mineralölfüllung, dies anstelle der Wandler mit Eisenkessel und Deckeldurchführungen. Fig. 15 zeigt schematisch diese Entwicklung für Stromwandler, Fig. 16 für Spannungswandler der Nennspannung 150 kV. Dabei kommen mehrere erfinderische Einfälle zur Auswirkung [8].

Der erste derartige Apparat war der Widerstandsspannungswandler von Trüb, Täuber & Co. (Fig. 17), bestehend aus einem in vielen Einzelspulen bifilar gewickelten, sehr hochohmigen, säulenförmigen Widerstand in einem schlanken ölgefüllten Porzellanmantel und einem in Reihe mit dem Widerstand geschalteten kleinen Stromwandler [5]. Sein Nachteil, eine bescheidene zulässige Bürde, verhinderte einen Erfolg dieser Bauart.

Bald folgten weitere Messwandler mit ölgefülltem Isoliermantel, so der kombinierte Strom- und Spannungswandler von A. Imhof nach dem für Trockenwandler bereits beschriebenen Prinzip (Fig. 18), der zudem als erster Öltransformator mit elektrisch gesteuerter, ölprägnierter Papierisolation gelten darf. Ein weiterer fortschrittlicher Isoliermantel-Spannungswandler wurde von Meierhans vorgeschlagen (Fig. 19). Seine besonderen Merkmale sind die elektrische Verbindung des Eisenkerns mit dem Mittelpunkt der Primärwicklung und die Verwendung von Potentialsteuerungsrings auf der Innenseite des keramischen Mantels. Weitere Systeme folgten nach und nach, unter ihnen ein Isoliermantel-Spannungswandler mit offenem geerdetem Eisenkern, der in geeigneter Verteilung von Ausgleichswindungen zwecks gleichmässiger Magnetisierung die Unterspannungswicklung trägt (Fig. 16 rechts). Darüber ist die Papierisolation gewickelt, deren Dicke entsprechend dem Spannungsanstieg nach oben wächst und über dem Kernende als Halbkugel geschlossen ist. Die Spulen der Primärwicklung befinden sich auf der Aussenseite der Isolation; diese steuert hiemit auch den keramischen Mantel [12].

Auch Isoliermantel-Stromwandler mit Ölfüllung sind nach mehreren Ideen gefertigt worden, wobei die Hauptisolation aus unter Vakuum mit Öl imprägniertem Papier besteht. Zu den ältesten solchen Bauarten gehört der «Kreuzringwandler» von Siemens & Halske, bei dem sowohl der ringförmige Eisenkern mit der darauf befindlichen Sekundärwicklung als auch der durch ihn greifende primäre Leiter mit ölprägniertem Papier isoliert sind. Doch verblieb die Technik bis heute vorzugsweise beim Ringkernwandler, dessen gerader Zuleitungsteil kapazitiv gesteuert ist. Für sehr hohe Spannungen ist auch der U-Kern mit kapazitiver Steuerung der beiden Schenkel verwendet worden. BBC wandte aber, um 1945, das für die Endisolation der Wicklungen von Leistungstransformatoren von Meierhans erdachte System des Spreizflansches mit Erfolg an. Fig. 20 zeigt Isoliermantel-Stromwandler und einen Stabstromwandler mit Spreizflanschisolation, Fig. 21 rechts einen Isoliermantel-Stützerstromwandler, dessen Eisenkern sich auf halber Spannung befindet. Beim Kopfstromwandler ist der Eisenkern mit den Wicklungen in den Kopf des Isoliermantels verlegt. Die Isoliermantelbauarten haben sich bis heute und bis zu den höchsten Nennspannungen in immer vollkommenerer Ausführung betr. Ölmenge, Ölbehandlung, Luftabschluss, Dimensionierung, durchgesetzt [24, 31, 33].

