

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 20 (1929)
Heft: 6

Artikel: Fortschritte der Hochspannungstechnik in den letzten Jahren
Autor: Imhof, A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060759>

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: 17.02.2026

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

- Müller-Hillebrand.* Siemens-Zeitschrift 1927, S. 547.
G. Keinath. 3. Aufl., S. 426.
H. Müller. Hescho-Mitteilungen 1927, Heft 34.
Lee and Foust. General Electric Review, 1927, S. 135–145.
30. *Manfred von Ardenne.* Ein empfindliches Röhren-Voltmeter für Hochfrequenz. E.T.Z. 1928, S. 565.
31. Schweizer Patent No. 110309, Kl. 66a. 1925.
32. Druckschrift der Hermsdorf-Schomburg-Isolatoren G. m. b. H. Die Hescho - Messtange (D.R.P.) zur Ermittlung fehlerhafter Glieder in Isolatorenketten während des Betriebes.
33. *Siegmund Strauss.* Das Röhren-Elektrometer „Mekapion“ für selbsttätige Einzel- und Dauermessungen sowie -Registrierungen. E. & M. 1928, S. 1083.
34. *Fr. Lindenstruth.* Neue Gesichtspunkte für die konstruktive Durchbildung von Schaltwänden und Schaltpulten. E.T.Z. 1928, S. 574.
35. Weitsichtsdarstellung von Messgrössen durch Lichtzeiger. Elektro-Journal 1928, S. 334.

Fortschritte der Hochspannungstechnik in den letzten Jahren.

Von Prof. A. Imhof, Winterthur.

537.2(09)+621.319.37(09)+621.319.34(09)+621.319.4(09) + 621.3(0068)

Der Autor erwähnt die neueren Durchschlagstheorien, macht Angaben über die Isoliermaterialien und geht auf die Hochspannungskabel und ihre Zubehörden ein. Ferner behandelt er die Neuerungen an Durchführungen, Stütz- und Hängeisolatoren und die modernen Einrichtungen von Hochspannungsprüflaboratorien. Am Schluss wird eine Uebersicht über die einschlägige Literatur gegeben.

L'auteur mentionne les théories modernes sur la décharge disruptive, donne des indications sur les matières isolantes, puis passe aux câbles à haute tension et à leurs accessoires. Il traite ensuite les innovations apportées aux traversées, aux isolateurs d'appui et de suspension pour lignes aériennes, enfin les installations modernes des laboratoires d'essai à haute tension. L'article se termine par une liste d'ouvrages et d'articles relatifs à ce domaine.

Die Bezeichnung „Hochspannungstechnik“ ist eine sehr allgemeine, sie umfasst ausser den Hochspannungs-Isolatoren und -Kabeln auch viele Maschinen und Apparate. An dieser Stelle müssen wir das Thema enger begrenzen, da den genannten Einzelgebieten der Elektrotechnik im Bulletin des S.E.V. besondere Ueberblicke gewidmet sind. Wir befassen uns in der Hauptsache mit Fortschritten in konstruktiver Hinsicht und insbesondere mit den Grundelementen der Hochspannungsanlagen, Maschinen und Apparaten, wie Kabel, Durchführungen, Stützisolatoren, Hochspannungs-Isolierstoffen, Prüfvorrichtungen der Laboratorien und Spezialfabriken. Neuerungen der Hochspannungs-Messtechnik sind im ersten Artikel dieser Nummer behandelt.

1. Forschungsarbeiten über den elektrischen Durchschlag.

Auf diesem Gebiete herrschte in den letzten Jahren eine rege Tätigkeit. Die Wagnersche Wärmetheorie¹⁾ mit Annahme leitend werdender Kanäle im Dielektrikum hat einer allgemeineren Erkenntnis Platz gemacht, dass auch ein Wärmedurchschlag stattfinden kann, wenn keine Unhomogenitäten im Material bestehen, dass aber auch in vielen Fällen ein Ionisationsdurchschlag erfolgt. Der neueren Wärmetheorie liegt folgende Idee zu Grunde: Die an den Isolator angebrachte Spannung ruft in ihm dielektrische Verluste hervor, wobei eine entsprechende Wärmemenge ausgeschieden wird. Die dadurch verursachte Erwärmung hat eine Vergrösserung der Verluste zur Folge, was eine erhöhte Ausscheidung von Wärme und ein weiteres Anwachsen der Temperatur des Isolators bedingt. Wird der Isolator von aussen gut gekühlt und ist die angelegte Spannung nicht allzu hoch, so kann sich ein stationärer Zustand einstellen, bei dem die ganze im Isolator ausgeschiedene Wärmemenge nach aussen abgeleitet wird und keine weitere Temperaturerhöhung stattfindet. Im Gegenfalle wächst die Temperatur unbegrenzt und der Isolator wird durchschlagen. Bei gegebenen Abkühlungsverhältnissen gibt es stets eine kritische Spannung, bei welcher der geschilderte Wärmedurchschlag erfolgt.

