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: 68 (1977)

Heft: 20

Artikel: Entwicklungsstadien der Hochspannungsdurchführungen

Autor: Imhof, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915075

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

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

Entwicklungsstadien der Hochspannungsdurchführungen

Von A. Imhof

621.315.626.1.027.3

Die Entwicklung der Durchführungsisolatoren, wie sie für Transformatoren, Schaltapparate, Gebäudemauern, metallgekapselte Schaltanlagen benötigt werden, erfährt eine Betrachtung der konstruktiven und werkstofflichen Probleme. Inbegriffen sind auch die feststoffisolierten Hochspannungsschienen mit potentialgesteuerten, für die meisten Anwendungen abgebogenen Enden, die für raumsparende Schaltanlagen und als Generatorableitschienen angewandt werden. Abschliessend werden die bei Gleichspannungsübertragungen auftretenden Anforderungen an Durchführungen diskutiert.

L'auteur considère les problèmes de construction et de matériaux que pose le développement des traversées isolantes telles qu'on les utilise pour les transformateurs, appareils de couplage, parois de bâtiments, installations de couplage à blindage métallique. Il s'agit également des barres à isolants solides pour haute tension à potentiel dirigé, munies d'extrémités recourbées pour la plupart des applications et destinées à des installations de couplage d'encombrement réduit et à des dérivations d'alternateurs. Pour terminer, l'auteur examine les exigences posées aux traversées pour le transport d'énergie sous tension continue.

1. Einführung

Es gibt wenige Objekte der Hochspannungstechnik, die in so mannigfaltiger Weise zu deren Entwicklung beigetragen haben wie der Durchführungsisolator.

Die Anfangsstadien der Hochspannungstechnik reichen zurück in die Zeiten der Elektrostatik. Doch war dies eher ein Abschnitt der Physik, in welchem die Elektrisiermaschinen zu Objekten der Technik entwickelt wurden. Erst die mit der Elektrodynamik verbundene, gegen Ende des letzten Jahrhunderts einsetzende Hochspannungstechnik gab Anlass zum Bau von Durchführungsisolatoren.

2. Die konstruktive Entwicklung

Um Hochspannungsleitungen durch die Mauern der Kraftwerke zu ziehen, genügten für die Spannungen damaliger Zeit – sie hielten sich in den Grenzen von etwa 25 bis 75 kV – entsprechend grosse Öffnungen, manchmal überdeckt mittels einer Glasscheibe. Bei Öltransformatoren, etwa nach 1900, benötigte man jedoch zur Herausführung der Hochspannungsleitungen aus dem Kessel Isolatoren von mässigem Durchmesser. Damit begann das tiefer gründende Studium der auftretenden Probleme.

Einer der ersten, die diese Probleme in hervorragender, theoretisch fundierter Weise an die Hand nahmen, war *K. Kuhlmann,* später Professor für Elektrotechnik an der ETH in Zürich. In seinem Aufsatz «Hochspannungsisolatoren» [1]) des Jahres 1915 äusserte er sich wie folgt: «In den Jahren 1905 und 1906, als die Grundlagen zur Normalisierung der Hochspannungsisolatoren in mir reiften und ich die ersten Anregungen zu ihrer Durchführung gab, war ich bestrebt gewesen, mit den vom Magnetismus übernommenen Faraday'schen Kraftlinienvorstellungen hinter das Wesen der Erscheinungen zu kommen, die damals den Konstrukteuren von Hochspannungsapparaten das Fortkommen so schwer machten ... Der Weg, den ich zur Untersuchung des elektrischen Feldes der Hochspannungsdurchführungen einschlagen werde, ist derjenige, den der Ingenieur von der Behandlung magnetischer Probleme von den elektrischen Maschinen her im Prinzip bereits kennt. Es ist der graphisch-analytische und wohl der einzige Weg, der bis jetzt zum Ziele führt. Die Aufgabe auf rein mathematischem Wege zu lösen, ist wohl bis heute für Konstruktionen, wie sie die Technik braucht, noch nicht gelungen ... Von einer blossen Übertragung der vom Elektromaschinenbau üblichen Methoden kann hier nicht die Rede sein, denn die magnetischen Probleme in unseren Maschinen sind wesentlich ebene Probleme, während wir bei den Isolatoren es mit räumlichen Problemen zu tun haben.»

Fig. 1 zeigt ein schönes Beispiel aus dem Kuhlmannschen Aufsatz, der acht verschiedene Beispiele aufweist. Mit der Kuhlmannschen Methode gelang es fortan, Durchführungen – meist aus Porzellan – in bezug auf Durchschlagfestigkeit und Überschlagfestigkeit optimal zu konstruieren. Die meisten Fabrikanten von Transformatoren und Ölschaltern fertigten ihre Durchführungen zunächst noch selber. So entstanden in konstruktiver Hinsicht zahlreiche Bauarten sehr verschieden guter Bemeisterung der Probleme. Die Figuren 2...8 zeigen einige Beispiele aus der Zeit zwischen etwa 1915 und 1935. Porzellan, Preßstoff, Luft und Öl waren die verwendeten Isolierstoffe. Wie Fig. 8 zeigt, drang die Technik mit «trockenen» Durchführungen bereits vor bis zu Nennspannungen von 88 kV, mit ölgefüllten nach Fig. 9 bis 150 kV.

Es war geradezu wissenschaftlicher Brauch, als Gütekriterium einer Konzeption die Spannungsverteilung auf der Isolatoroberfläche zwischen Flansch und Kopf zu ermitteln, wobei vom Stromleiter aus gesehen die einen konvexe, die andern konkave (sog. Hohlkehlenisolatoren) und wieder andere konvex-konkave Mantellinien befürworteten. Man erkannte auch die gute Wirkung der gegen den Stromleiter *vorgeschobenen Elektrode* des Flansches, missachtete aber da und dort zu sehr die Glimmerscheinungen an scharfen Rändern mit ihrer werkstofferodierenden Wirkung. Diesbezüglich war z. B. die Durchführung von BBC (Fig. 2) vorbildlich; sie umgab zudem den Stromleiterbolzen mit seiner hohen Radialfeldstärke mit dem durchschlagfesten Hartpapier. Zahlreiche Patente befassten sich mit solchen Problemlösungen.