7. Giessharz-Trockenwandler

Mit dem Jahr 1946 begann die zweite Etappe der Trocken-Messwandler als «Giessharzwandler» durch A. Imhof [13; 14; 15; 17; 22; 30; 34] bei Moser-Glaser & Co. AG, und dies erstmals als restlos trockene, d.h. von keiner fließbaren Imprägnierung Gebrauch machende Apparate. Die Wicklungen und bei vielen Ausführungen auch die Eisenkerne sind nach einem Giessverfahren in ein Kunstharz eingebettet, das die

Eigenschaft hat, ohne Abspaltung flüchtiger Substanzen, z. B. Wasser, durch Polyaddition auszuhärten. Eine solche Isolation ist fugenlos und in allen Richtungen von gleicher dielektrischer Festigkeit. Dem Harz wird ein mineralisches Pulver, heute meist Quarzmehl, beigelegt. Als bestgeeignet erwiesen sich Epoxidharze; anfänglich wurden für Spannungswandler nach Fig. 22, deren Primärwicklung eine Durchführung dielektrisch

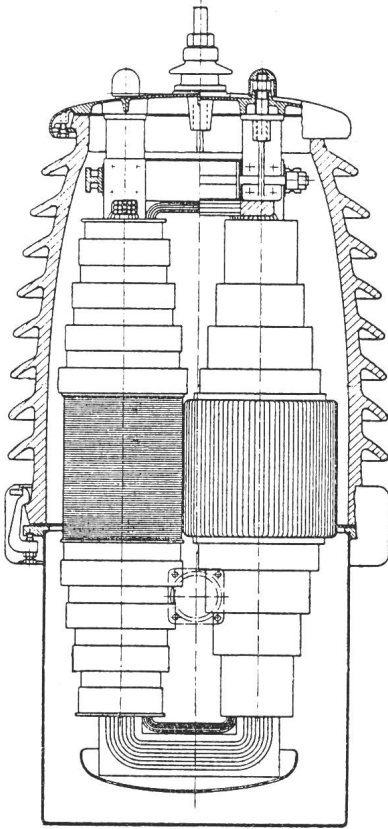


Fig. 18 Kombierter Spannungs- und Stromwandler Isoliermanteltyp 220 kV

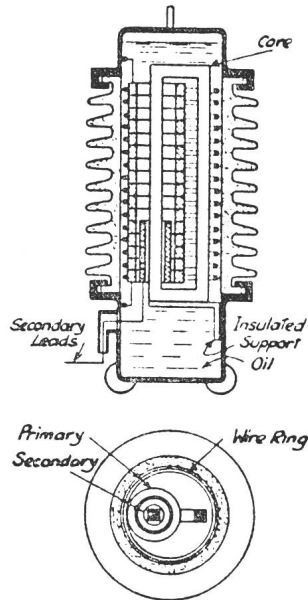


Fig. 19 Isoliermantel-Spannungswandler BBC-Meyrhans [8; 10]

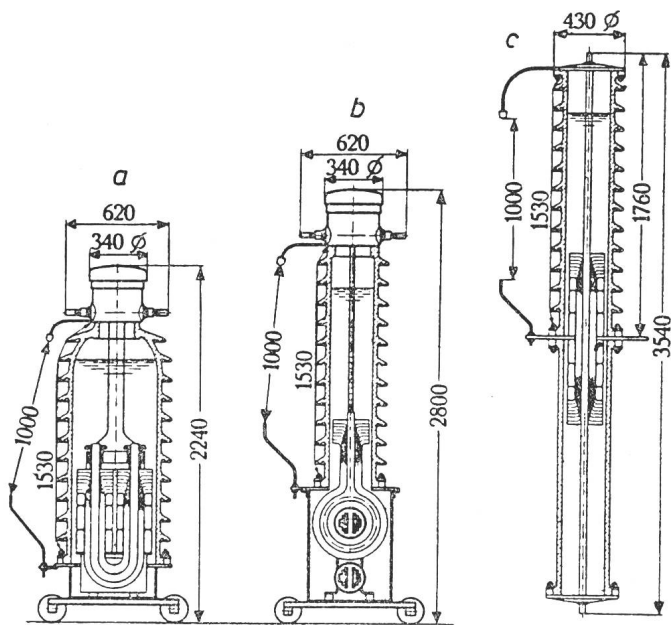


Fig. 20 Isoliermantel-Stromwandler 150 kV mit Spreizflanschisolation verschiedener Ausführungen (BBC) [12]