¹⁾ Literaturnachweise sind am Schluss des Aufsatzes zusammengestellt.

Dessen Vermeidung bietet für die technische Praxis im allgemeinen mehr Schwierigkeiten als der Ionisationsdurchschlag. Dieser tritt ein, wenn der Isolierstoff rasch einer sehr hohen Feldstärke ausgesetzt wird, wodurch die Moleküle zerrissen werden. Speziell bei kristallinen Isolatoren stellt man sich nach Rogowski vor, dass die Kristallgitter-Systeme durch das Feld auseinander gerückt werden und schliesslich zerreißen. Fördernd wirken hiezu vorhandene Spaltensysteme, die einerseits die Zerreissfestigkeit des Stoffes herabsetzen und anderseits den Ionen ermöglichen, die nötige Geschwindigkeit bei schwächerem Feld zu erlangen.

Paul Böning sucht eine Durchschlagstheorie der Kolloide, aus denen die meisten praktischen Isolierstoffe bestehen, aufzustellen und leitet daraus die Durchschlagsfunktion ab. Sie gründet sich auf die Erfahrungstatsache, dass die Leitung in Isolierstoffen elektrolytischer Natur ist. Hieraus wird abgeleitet, dass sich in den Stoffen elektrolyterfüllte Kanäle bilden müssen. Auch wird die Tatsache der Ionenadsorption an Grenzflächen herangezogen, die besagt, dass an der Grenze zwischen zwei Medien, von denen das eine dissociierte Ionen enthält, ein Teil der Kationen oder Anionen adsorbiert wird (genannt Grenzionen), während der gleiche Teil der Ionen entgegengetzten Vorzeichens (Ergänzungionen) frei bleibt. Unter dem Einfluss einer Gleichspannung werden die elektrolytischen Ionen Träger eines elektrischen Stromes zwischen den Elektroden. Der Kanal bedeutet einen Nebenschluss zum Kondensator, macht ihn also unvollkommen und gibt zur Wärmeentwicklung Anlass. Die freien Ergänzungionen werden durch die Feldkräfte ausgeschieden. Die Grenzionen verbleiben bis zu einer gewissen Feldstärke an ihrem Ort, aber bei Ueberschreitung eines gewissen Wertes erfolgt der Durchschlag, d. h. ein plötzlicher Durchbruch der Grenzionen durch den Kanal mit grosser Wärmeentwicklung.

Böning findet die an verschiedenen Dielektrika wie Glimmer, Mikanit, Hartpapier, Gummi experimentell bestätigte Spannungsverteilungsfunktion

$$U = ad + \frac{\beta}{2} d^2$$

$$U = ad - bd^2$$

(U = Potentialdifferenz, d = Dicke des Dielektrikums, a , β , a , b = Konstanten).

Rogowski hat im Jahre 1926 auf Schwierigkeiten hingewiesen, welchen die bisher allgemein anerkannte Townsendsche Theorie des Gasdurchschlages bei Stossspannungen begegnet, da der Durchschlag in Wirklichkeit 100 bis 1000 mal rascher vor sich geht, als nach der Townsendschen Theorie zu erwarten wäre. 1928 bestätigt er seine Einwände des bestimmtesten und weist noch weitere Schwierigkeiten nach, so dass also die Theorie in grundlegenden Annahmen abgeändert werden muss.

Als Namen, die mit den Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet eng verknüpft sind, nennen wir u. a. Rogowsky, Wagner, Günther-Schulze, Joffé, Schumann, Semenoff, Walther, Dreyfus, V. Fock. Eingehende Quellenangaben enthält das Buch „Die physikalischen Grundlagen der elektrischen Festigkeitslehre“, von Semenoff und Walther; die meisten Arbeiten wurden im Archiv für Elektrotechnik publiziert.