Das Kraftlinienbild hat sich als Methode zur Behandlung von Hochspannungsproblemen allgemein durchgesetzt. Die graphische Behandlungsweise ist schliesslich grossenteils durch die rechnerische ergänzt worden. Dies wird durch zahlreiche wissenschaftliche Publikationen über die Berechnung elektrischer Felder illustriert [4; 5; 6], so mittels 11 Berichten anlässlich des Symposiums Hochspannungstechnik, München 1972, ferner deren 13 am Zürcher Symposium 1975.

Eine weitere grundlegende Idee hatte *R. Nagel,* der 1905 ein Patent (D.R.P. 177 667) auf *Kondensatordurchführungen* erwirkte. Er unterteilte das Gesamtdielektrikum in eine grössere Zahl von Schichten, zwischen denen sich je eine Metallfolie befindet. Durch geeignete, der Rechnung leicht

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

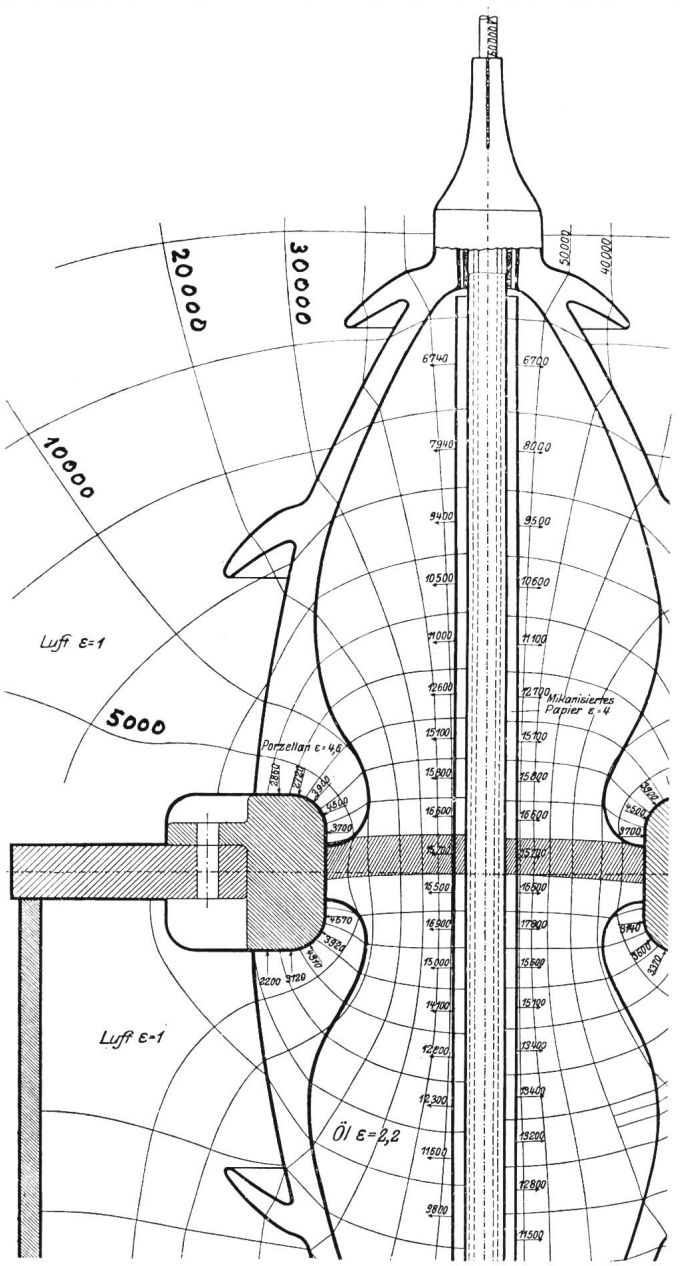


Fig. 1 Kraftlinienbild einer Porzellandurchführung, nach Kuhlmann [1]

zugängliche Bemessung [7; 8] der so gebildeten, in Reihe geschalteten zylindrischen Kondensatoren lässt sich die Spannungsbeanspruchung radial und axial steuern. Es dauerte indes viele Jahre, bis seine Idee zum praktischen Erfolg reifen konnte, vor allem weil die damals bekannten, zylindrisch aufwickelbaren Isolierstoffe von viel zu schlechter Qualität waren [9].

G. Benischke schreibt in seinem Lehrbuch «Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik», 1918 [10], hierüber: Man kann Durchführungen natürlich auch dadurch herstellen, dass man biegsames Material wie imprägniertes Papier, Mikanit und dergleichen in vielen Lagen um die Leitung wickelt und so ein dickes Rohr herstellt. Das Einwickeln von leitenden Zwischenschichten aus Stanniol ist dabei nicht nur zwecklos, sondern schädlich. Denn durch eine leitende Lage zwischen zwei Isolierschichten werden die schlechten Stellen und Poren, die gewöhnlich nicht übereinander zu liegen kommen, hintereinander geschaltet, so dass der Zweck der schichtweisen Anordnung des Isolierstoffes vereitelt wird. Dazu kommt, dass die Endflächen eines so hergestellten Zylinders insofern verschlechtert werden, als die gleitenden Entladungen durch die Ränder der leitenden Flächen begünstigt werden.»

Dieses vernichtende Urteil hört sich heute eigenartig an, da inzwischen die Kondensatordurchführung den Markt absolut beherrscht und mit grösster Betriebssicherheit bis zu den höchsten Spannungen verwendet wird [11]. Die Randfelder der Steuerungsbeläge sind um so weniger stark, je kleiner die Abstände der Beläge sind. Für die Berechnung massgebend ist die Überlegung, dass bei höchster Dauerbeanspruchung keine Belagrandkorona auftreten darf. Das Problem ist rechnerisch erfassbar [12]. Eine bis an die Oberfläche des in Öl tauchenden Teils geführte Potentialsteuerung ermöglicht, dieses ausserordentlich kurz zu bemessen (Fig. 10).