- a Isoliermantelbauart mit Ringkern-Stromwandler
- b Kesselbauart mit Ringwicklung auf der Primärseite
- c Stabstromwandler

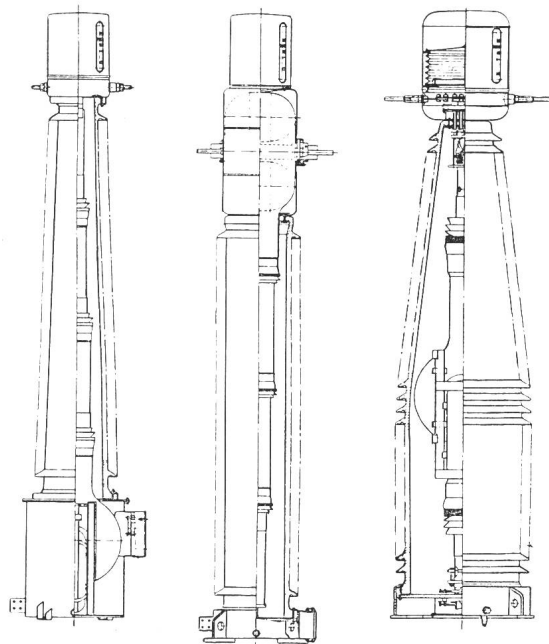


Fig. 21 Kessel- (a), Kopf- (b) und Stützerstromwandler (c) gleicher Daten [40]

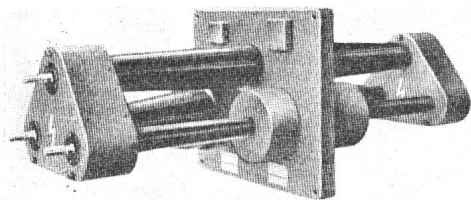


Fig. 22 Trocken-Spannungs- und Stromwandler 60 kV in Bauart einer Wanddurchführung (Moser-Glaser & Co. AG)

steuert, auch ungesättigte Polyesterharze verwendet, wodurch die in Fig. 11 dargestellte Idee ihre Realisierung fand. Giessharz-Stromwandler, Spannungswandler und kombinierte Wandler wurden zunächst für Spannungen bis 24 kV (Fig. 23), einzelne Typen bis 60 kV und schliesslich bis 110 kV gefertigt, in neuerer Zeit auch als Freilufttypen (Fig. 24) unter Anwendung spezieller Epoxidharztypen. Alle diese Trockenwandler haben relativ kleine Abmessungen, sind in jeder Lage verwendbar und schwer brennbar. Besondere Bauformen sind für sehr kleine Phasenabstände geschaffen worden, so zum Beispiel 150 mm für 24 kV [21].

Für trockene Stab- und Schleifenstromwandler höherer Spannungsbereiche wird ein Schichtstoff auf der Grundlage spezieller Harze verwendet, wie er vor allem auch für Hochspannungsstromschienen und Generatorableitungen in gerader und in gebogener Form Anwendung findet [28]. Trotz der Schichtung wirkt diese Isolation praktisch homogen (Fig. 24, Mitte).

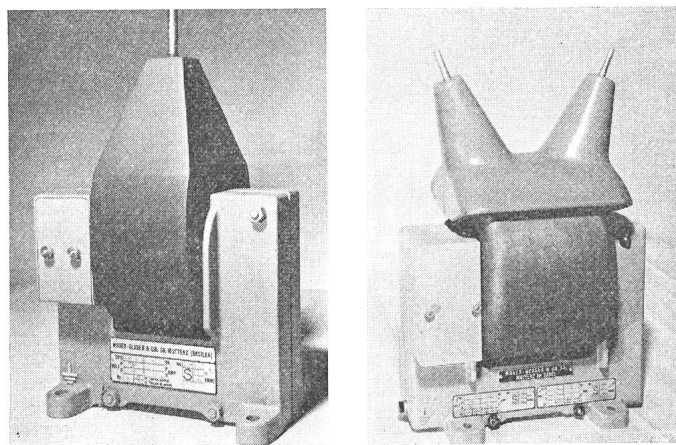


Fig. 23 Giessharz-Trockenwandler 20 kV
Rechts: Spannungswandler (neuere Form)
Links: Stromwandler (älteste Form)