2. Isolierstoffe.

Die Fabrikation der Isolierstoffe hat in den letzten Jahren eine viel wissenschaftlichere Behandlung erfahren. Man begann mit der systematischen Klassifikation; in einigen Staaten wurden normale Prüfvorschriften erlassen, um vergleichende Daten zu bekommen.

In immer vermehrtem Masse kamen Kunstharze zur Verwendung. Die Hartpapiertechnik erfuhr Fortschritte im Sinne grösserer Vergleichmässigung des Materials, besserer Anpassung an die einzelnen Verwendungszwecke, Verkleinerung der dielektrischen Verluste und deren Temperaturabhängigkeit, Vergrösserung der Wärmeleitfähigkeit. Besonders die schweizerische Industrie hat sich in dieser Hinsicht keine Opfer scheuen lassen. Die Porzellantechnik hat die elektrotechnischen

Porzellane ausserordentlich eingehend untersucht und hierdurch Verbesserungen des Materials wie der Konstruktion ermöglicht. Sehr interessante Angaben hierüber enthalten die „Mitteilungen der Hermsdorf-Schomburg-Isolatoren G. m. b. H.“, 1928, Heft 39. Die Zugfestigkeit ist gegenüber älterem Porzellan wesentlich erhöht worden, weshalb auch erst die sog. durchschlagsicheren Freileitungs-Isolatoren Erfolg haben konnten. Der Einfluss der Glasur auf die mechanischen Eigenschaften wurde systematisch studiert und als ganz erheblich befunden. Weitere keramische Stoffe vermochten sich mehr und mehr einzuführen, so Steatit mit seinem geringen Schwindmass und hervorragenden mechanischen wie elektrischen Eigenschaften, dann aber auch Steinzeug, das sich aus fabrikationstechnischen Gründen, insbesondere für grosse Isolierstücke eignet. Begreiflicherweise noch vorhandenem Misstrauen wird durch sehr detaillierte Messresultate seitens der massgebenden Firmen entgegengetreten.

Für Isolieröle bestehen auch in der Schweiz seit dem Jahre 1925 Prüfnormen. Zur Reinigung kam als neueres Mittel mehr und mehr die Zentrifuge zur Anwendung.

Zahlreiche experimentelle Untersuchungen vermehrten die Kenntnisse über das Oel als Dielektrikum. U. a. sei auf die sehr eingehenden Arbeiten „Untersuchungen über Spitzenentladungen in Transformatorenöl“ von A. Nikuradse und „Die Durchschlagsspannung zwischen scharfen Kanten unter Oel“ von Fr. Wöhr hingewiesen. Letztere Arbeit bietet der praktischen elektrischen Festigkeitsrechnung wertvolle Resultate.

Charakteristisch ist für die neueste Zeit, dass endlich reichhaltiges Zahlenmaterial über die Isolierstoffe bekannt wird. Erschwerend wirkt allerdings der Umstand, dass hierin weit grössere Streuung beobachtet wird, als im allgemeinen bei Metallen.

3. Hochspannungskabel²⁾.

Sehr grosse Fortschritte hat die Kabeltechnik zu verzeichnen. Die Anwendung von Hochspannungskabeln, insbesondere für Nennspannungen von 50 kV an aufwärts, hat stark zugenommen. Kabel für 150 kV sind aus dem Versuchsstadium herausgewachsen. Es war in erster Linie ein intensives, stets durch Messungen begleitetes Studium des Isoliermaterials, das zum Erfolg führte. Geeignete Papiere wurden ausgesucht, die Oele und Harze raffiniert, die Verfahren zur Entfeuchtung und Imprägnierung verbessert. Als wichtigstes Kriterium für die Qualität hat man

²⁾ Einen vortrefflichen Ueberblick über die heutige Kabeltechnik bietet der Artikel „Hochspannungskabel“ von P. E. Schneeberger in der Schweizerischen Technischen Zeitschrift 1927, Nr. 38. S. 614.