3. Werkstoffprobleme

3.1 Primitive Anfänge

Hartporzellan war für die mässig hohen Spannungen sowohl als umhüllender Werkstoff für öl- oder massegefüllte Durchführungen als auch für zylindrische Barrieren in solchen Durchführungen geeignet, obwohl der Temperaturanstieg durch seine dielektrischen Verluste damals noch

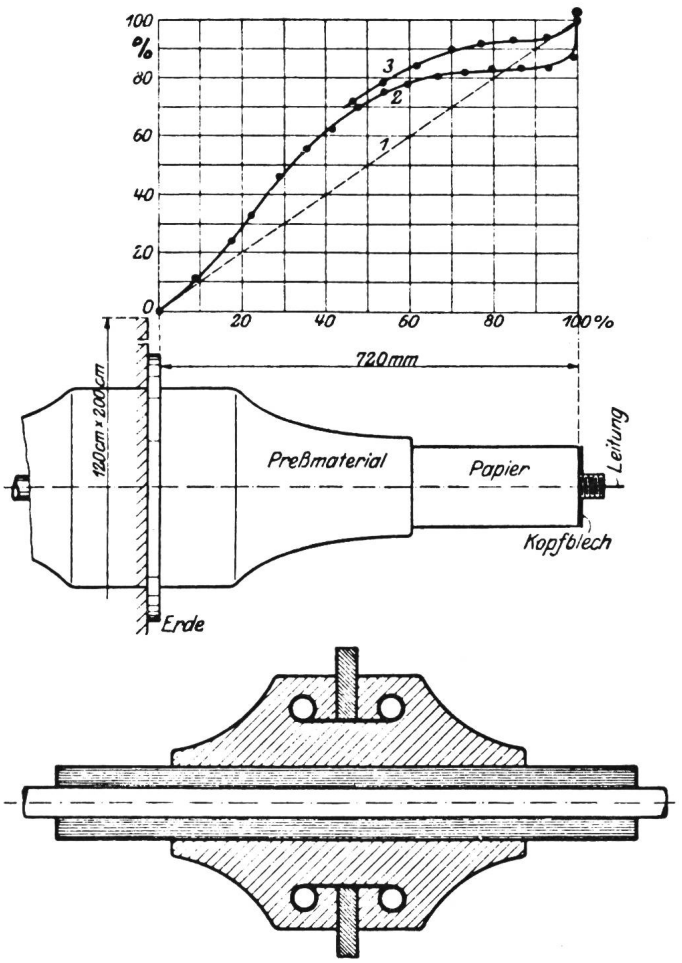


Fig. 2 Aus Isolier-Pressmaterial und Hartpapier bestehende Durchführung mit nach innen vorgeschobener Erdelektrode (BBC 1916)
Das Diagramm zeigt die «Spannungsverteilung» längs einer Mantellinie: Kurve 2 bei aufgesetztem Kopfblech, Kurve 3 ohne dieses [2]

Fig. 3
Ölgefüllte Porzellandurchführung (schematisch), mit vorgeschobener Erdelektrode und Leitungselektrode [2]
Gute Formgebung sowohl in bezug auf Durchschlag wie Überschlag (Britisches Patent)

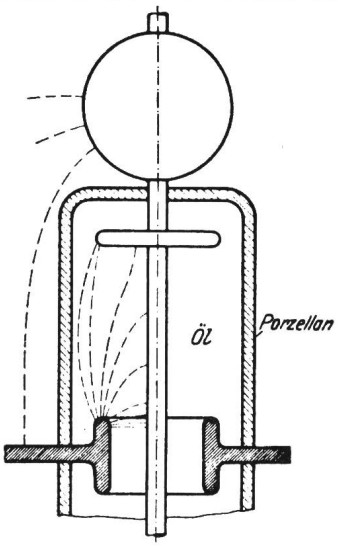
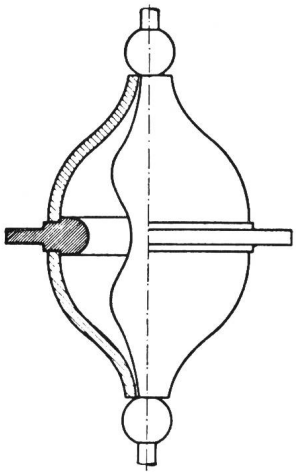


Fig. 4
Ölgefüllte Porzellandurchführung mit vorgeschobener Erdelektrode [2]
Die Feldform begünstigende Form des Stromleiters und entsprechend geformter Porzellankörper (Porzellanfabrik Kahla)



gross war und hiedurch bei Nennspannungen von etwa 80 kV an Sorgen bereitete. Es wurde später auch mittels einiger koaxialer Zylinder für Mehrrohrdurchführungen verwendet (Fig. 8 und 9), darunter auch für solche mit leitenden, aufgebrannten Kondensatorsteurbelägen. Die Ränder der in bezug auf die Potentialsteuerung auf viel zu dicken Wandungen angebrachten leitenden Beläge waren indes zu hoch beansprucht; zudem führen die dadurch begünstigten Streifenentladungen bei Überspannungen zum Abbrand des Metallrandes und zur Bildung von Kerben im Prozellan. Im Laufe der Zeit gelang es, die dielektrischen Verluste besser zu beherrschen.

Die Erfindung des Hartpapiers durch *E. Haefely,* zunächst mit Schellackbindung der Papierlagen, und dessen spätere Verbesserung durch Verwendung von *«Bakelitlack»* (Kresol-Formaldehydharzlösung in Alkohol) schien dann aber einen idealen Isolierstoff in aufwickelbaren Bahnen zur Verfügung zu stellen, um damit Kondensatordurchführungen zu fertigen. Zitieren wir hier wieder *Benischke* [10]: «Es ist eine grundfalsche Anschauung, dass ein Durchschlag schon erfolgt, wenn nur an einer Stelle oder in einer dünnen Schicht die Beanspruchung die Festigkeitsgrenze überschreitet. Wenn das richtig wäre, wäre es kaum möglich, höhere Spannungen hinreichend zu isolieren. Zu den besten Isolierstoffen, über die wir zurzeit verfügen (1918), gehört Papier, das getrocknet und mit einer Lackschicht überzogen ist. Bei allen Anwendungen solchen Papiers wird die elektrische Festigkeit der Papierschicht weit überschritten, ohne dass ein Durchschlag erfolgt, weil eben die Lackschicht den Durchgang der Elektrizität so lange verhindert, bis auch ihre Festigkeit überschritten ist.»

Einige der damals entstandenen Spezialfabriken für elektrische Isolierstoffe versuchten nun tatsächlich – etwa um 1925 – Hartpapier-Kondensatordurchführungen mit vorlakkiertem Papier zu wickeln und dies mit ähnlichen Maschinen, wie sie zur Herstellung von Isolierzylindern für den Transformatorenbau dienten. Doch die Ergebnisse enttäuschten; solche Durchführungen, richtig berechnet, ertrugen zwar die kurzzeitigen hohen Spannungsprüfungen, nicht aber mit genügender Sicherheit die Dauerbeanspruchung mit der etwas erhöhten Betriebsspannung. Erschwerend wirkte dabei noch die Forderung, den in Transformatoren betriebsmässig in Mineralöl befindlichen Unterteil bei der Dauerprüfung in Öl von 90 °C zu tauchen. Es kam dabei zum Wärmedurchschlag, wie er bereits durch einige Autoren theoretisch untersucht worden war, z. B. *K. Berger* [13], *K. W. Wagner, L. Dreyfus* [8]. Durch wesentliche Verbesserung des Hartpapiers, vor allem im Sinne einer tunlichst genau abgestimmten Vorkondensation des Harzbelages, konnte alsdann eine bereits sehr fortschrittliche Lösung gefunden werden. Hiemit kommen wir auf die Auswirkungen der Probleme an Durchführungen auf die Isolierstoffe, deren Kenntnis damals sogar bei ihren Fabrikanten noch recht bescheiden war [9].