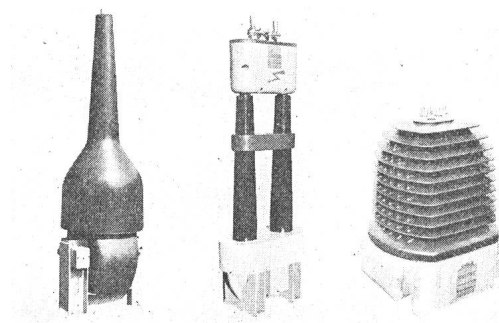


Fig. 24 Drei Giessharz-Trockenwandler 60 kV
Links: Innenraum-Spannungswandler Pol-Erde
Mitte: Innenraum-Stromwandler
Rechts: Freiluft-Spannungswandler Pol-Erde

8. Druckgas-Spannungswandler

Etwa um 1940 baute BBC (*H. Hartmann*) für Spannungen bis 60 kV Druckluft-Spannungswandler [9]. Der Druck betrug 15 bar, in Übereinstimmung mit dem Bedarf für Druckluftschalter. Die Durchführungen des Stahlbehälters bestanden aus Porzellan.

Zu grosser Bedeutung kamen aber Druckgasmesswandler erst mit dem Aufkommen der mit Schwefelhexafluorid (SF_6) isolierten metallgekapselten Hochspannungsschaltanlagen. Die Verwendung dieses Gases für Hochspannungsapparate, insbesondere Leistungstransformatoren und Leistungsschalter (General Electric Company), begann um die Mitte unseres Jahrhunderts.

9. Kapazitive Spannungswandler

Eine Etappe, die heute für die rasch zunehmende Zahl der Höchstspannungsanlagen sehr grosse Bedeutung hat, ist diejenige des kapazitiven Spannungswandlers [18; 23; 25]. Die Kenntnis seines Prinzips reicht bis etwa 1930 zurück: Der spannungsproportionale Verschiebungsstrom eines unter der zu messenden Spannung stehenden Kondensators wird durch eine am erdseitigen Ende befindliche induktive Vorrichtung in die Meßspannung umgesetzt. Es fehlte jedoch lange Zeit an geeigneten Kondensatoren: Porzellankondensatoren sind zu kapazitätsarm, gross und schwer, Kondensatordurchführungen ergeben eine ebenfalls zu kleine und etwas temperaturabhängige Kapazität. Erst mit dem Ölpapierkondensator für die Hochfrequenztelefonie, als Flachwickелеlemente in einem ölgefüllten Porzellanmantel aufgestapelt, erhielten die kapazitiven Spannungswandler ihre Bedeutung. Es vergingen noch etliche weitere Jahre, bis, nach Verbesserung der Kondensatoren sowie des erdseitigen induktiven Teils und gefördert durch die Verbreitung der Höchstspannungsübertragungen, das induktive System mehr und mehr dem kapazitiven weichen musste. Es gelang, die Präzision zu steigern; die schlanke Bauform, die grosse Spannungssicherheit, der relativ niedrige Preis trugen zur Verbreitung bei. Fig. 25 zeigt das Prinzip.

Flachwickelkondensatoren aus paraffinimprägniertem Papier waren schon aus den Zeiten der *Ruhmkorff*-Induktionsapparate bekannt (um 1900–1915), darnach aber fast vergessen. Als etwa um 1930 in einigen Firmen die Fertigung statischer Kondensatoren für die Leistungsfaktorverbesserung einsetzte, lernte man das Verfahren zur Herstellung von Kondensatoren kennen, deren Dielektrikum aus Papier hervorragender Qualität von nur 0,01...0,02 mm Dicke besteht, das unter Vakuum getrocknet und mit dünnflüssigem reinstem Mineralöl imprägniert wird. Die sehr niedrigen dielektrischen Verluste erlauben die Verwendung von Flachwickelstapeln ohne Gefahr von zu geringer Wärmeabgabe.