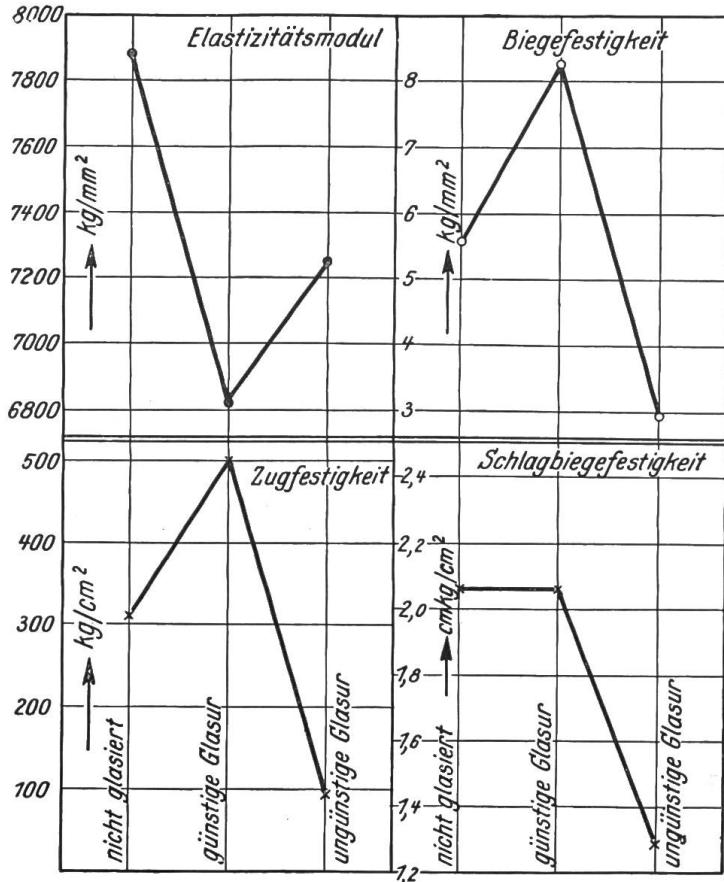


Fig. 1.
Einfluss der Glasur auf einige mechanische Eigenschaften von Porzellanisolatoren.

den Verlauf des Verlustwinkels in Funktion der Spannung erkannt (Fig. 2). Jeder Knick in der Kurve deutet auf eine Ionisationserscheinung im Dielektrikum hin.

Sorgfältig ausgewählte Papiere mit radial abgestufter Dichte ergeben eine bessere Ausnützung des Isolierstoffes. Durchschlagsversuche ergaben Durchbruchs-

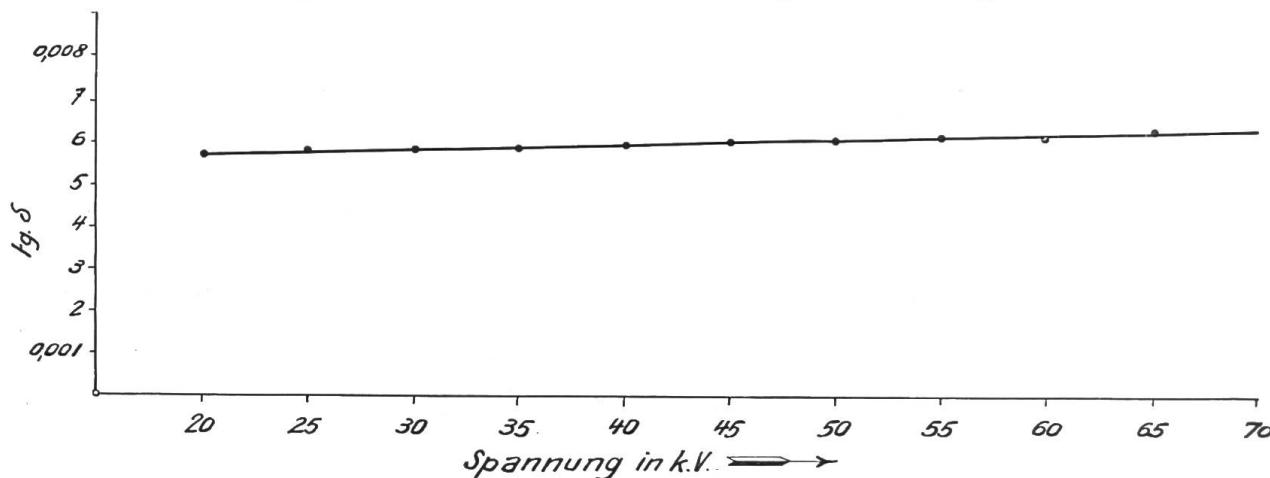


Fig. 2.
Dielektrischer Verlustwinkel eines Einleiterhochspannungskabels in Funktion der Spannung.