3.2 Die Epoche der Isolierstoffverbesserungen

Nun setzte in den fortschrittlichen Isoliermaterialfabriken die Weiterentwicklung in Richtung niedriger dielektrischer Verluste ein. Sehr nützlich war dabei die Verlustmessbrücke nach *Schering.* Die Praktiker waren auf die Hilfe der Theoretiker angewiesen. Auch dem chemischen Aufbau des Harzes wurde erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt. Die Maschinen zum Lackieren des Papiers wie diejenigen zum

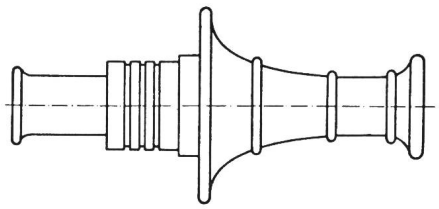


Fig. 5 Porzellandurchführung von schlanker konkaver Form [2]
Füllmasse mit kleiner Dielektrizitätskonstanten; Durchmesser an der Stelle des grössten Überschlagsgradienten gross (Gino Campos)

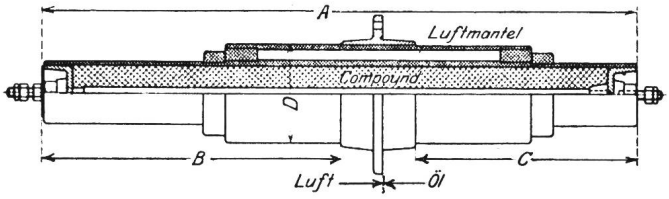


Fig. 6 Luftmanteldurchführung (Haefely)
Der höchstbeanspruchte Teil mit Compoundfüllung, der weniger beanspruchte äussere Teil als Luftmantel (niedrige Dielektrizitätskonstante), der die Beanspruchung des innern Teils herabsetzt. Zylindrische Isolierkörper aus Hartpapier [2].

Wickeln der Durchführungen erfuhren schrittweise Verbesserungen im Sinne grösserer Gleichmässigkeit der gut befundenen Daten. Die Wickelmaschinen der Durchführungen wurden zu Präzisionsmaschinen in bezug auf Temperatur, Druck, Geschwindigkeit und Auftrag der Kondensatorbeläge [9].

Analoge Entwicklungen erfuhr auch die Kabeltechnik, der es gelang, die dielektrische Qualität des unter Vakuum imprägnierten Papieres zu heben. Ein ähnliches Verfahren wurde auch für Höchstspannungs-Kondensatordurchführungen angewandt. Freilich lässt sich dabei die für Kabel erreichte Verbesserung durch Ölüberdruck nicht gut auf Durchführungen übertragen.

Beginnend 1947 erfuhr die Isolationstechnik weitere grosse Fortschritte durch Einführung der *Giessharze* und Entwicklung ihrer Anwendung durch den Verfasser [14]. Zu diesen Entwicklungen boten u. a. verschiedene Probleme der Kondensatordurchführungen Anreiz. Für den Mittelspannungsbereich konnten damit vorzügliche ungesteuerte, ölfeste Durchführungen mit in den Harzkörper vorgeschobenem Erdungsflansch gegossen werden (Fig. 11) [15]. Der Verfasser sah hier auch die Möglichkeit, wickelbare Hartfaserstoffe herzustellen, in welchen das Harz, vorzugsweise ein Epoxidharz, nicht nur eine dünne Oberflächenschicht des Papiers bildet, wie dies beim Kresolharz der Fall ist, sondern den Faserstoff besonderer Art ganz durchdringt. Dadurch entsteht ein auch in sehr dicker Schicht völlig poren- und spaltenfreier Isolierstoff (Duresca®). Da es sich hiebei nicht um ein Wickeln breiter Bahnen, sondern von bandförmigem Material handelt, wurde es mit diesem Schritt erstmals möglich, auch trockene *gebogene* Kondensatordurchführungen zu fertigen, vor allem aber Durchführungen sehr grosser Länge, sog. Durescaschienen mit kapazitiv gesteuerten Enden, mit welchen Hochspannungsschaltanlagen für Nennspannungen bis 170 kV in stark reduzierter Baugrösse erstellt werden können (Fig. 12) [14; 16]. In vorhandenen Anlagen beschränkten Raumes können damit beträchtliche Erweiterungen vorgenommen werden [17].

Eine andere Anwendung solcher Schienen bieten die Hochstrom-Generatorableitungen für Stromstärken bis zu mehreren 1000 A und Spannungen bis etwa 21 kV. Die damit erreichten Vorteile sind u. a. die einfache Montage, die Raumeinsparung, Vermeidung von Wanddurchführungen, Verwendung von Lochstromwandlern, einfache und sichere Abstützung gegen Kurzschlusskräfte mittels metallischer Konstruktionen, Unmöglichkeit von Phasenkurzschlüssen, Dämpfung einlaufender Überspannungswellen und Kompensation induktiver Blindleistung durch die hohe Eigenkapazität der Schienen.