Ein Vorläufer des kapazitiven Spannungswandler-systems ist der kapazitive Spannungsteiler mit Anschluss eines statischen Voltmeters. Als Spannungsteiler wurden vorzugsweise Kondensatordurchführungen mit einer Anzapfung am äussersten Steuerungsbelag verwendet (Fig. 26).

Kapazitive Spannungswandler werden auch kombiniert mit einem Stromwandler ausgeführt.

10. Messwandler in vollgekapselten SF_6 -Anlagen

Da es sich bei SF_6 -Anlagen stets um grosse elektrische Leistungen handelt, können ausnahmslos Stabstromwandler mit koaxialem Ringkern verwendet werden. Der radiale Abstand

zwischen Stromleiter und Eisenkern mit der darauf befindlichen Sekundärwicklung ist der hohen Durchschlagfestigkeit des SF₆-Gases wegen relativ klein. Fig. 27 [40] zeigt einen solchen Stromwandler (Pos. 5).

Das Problem der Spannungswandler ist wesentlich schwieriger, immerhin aber dadurch vereinfacht, dass die Überschlagnfestigkeit der Primärwicklung im Gas leicht zu erreichen ist. Einen ersten Vorschlag für solche Spannungswandler enthält ein Aufsatz aus dem Jahre 1958 [28], hier wiedergegeben in Fig. 28. In einer 1958 eingereichten Schweizerpatentschrift [27] ist das Dielektrikum dazu, bestehend aus Papier oder Kunststoff-Folie in SF₆, beschrieben; es wurde 1973 Gegenstand einer Dissertationsarbeit [38].

Für gekapselte Anlagen wurden auch kapazitive Spannungswandler vorgeschlagen. Dabei wurde auf die Möglichkeit des Einbaues im Zuge der Strombahn hingewiesen, wie es für induktive Wandler auch in Fig. 28 erkennbar ist.

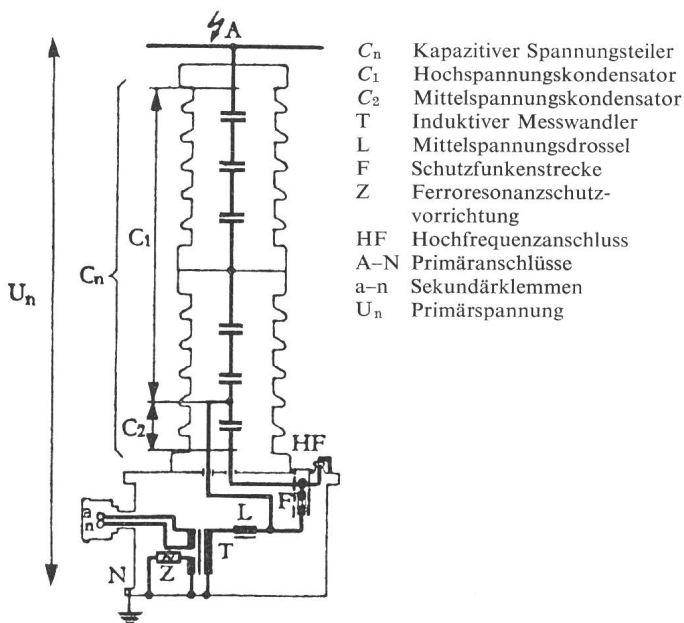


Fig. 25 Prinzipschema des kapazitiven Spannungswandlers

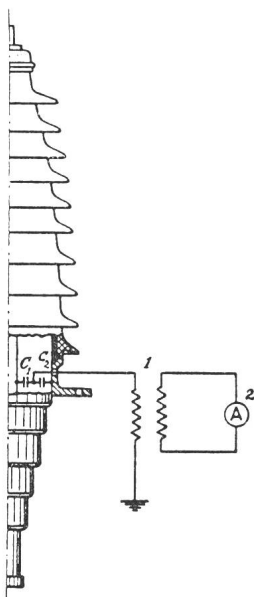


Fig. 26 Kondensatordurchführung als kapazitiver Spannungsteiler (Micafil AG)

11. Optische Messwandlersysteme

Mit der Absicht, die Lösung des Isolationsproblems bei Höchstspannungen zu erleichtern, sind, erstmals 1967 und dann wieder 1976, Vorschläge für Messwandler auf optischem Prinzip gemacht worden.