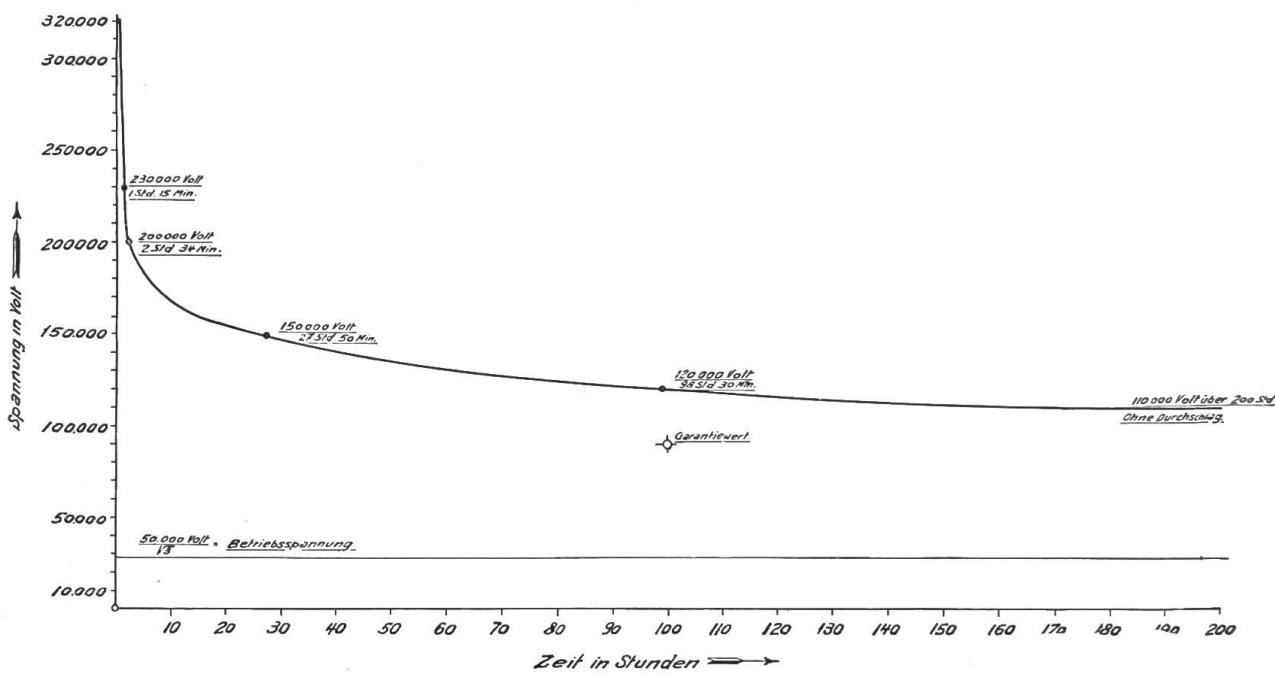


Fig. 3.
Zeit-Durchschlagskurve, aufgenommen am Kabel der Fig. 2.

feldstärken von mehr als 300 kV/cm eff. bei einer Steigerung von 20 kV pro Minute.

Die Firma Pirelli führte das ölfüllte Röhrenkabel für 132 kV Betriebsspannung ein. Deren Dielektrikum wird mit dünnem Öl imprägniert und ständig unter einem gewissen Oeldruck belassen, damit sich eventuelle Hohlräume sofort wieder mit Öl füllen. Der Oelzufluss erfolgt durch den Leiter, der mittels einer Spiralfeder rohrförmig gestaltet wird.

Das Bestreben, das Dielektrikum des Kabels besser auszunützen, hat Silbermann dazu geführt, durch Einfügen von Kondensatorbelegen die Isolation zu unterteilen (Fig. 4). Um die Feldstärke in der Leiternähe nicht zu hoch werden zu lassen, fällt der Leiterdurchmesser verhältnismässig gross aus. Zur Vermeidung unnötiger

Kupfermengen wählt man einen rohrförmigen Querschnitt und füllt den Innenraum mit einem geeigneten Material, wie Jute oder drgl. aus. Während ein normales Kabel aus einem Kondensator mit Kupferleiter und Bleimantel als Beläge besteht, ist hier der Leiter beidseitig mit Isolation umhüllt. Der nächstliegende Innenkondensator wird parallel zum nächstliegenden Ausenkondensator geschaltet, der zweitnächste innere mit dem zweitnächsten äussern usf. So wird eine Serie ungefähr gleichgrosser Kapazitäten gebildet. Die Verbindungen sind in die Endverschlüsse verlegt.