Im Hinblick auf die in Kapitel 3.1 erwähnte Äusserung von Benischke «Es ist eine grundfalsche Anschauung ...» sei auf den neuesten Isolierstoff für trockene Kondensatordurchführungen hingewiesen, ein Hartpapier, das von Micafil mit DRYSOMIC® bezeichnet wird [18] und das an Stelle des bereits fortschrittlichen Super-Resocel 91 tritt. Bei dessen Herstellung wurde das Prinzip beibehalten, Papierbahnen in einer ersten Phase mit einer dünnen Schicht aus geeignetem Kunstharz so zu beschichten, dass ein lagerfähiges Zwischenprodukt entsteht. Dieses wird dann in einer zweiten Arbeitsphase in Wickelmaschinen, die dabei auch die Kondensatorbeläge herstellen, zu Isolierkörpern mit Feldsteuerung ge-

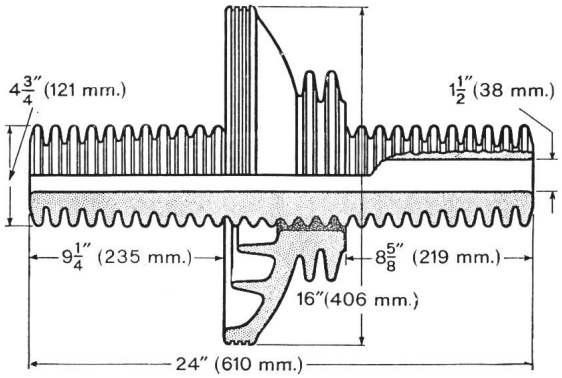


Fig. 7 **Porzellandurchführung 70 kV mit radial weit ausladendem Mittelteil und Kriechwegverlängerung durch viele Rillen (Ohio Brass 1926) [3]**

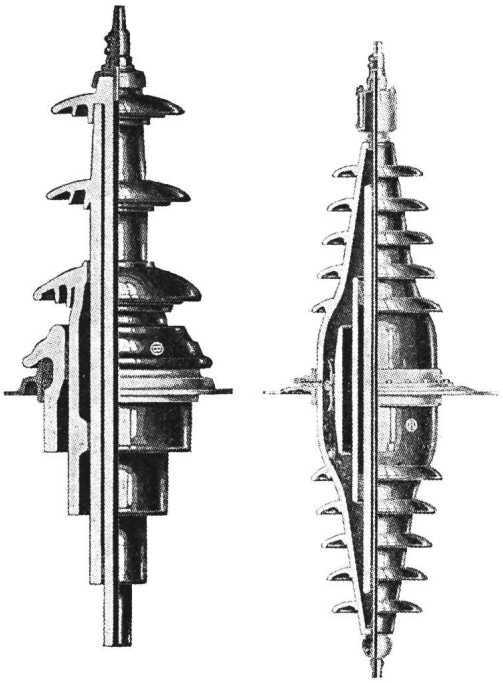


Fig. 8 (links) **Porzellan-Mehrrohrdurchführung Freiluft–Innenraum 88 kV, öllos (Ohio Brass)**

Fig. 9 (rechts) **Ölgefüllte Mehrrohr-Porzellan-Freiluft-Dachdurchführung 120...150 kV mit vorgeschobener Erdelektrode (Ohio Brass) [3]**

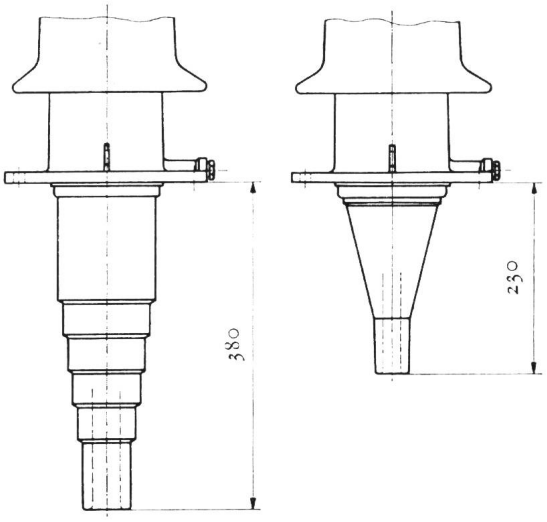
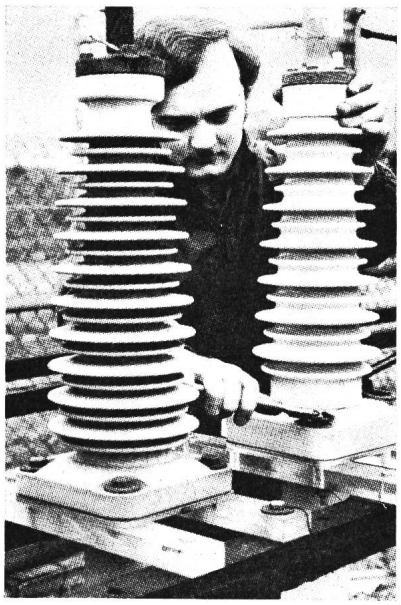


Fig. 10 **Unterteile von 100-kV-Kondensatordurchführungen Luft–Ölraum**
links: Gestuftes Unterteil normaler Länge
rechts: Extrem kurzes Unterteil (Micafil)

Fig. 11
Epoxid-Giessharz-Wanddurchführung (links), 34 kV, neben Porzellandurchführung [24]
Sehr dichte, grosse Schirme zur Kriechwegverlängerung (Westinghouse 1973)



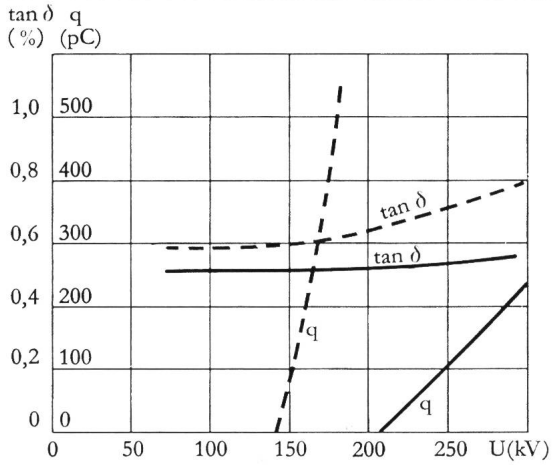


Fig. 13 Verlauf der dielektrischen Verluste und der Teilentladungsintensität in Funktion der Spannung
Kondensatordurchführung 245 kV
Gestrichelt: Superresocel
Ausgezogen: Drysomic (Micafil)

wickelt. Durch das Zusammenspiel zwischen einem neu entwickelten Kunstharz und einer verfeinerten, dem Harz angepassten Auftragstechnik wird ein Harzfilm erzeugt, der, neben einer sehr gleichmässigen Dicke, äusserst porenarm ist. Da nur ein kleiner Bruchteil der Harzschichtdicke zur Klebewirkung benötigt wird, kommt es hier nicht zum Eindringen zwischen die Zellulosefasern der benachbarten Papierschicht. Eine auf das neue Harz und die Geometrie des Wickelns abgestimmte Optimierung der vier Parameter Temperatur, Druck, Papierzug und Wickelgeschwindigkeit trägt dazu bei, dass saubere Trennflächen zwischen Harz und Papier entstehen. Das neue Hartpapier ist weniger anfällig für Haarrisse. Innere Teilentladungen setzen erst bei höher angelegter Spannung ein (Fig. 13) und, was hier wesentlich ist, die durch Teilentladungen verursachten Abbauprodukte sind nichtleitend und beschleunigen den Abbauprozess daher nicht. Die Teilentladungen verschwinden deshalb, sobald die Spannung unter den Einsatzpunkt sinkt. Dies erlaubt eine knappe, wirtschaftliche Bemessung auch dann, wenn Teilentladungsfreiheit bis zur 1,5fachen Betriebsspannung gefordert wird.