Der optische Stromwandler «Transoptique» [42] verwendet folgendes Prinzip: Eine Lichtquelle im an Erde liegenden Fuss sendet durch den hohlen Stützisolator einen Lichtstrahl auf einen Polarisator im Kopf des Wandlers. Der polarisierte Strahl durchdringt dort einen durchsichtigen Flintglaskörper, der sich in einer Spule befindet, durch die der messende Strom fließt. Dadurch wird die Polarisations Ebene um einen der Feldstärke proportionalen Winkel gedreht (Faraday-Effekt) und bewirkt eine Veränderung der Amplitude in einem erdseitigen zweiten Polarisator, dem sog. Analysator. Anschliessend durchdringt der Lichtstrahl eine Fotozelle, die einen seiner Intensität proportionalen Strom erzeugt. Dieser

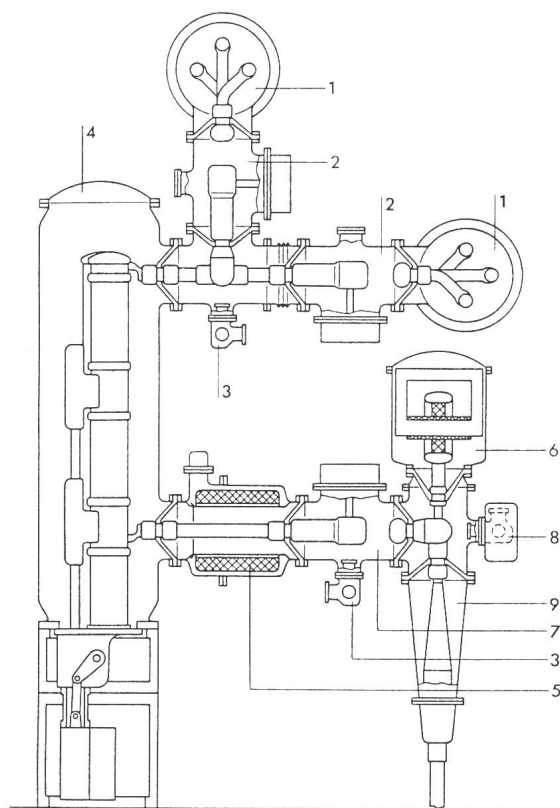


Fig. 27 Schnitt durch ein SF₆-Schaltfeld mit Doppelsammelschienen, mit Stromwandler und Spannungswandler (BBC) [41]

- | | |
|---------------------|----------------------|
| 1 Sammelschiene | 6 Spannungswandler |
| 2 Trenner | 7 Leitungstrenner |
| 3 Arbeitserder | 8 Schnellerder |
| 4 Leistungsschalter | 9 Kabelendverschluss |
| 5 Stromwandler | |

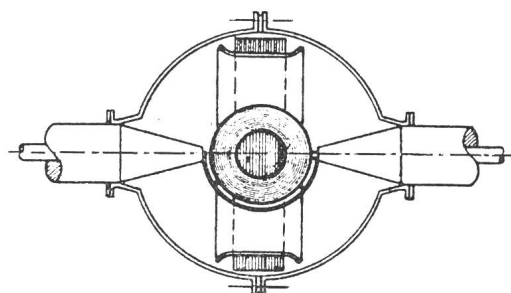


Fig. 28 Schnitt durch einen SF₆-Spannungswandler im Zuge der Strombahn [27]

muss noch für den Messkreis verstärkt werden. Der gesamte Apparat besteht äusserlich aus einer der Spannungshöhe entsprechenden, mit Schirmen versehenen, sehr schlanken Porzellansäule und den relativ kleinen Apparatekästen an den beiden Enden.