Wesentliche Verbesserungen haben auch die Drehstromkabel erfahren. Nach Höchstetter werden die drei einzelnen, verseilten Kabel vor der Verseilung mit einer dünnen, leitenden Hülle umgeben, wodurch die Füllzwinkel elektrisch entlastet werden und die elektrischen Felder so verlaufen wie in Einphasenkabeln. Damit wäre prinzipiell kein Unterschied mehr zwischen der möglichen Höchstspannung für Dreileiter- und Einleiterkabel, wenn nicht das Dreileiterkabel bei dicken Isolierschichten zu unbiegsam würde. Eine ältere Idee wurde wieder aufgenommen durch Weglassung des gemeinsamen Bleimantels und Umgebung jedes Einzelkabels mit einem besonderen Bleimantel. Dieser wird gerillt, um ihn ohne Einbusse an Festigkeit dünn erhalten zu können. Eine Verbesserung des H-Kabels stellt das SO-Kabel (nach Sonnenfeld) der Kabelfabrik A.-G. Bratislava dar, indem die runde Form des Bleimantels durch eine im wesentlichen polygonale, bei 3 Leitern dreieckige Form ersetzt wird. Die Zwickel werden so auf ein Minimum reduziert und auch an Isolierpapier, Öl und Blei wird einiges gespart. Die Wärmeableitung ist günstiger, weil ein Teil der Stromlinien verkürzt ist. Die Strombelastbarkeit ist gegenüber Rundkabeln um 3 bis 6 % erhöht, die Gewichtsverminderung beträgt etwa 6 bis 15 %, die Biegsamkeit ist erhöht.

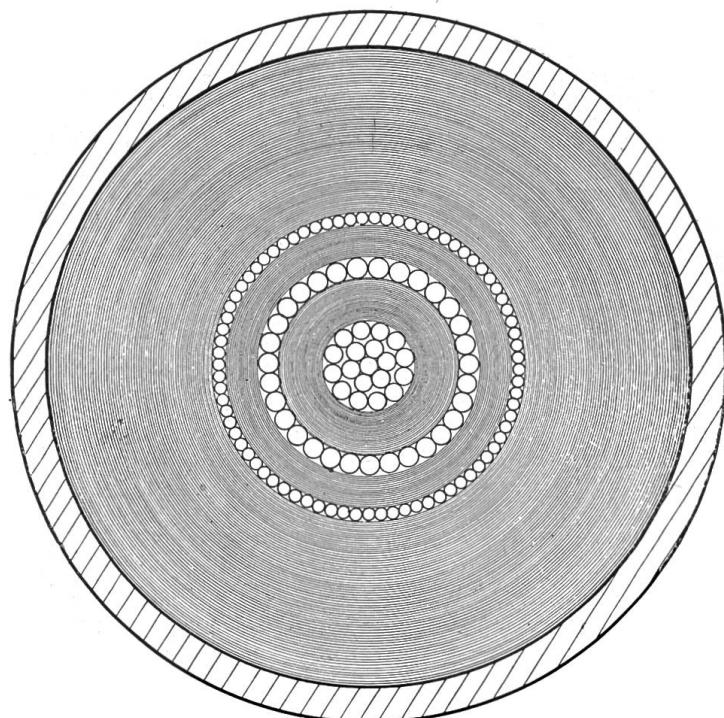


Fig. 4.
Kabelquerschnitt System Silbermann. $1 \times 100 \text{ mm}^2$;
Betriebsspannung 132 kV.

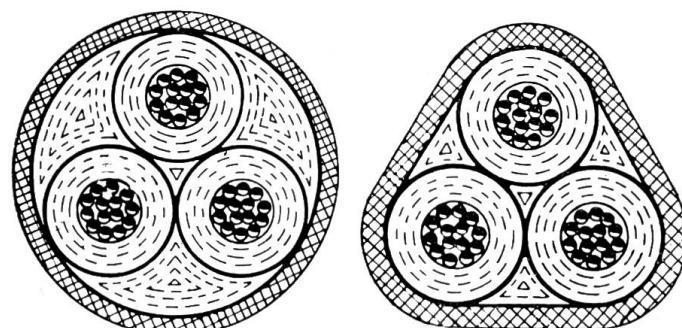


Fig. 5.
H-Kabel in runder und in SO-Bauart.