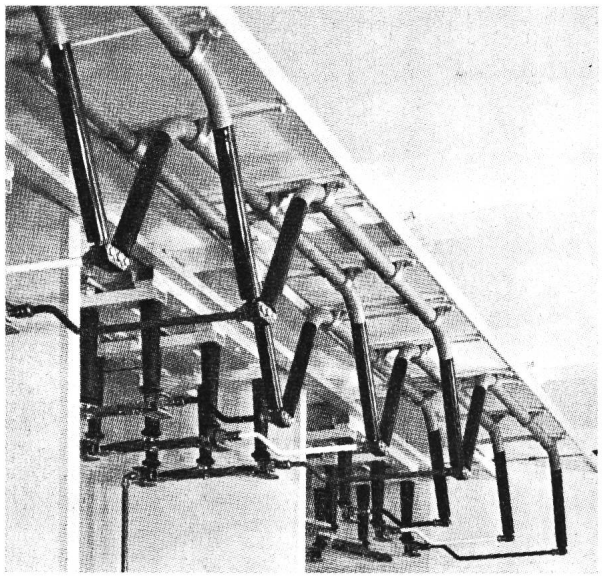


Fig. 12 Duresca Sammelschienen 72,5 kV, $U_p = 140$ kV, $U_s = 325$ kV
Geerdeter Teil der Raumdecke entlanggeführt (Moser-Glaser)

Der dargestellte Fortschritt in der Fertigung eines Hartpapieres beschränkt sich in seiner Auswirkung nun freilich auf das Gebiet der Durchführungen (Fig. 14), da dieser einst so allgemein eingesetzte Isolierstoff heute nicht mehr verwendet wird für Isolierzylinder und Winkelringe, die für Barrieren im Transformatorenbau bestimmt sind.

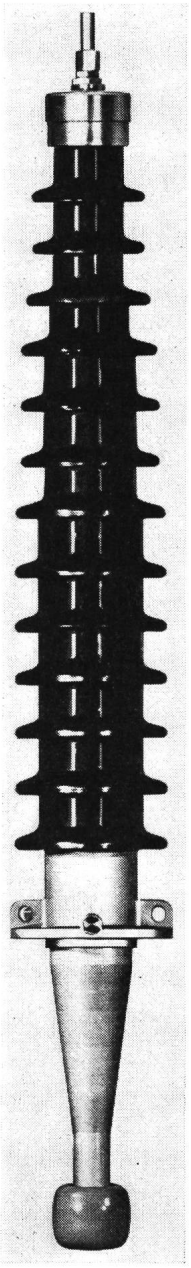
Die Papiere und die Papierwickelmaschinen für Durchführungen haben eine Breite, die für den Höchstspannungsbereich nicht genügt, weshalb eine ingenieuse Technik des Zusammenfügens von Teildurchführungen entwickelt wurde [19]. Auch wird die bereits erwähnte Ölkabeltechnik deshalb besonders für sehr lange Durchführungen mit Verwendung bandförmigen Papiers angewandt (Fig. 15). Ebenso erfolgt die Fertigung der Durescaisolation für Durchführungen und Schienen mit einem bandartigen Harzträger, weshalb deren Längenbegrenzung nur durch die Fabrikationseinrichtungen bedingt ist.

Porzellane hoher Qualität haben ihre Bedeutung für Durchführungen insofern behalten, als sie den Witterungsschutz übernehmen und dabei auch als Behälter für eine Öl- oder Compoundfüllung um den Durchführungskörper dienen.

4. Durchführungen für gekapselte Hochspannungs-Schaltanlagen mit Gasisolation

Über die Durchschlagfestigkeit einiger Gase, darunter auch schon Halogene, wurden 1889 von *Natterer* und in den Jahren 1900...1904 von *Orgler* und *Ritter* experimentelle Studien gemacht. Praktische Anwendungen begannen etwa um 1920. Parallel dazu befasste sich die Forschung eingehend mit dem physikalischen Verhalten von Gasen unter verschiedensten Bedingungen, namentlich auch unter erhöhtem Druck. Die hohe Durchschlagfestigkeit von Druckgasen reizte zu Anwendungen, die aber anderseits durch die damit verbundenen mechanischen Probleme erschwert und verteuert wurden. Unter den frühen Anwendungen findet man Druckluft-Plattenkondensatoren der drahtlosen Telegraphie (1920), Messkondensatoren, statische Voltmeter *(Palm)*, Rie-

mengenerator (*Van de Graaff,* 1943), Vielnadelgleichrichter in Atomforschungsapparat (*Imhof,* 1938), Röntgentransformatoren, in den USA auch Leistungstransformatoren, Spannungswandler (BBC) sowie Phasenschieberkondensatoren mit druckgasimprägniertem Papierdielektrikum. In Amerika wurden etwa ab 1943 verschiedene elektronegative Gase für Hochspannungsisolationen verwendet, vor allem Schwefelhexafluorid SF_6. Dieses erwies sich auch als vortreffliches Löschgas für Leistungsschalter. Ein Durchbruch grossen Stils zur Verwendung von SF_6 fand in Europa etwa um 1960 statt mit der Entwicklung vollgekapselter Hochspannungsschaltanlagen [14; 20]. Ganz allgemein werden hiefür SF_6 und auch eine Mischung von SF_6 und N_2