Der optische kombinierte Strom-Spannungswandler von *A. J. Rogers* [43] besteht aus einem der Spannungshöhe entsprechenden hohlen Stützisolator und den Apparatebehältern an den beiden Enden. Er beruht auf der Entdeckung eines kombinierten Effektes aus dem Faraday-Effekt und dem Elektrogrationseffekt nach *Pockel*.

Literatur

- [1] *C. Heinke*: Handbuch der Elektrotechnik. 2. Band: Die Messtechnik. Abteilung 4: Wechselstrommessungen, Wellenstrommessungen und magnetische Messungen. Leipzig, S. Hirzel Verlag, 1908.
- [2] *E. Orlich*: Über die Anwendung des Quadrantenelektrometers zu Wechselstrommessungen. ETZ 30(1909)20, S. 466...470.
- [3] *W. Jaeger*: Elektrische Messtechnik. Theorie und Praxis der elektrischen und magnetischen Messungen. Leipzig, Johann Ambrosius Barth, 1917.
- [4] *G. Benischke*: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik. 4. Auflage. Julius Springer Verlag, 1918.
- [5] *A. Imhof*: Ein neuer Spannungswandler. Bull. SEV 19(1928)23, S. 741...750.
- [6a] *Kaskaden-Transformatoren*. Mitteilungen aus dem Arbeitsgebiet der Koch und Sterzel AG, Dresden, Nr. T16, 1929.
- [6b] *Trocken-Spannungswandler mit Porzellan-Isolierkörper*. Mitteilungen aus dem Arbeitsgebiet der Koch und Sterzel AG, Dresden, Nr. T17, 1930.
- [6c] *Trocken-Messwandler*. Mitteilungen aus dem Arbeitsgebiet der Koch und Sterzel AG, Dresden, Nr. T18, 1931.
- [7] *Kaskaden-Wandler zur gleichzeitigen Strom- und Spannungsmessung*. Z. 389-1. ATM -(1933)24, S. T85...T86.
- [8] *B. Hague*: Instruments transformers, their theory, characteristics and testing. A theoretical and practical handbook for test-rooms and research laboratories. London, Isaac Pitmann, 1936.
- [9] *H. Hartmann*: Druckgasisolierte Wandler. Brown Boveri Mitt. 28(1941)4/5, S. 84...88.
- [10] *A. Meyerhans*: Neue Bauweisen bei Transformatoren und Drosselspulen. Bull. SEV 35(1944)22, S. 632...643.
- [11] *J. Goldstein*: Fortschritte im Messwandlerbau und neue Messwandlerprinzipien. Bull. SEV 36(1945)8, S. 245...251.
- [12] *H. Hartmann*: Ausgewählte Probleme des Wandlerbaues. Bull. SEV36(1945)8, S. 233...244.
- [13a] *A. Imhof*: Verfahren zum Füllen von Hohlräumen von Transformatoren. Schweizer Patent Nr. 257218, 1946.
- [13b] *A. Imhof*: Potentialgesteuerte mehrlagige Wicklung. Schweizer Patent Nr. 257219, 1946.
- [13c] *A. Imhof*: Verfahren zur Imprägnierung von elektrischen Spulen. Schweizer Patent Nr. 269924, 1946.
- [14] *A. Imhof*: Fortschritte im Bau von Trockentransformatoren und Messwandlern. STZ 44(1947)44/45, S. 760...761.
- [15] *Imhof-Messwandler*. Druckschrift W53. Bamberg, Messwandler-Bau GmbH, 1948.
- [16] *P. Olsson*: Transformateurs de courant typ IMBA à volume d'huile réduit. ASEA Revue 21(1949)-, p. 94...99.
- [17] *A. Imhof*: Kunstharz-Trocken-Messwandler. Bull. SEV 41(1950)19, S. 716...723.
- [18] *P. Böning*: Die Messung hoher Wechselspannungen mittels kapazitiver Spannungsteiler. V 3333-1. ATM -(1951)184, S. T49...T52.
- [19] *J. Goldstein*: Die Messwandler, ihre Theorie und Praxis. 2. Auflage. Basel, Birkhäuser Verlag, 1952.