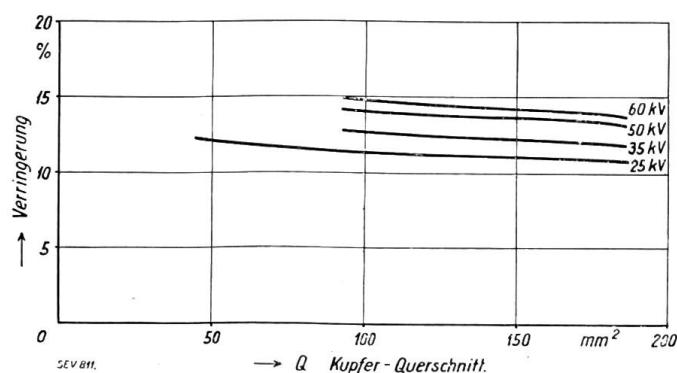


Fig. 6.
Gewichtsverminderung an unarmierten (keine Eisenarmierung) H-Kabeln bei Anwendung des SO-Prinzips.

Die Muffenkonstruktionen, welche jahrelang das Sorgenkind des Kabelfabrikanten waren, konnten in letzter Zeit sehr verbessert werden. Die Betriebssicherheit einer mit der nötigen Sorgfalt gebauten Muffe ist nicht geringer als diejenige



Fig. 7.

Herstellung einer Wickelmuffe in einem Wickelkasten an einem 50 kV Kabel für die Kraftwerke Oberhasli A.-G.



Fig. 8.

Montage der Kabelendverschlüsse an 50 kV Kabeln der Kraftwerke Oberhasli A.-G.

des Kabels. Bekanntlich werden in Hochspannungskabelanlagen nur noch Wickelmuffen eingebaut. Bei dieser Muffenart wird die Kabelisolation abgestuft und für beide Kabelenden rekonstruiert. Dadurch erhält man ein dem Kabel analoges Dielektrikum und infolgedessen günstige elektrische Beanspruchungen. Wichtig ist bei dieser Muffenkonstruktion, dass Feuchtigkeitseinschlüsse möglichst vermieden werden. Eine neue Anordnung der Montage wurde bei den 50 kV Kabeln im

Stollen zwischen Handeck und Guttannen der A.-G. Kraftwerke Oberhasli, Inertkirchen, angewandt. Die von Hand ausgeführte Rekonstruktion des Kabeldielektrikums erfolgte, nach Vorschlägen von E. Schneberger, Brugg, in einem Wickelkasten (Fig. 7). Durch elektrische Beheizung und wenn notwendig Spülung mit Trockenluft ist es möglich, die Luftfeuchtigkeit auf ein unschädliches Mass herunterzubringen. Diese neue Montageanordnung wurde durch das Laboratorium der Kabelwerke Brugg A.-G. entwickelt und ausgeführt.

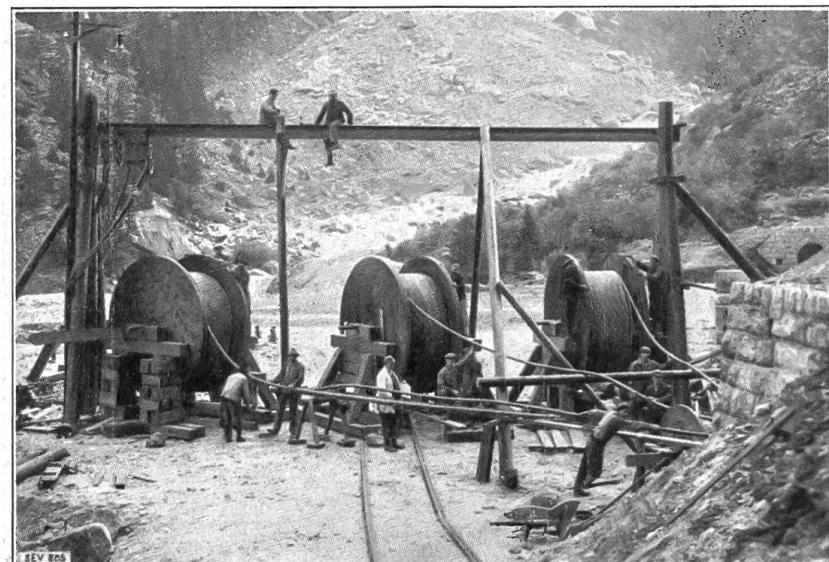


Fig. 9.