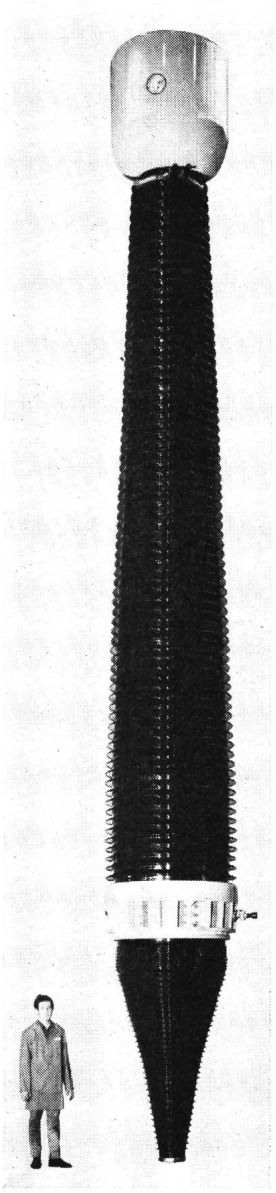


Fig. 14 (links)
Kondensatordurchführung Ölraum–Freiluft 170 kV
Drysomic-Hartpapierisolation mit Porzellanüberwurf als Wetterschutz. Zwischenraum ölgefüllt (Micafil)

Fig. 15 (rechts)
Kondensatordurchführung Ölraum–Freiluft 1200 kV
Ölimprägniertes Papierdielektrikum, sog. Kabelisolation (Micafil)

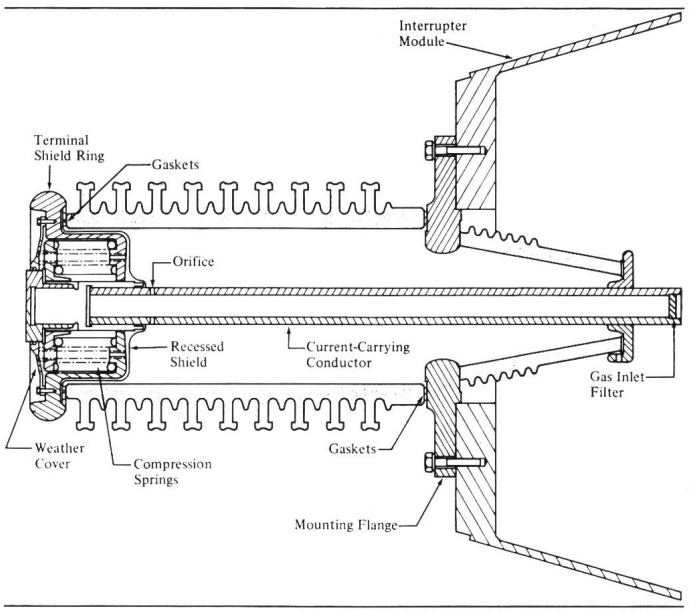


Fig. 16 Porzellandurchführung mit SF_6-Füllung
Stromleitung aus dem Gasraum ins Freie (Westinghouse 1973)

unter einem Druck von 3...4 at verwendet. An Durchführungen solcher Anlagen sind drei Arten zu unterscheiden [21; 22]:

1. Durchführungen aus dem SF_6-Raum erhöhten Drukkes nach aussen, in Luft.
2. Durchführungen aus dem SF_6-Raum in den Ölraum eines Transformators oder Kabels.
3. Durchführungen von einem SF_6-Raum in einen benachbarten SF_6-Raum.

Der erste Fall ist bis etwa zur Nennspannung 220 kV in dielektrischer Hinsicht insofern einfach, als hier auf die Höhe der Spannung nicht der Innenraum der Durchführung begrenzend wirkt, sondern der umhüllende Luftraum, in welchem Gleitentladungen zu meistern sind. Solche Durchführungen bestehen im Wesentlichen aus einem Porzellanmantel mit Schirmen auf der Aussenseite, einem kleineren Porzellan- oder Epoxidharzmantel auf der Innenseite (Fig. 16).
Für noch höhere Spannungen und für den zweiten Fall eignen sich Kondensatordurchführungen, die sowohl öl- wie gasseitig kurz sind. Sie dienen auch der Schottung zwischen den beiden Räumen. Sie bestehen aus Hartpapier oder ölimprägniertem Kabelpapier, in letzterem Fall mit einem umhüllenden Isoliermantel auf der Gasseite. Auch mit SF_6 imprägnierte, aus Polyäthylen oder Polystyrol oder Polypropylenfolien gewickelte Kondensatordurchführungen werden vorgeschlagen [23].

Im dritten Fall dienen die Durchführungen der Abstützung von Konstruktionsteilen und der Schottung gegen den nachbarlichen Gasraum. Sie haben die Form von konischen Scheiben und sind meist aus Epoxidharz gegossen (Fig. 17).

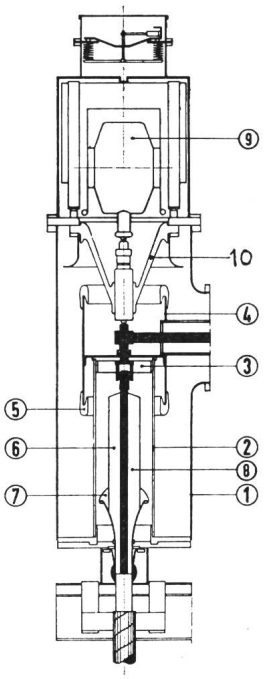
5. Sonderprobleme bei Gleichspannung

Gleichstromübertragungen kommen bei sehr grossen Längen der Hochspannungsleitungen – von etwa 1500 km an aufwärts – in Betracht; sie sind dann wirtschaftlicher als die Drehstromübertragung. Für Durchführungen ergeben sich bei Gleichspannung verschiedene spezifische Probleme [24].

Die betriebsmässige Spannung einer Gleichstrom-Übertragungsleitung besteht aus einer Gleichspannung und einer

Fig. 17
Giessharz-Durchführung in Kabelendverschluss einer metallgekapselten, gasisolierten Schaltanlage [20]

1 metallische Umkapselung
2, 3 Isolierzylinder mit Haube
4, 5 Schirmelektrode mit Wulsten
6 Kabelendisolation aus Papierband
7 Epoxidharzwulst
8 Mineralöl
9 Spannungswandler
10 Giessharzdurchführung (N.V.Coq)



überlagerten Wechselspannung meist sägezahnförmigen Verlaufs. Die Amplituden der Wechselspannung sind in der Regel klein. Dasselbe gilt für die Form der Spannung an den Glättungsdrosseln und den Wanddurchführungen, die zwischen Stromrichter und Glättungsdrossel liegen. Der Spannung an Durchführungen des einen Stromrichter speisenden Transformators und an Wanddurchführungen zwischen Transformator und Stromrichter überlagert sich der genannten Sägezahnkurve eine von den Stromventilen herrührende Rechteckkomponente, deren Amplituden meist mehrfach grösser sind als jene der Sägezahnkurve. Der sehr steile Spannungsanstieg der Rechteckkurve mit etwa 4...10 kV/µs verursacht hohe dielektrische Verluste.