- [20] *R. Bauer*: Die Messwandler. Grundlagen, Anwendung und Prüfung. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1953.
- [21] *A. Imhof*: Messwandler vom Standpunkt der Messfelder aus betrachtet. Bull. SEV 44(1953)14, S. 612...616.
- [22] *A. Imhof*: Transformateurs de mesure isolés à résine synthétique. Rapport CIGRE N° 127, 1954.
- [23] *N. Knudsen*: Capacitor voltage transformers. ASEA J. 27(1954)7/8, p. 99...105
- [24] *H. Hartmann*: 380-kV-Messwandler. Brown Boveri Mitt. 41(1954)9, S. 337...344.
- [25] *R. Bauer*: Verwendung, Aufbau und Prüfung des kapazitiven Spannungswandlers. Siemens Z. 30(1956)5/7, S. 330...333.
- [26] *A. Imhof*: Stand der elektrotechnischen Giessharzanwendung. ETZ-A 78(1957)11, S. 384...389.
- [27] *A. Imhof*: Raumparende elektrische Hochspannungsschaltanlage in Trockenbauart. Schweizer Patent Nr. 361250, 1958/1962.
- [28] *A. Imhof*: Über neue Konzeptionen und Werkstoffe der Hochspannungstechnik. STZ 55(1958)6, S. 93...120.
- [29] *A. Imhof*: Kombinierte Hochspannungs-Umhüllungsisolierung und Verfahren zu ihrer Herstellung. Schweizer Patent Nr. 332527, 1953/1958.
- [30] *A. Imhof*: Kunstharz-Messwandler. Vortrag an der Tagung «Kunststoffe in der Hochspannungstechnik», Innsbruck 1959. ETZ-A80(1959)20, S. 705...710.
- [31] *H. Hartmann* und *B. Gänger*: Neue Bauweise für Spannungswandler höchster Spannungen. Brown Boveri Mitt. 47(1960)5/6, S. 306...320.
- [32] *M. Walter*: Die Entwicklung der Strom- und Spannungswandler (Messwandler). Elektrizitätswirtschaft. 65(1966)23, S. 710...717.
- [33] *H. Hartmann*: Strom- und Spannungswandler für 750 kV. Brown Boveri Mitt. 51(1964)1/2, S. 84...92.
- [34] *J. Kopecek* und *M. Dvorak*: Pstrojovje transformatory. Praha, Ceskoslovenské Akademie Ved., 1966.
- [35] *A. Imhof*: Vollgekapselte Hochspannungs-Schaltanlagen. Eine Übersicht. STZ 64(1967)8, S. 153...164 + Nr. 9, S. 173...183.
- [36] *U. Brand* et *D. Kind*: Feuilles plastiques à imprégnation gazeuse pour l'isolement à haute tension. Rapport CIGRE Nr. 15-02, 1972.
- [37] *F. Raupach*: Messwandler für SF₆-isolierte gekapselte Schaltanlagen. ETZ-A 94(1973)7, S. 419...422.
- [38] *U. Brand*: Hochspannungsisolierungen mit gasimprägnierten Kunststoff-Folien. Dissertation der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig, 1973.
- [39] *W. Brückel* und *D. Vetsch*: Das neue Messwandlerlabor der Eichstätte des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins. Bull. SEV/VSE 65(1974)6, S. 421...427.
- [40] *J. J. Huovinen*, *F. Korischum* und *M. Hessler*: Kopfstromwandler. Brown Boveri Mitt. 62(1975)10/11, S. 474...478.
- [41] *H. P. Szenté-Varga*: Hochspannungs-Schaltanlagen mit SF₆-Isolation. Anwendungen und Betriebserfahrungen. Brown Boveri Mitt. 62(1975)4, S. 139...147.
- [42] *Y. Pelenc* et *G. Bernard*: Prototype industriel de transformateur de courant à effet magnéto-optique. Rev. Gén. Electr. 76(1967)7/8, p. 1055...1064.
- [43] *A. J. Rogers*: Method for simultaneous measurement of current and voltage on high-voltage lines using optical techniques. Proc. IEE 123 (1976)10, p. 957...960.

Adresse des Autors

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