Eine Spannungsbeanspruchung besonderer Art erfolgt bei jedem betriebsmässigen Wechsel des Energieflusses, indem dabei innert sehr kurzer Zeit ein Polaritätswechsel stattfindet. Die Durchführungen erleiden hiedurch einen Spannungssprung gleich der doppelten Nennspannung.

Die Spannungsverteilung in Kondensatordurchführungen erfolgt bei Gleichspannung nicht entsprechend den Kapazitäten der Kondensatorschichten, sondern entsprechend den ohmschen Widerständen. Diese unterliegen Störeinflüssen einesteils infolge der grossen Temperaturabhängigkeit, anderenteils wegen der Spannungsabhängigkeit der Isolationswiderstände. Da sich diese beiden Einflüsse entgegenwirken, erfolgt eine Art Selbstheilung, wodurch sich eine hohe Gleichspannungsfestigkeit ergibt.

Kondensatordurchführungen für Gleichstrom-Übertragungsanlagen zeigen deshalb eine sehr schlanke Bauart und eine besondere Ausbildung der keramischen Schirme. Ihr Leiterquerschnitt wird relativ gross gewählt, damit er sowohl der Ableitung der Stromwärmeverluste wie auch erhöhter dielektrischer Verluste dienen kann, die bei den genannten Spannungskurven auftreten.

Atmosphärische Schmutzablagerungen sind bei Gleichspannung vielfach stärker als bei Wechselspannung und wirken sich auch störender auf die Potentialsteuerung aus. Dies bedingt sehr lange Kriechwege mit vielen Schirmen und Rillen. Für die Prüfung von Gleichspannungsdurchführungen bestehen noch keine Normen.

Literatur

[1] *K. Kuhlmann:* Hochspannungsisolatoren. Arch. Elektrotechn. 3(1915)8/9, S. 203...225.
[2] *A. Schwaiger:* Elektrische Festigkeitslehre. Zweite Auflage. Berlin, Julius-Springer Verlag, 1925.
[3] Ohio Brass Company Mansfield, Catalog 20, 1926...1927. Porcelain insulator section. Mansfield/Ohio, Ohio Brass Company, 1926.
[4] *K. Knörrich* und *A. Koller:* Digitale Berechnung von ebenen und rotationssymmetrischen Potentialfeldern mit beliebigen Randbedingungen. ETZ-A 91(1970)6, S. 339...344.
[5] *H. Böcker* und *K. Reichert:* Digitale Berechnung von elektrischen Feldern in metallgekapselten Anlagen. ETZ-A 94(1973)7, S. 374...377.
[6a] Internationales Symposium Hochspannungstechnik ISH – München 1972. ETZ-A 93(1972)6, S. 309...320.
[6b] Internationales Symposium Hochspannungstechnik Zürich, 9....13. September 1975. Zürich, SEV, 1975. Bd. I/II.
[7] *A. Imhof:* Beitrag zur technischen Berechnung von Kondensator-Durchführungen. Bull. SEV 17(1926)12, S. 586...595.
[8] *L. Dreyfus:* Mathematische Theorien für den Durchschlag fester Isoliermaterialien. Bull. SEV 15(1924)7, S. 321...344.
[9] *A. Imhof:* Geschichte der elektrischen Isolationstechnik, ein Beitrag zur Geschichte der Elektrotechnik. Schweiz. Techn. Zeitschr. 64(1967)1/2, S. 2...43.
[10] *G. Benischke:* Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik. 4. Auflage. Berlin, Julius Springer Verlag, 1918.
[11] *A. Imhof:* Progrès réalisés dans la construction des isolateurs de traversée et particulièrement des isolateurs de traversée type condensateurs. CIGRE 1931, Rapport No. 66, Tome II, p. 224...235.
[12] *H. Kappeler:* Fortschritte im Bau von Kondensator-Durchführungen. Micafil-Nachrichten –(1945), S. 1...6.
[13] *K. Berger:* Der Durchschlag fester Isolierstoffe als Folge ihrer Erwärmung. Bull. SEV 17(1926)2, S. 37...57.
[14] *A. Imhof:* Über neue Konzeptionen und Werkstoffe der Hochspannungstechnik. Schweiz. Techn. Zeitschr. 55(1958)6, S. 93...120.
[15] *C.L. Moore, E.E. Woods* and *P.W. Martincic:* Cast resins find expanding application in transformer bushing insulation. Westinghouse Engineer 33(1973)2, p. 42...45.
[16] *A. Imhof:* Disposition d'ensemble des installations de couplage à barres totalement isolées à l'aide d'un nouveau matériel isolant sec. Règles de disposition. CIGRE 1962, Rapport No. 119.
[17] *A. Imhof:* Teilgeschlossene Hochspannungsschaltanlagen mit besonderer Berücksichtigung der feststoffisolierten Bauweise. Schweiz. Techn. Zeitschr. 61(1964)28, S. 561...577.
[18] *G. Krasser:* Drysomic – ein neuer Trockenisolierstoff. Micafil-Nachrichten –(1976) MNJ-11/14D, S. 1...8.
[19] *H. Kappeler:* 380 kV-Durchführungen. In: Fortschritte der Hochspannungstechnik. Herausgegeben von W.O. Schumann und H. Prinz. Band 2: 380-kV-Drehstromübertragung. Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig K.-G., 1954; S. 179...199.
[20] *A. Imhof:* Vollgekapselte Hochspannungsschaltanlagen. Eine Übersicht. Schweiz. Techn. Zeitschr. 64(1967)8, S. 153...164.
[21] *H. Winter:* Durchführungen für die SF_6-Technik. Micafil-Nachrichten –(1975) MNJ-11/13D, S. 1...8.
[22] *H.U. Nabholz:* Durchführungen für Apparate mit SF_6 als Isoliermedium. ETZ-A 94(1973)7, S. 423...426.
[23] *U. Brand:* Hochspannungsisolierungen mit gasimprägnierten Kunststoff-Folien. Dissertation der Technischen Universität Braunschweig, 1973.
[24a] Modular EHV power circuit breakers simplicity installation while retaining proven reliability. Westinghouse Engineer 33(1973)4, p. 112...118.
[24b] *G. Krasser:* Durchführungen für hohe Gleichspannungen. Micafil-Nachrichten –(1968) MNJ-11/11D, S. 1...7.

Adresse des Autors

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