Verlegungsarbeiten für die 50 kV Dreiphasenkabelanlage Handeck-Guttannen der Kraftwerke Oberhasli A.-G. Streckenlänge 5,2 km; Kabellängen ca. 900 m; Querschnitt 180 mm²; Lieferung durch K. W. Brugg und Felten & Guilleaume, je zur Hälfte.

Auch die Endverschlüsse (Fig. 8) haben eine Weiterentwicklung durchgemacht. Auf günstige Feldverteilung im Innern des Isolators, d. h. am Kabelanschnitt (Konusbewicklung) sowie am Isolator selbst, wurde grosses Gewicht gelegt. Der Entlastung des Isolators dient das Verfahren nach Prof. Imhof zur Vermeidung von Glimm-Erscheinungen am Flansch als der elektrisch am stärksten beanspruchten Stelle.

Eine interessante Darstellung aus den Verlegungsarbeiten der 50 kV Kabel der Kraftwerke Oberhasli A.-G. gibt Fig. 9.

Ueber die neueren Tendenzen der Kabelprüfung geben die Referate anlässlich der 4. Tagung der Conférence Internationale des Grands Réseaux électriques à haute tension 1927 (siehe z. B. den trefflichen Bericht hierüber von Dr. K. Konstantowsky in E. u. M. 1927, Heft 40, S. 831 „Neuerungen auf dem Gebiete der Isoliermittel-Technik“) Aufschluss. Ausser der meist üblichen Spannungs- und Verlustwinkel-Prüfung, ferner der Biegeprobe, wurde von Proos nachgewiesen, dass die Zeit-Spannungscharakteristik namentlich noch zur Erkennung der mechanischen Qualität notwendig sei. In Weiterverfolgung eines Vorschlages von Soleri schlug Delon vor, durch Extrapolation der Zeit-Spannungscharakteristik die unendlich lange ertragene „Grenzspannung“ zu ermitteln. Aus dem Verhältnis von Betriebsspannung zu Grenzspannung ergibt sich die „Sicherheit“ des Kabels. Zur Untersuchung aller die Prüfung von Hochspannungskabeln angehenden Fragen wurde ein Komitee eingesetzt.

4. Durchführungen.

Die letzten Jahre brachten auch den *Durchführungs-Isolatoren* eine grosse Entwicklung. Mehr und mehr haben sich die speziellen Fabriken für Isolationstechnik dieses Gebietes angenommen. Gegenüber dem Kabelbau ist insofern eine Erleichterung vorhanden, als man in der Dicke des Dielektrikums weniger beschränkt ist, eine Erschwerung aber durch das Randproblem und die Forderung, dass auch heisses Oel als umgebendes Medium vorhanden sein kann, ferner dass kein die Feuchtigkeit abhaltender Bleimantel möglich ist. Vor allem hat eine Entwicklung zu höherer Nennspannung, bis 220 kV, stattgefunden, ja zu noch weit höhern Spannungen für Prüfzwecke. Die Porzellan-Fabrik Hermsdorf beispielsweise hat für ihren Versuchsraum die bisher grössten Porzellan-Wanddurchführungen für 500 kV gegen Erde erstellt. Diese besitzen ohne Armierung eine Länge von 5,3 m, ein Porzellangewicht von 1300 kg, einen Innendurchmesser der Mittelstücke von 750 mm. Die mit Ausgussmassen gefüllten Durchführungen machten, wenigstens für hohe Spannungen, in steigendem Masse den Oeldurchführungen Platz, da die Masse wegen Hohlraumbildungen, Sprengungen bei Erwärmung und Feuersgefahr viele Unzuträglichkeiten bot. Durch genügende Dimensionierung, Verwendung von ins Oel vorgeschobenen, am Rande gerundeten Fassungselektroden, zum Teil auch durch Verwendung metallischer Einlagen nach dem Nagelschen Kondensatorprinzip, wurden die Oeldurchführungen hoch entwickelt und stehen bereits bis zu Nennspannungen von 220 kV im Betrieb. Eine stark vermehrte Aufmerksamkeit wurde aber in den letzten Jahren besonders den Kondensatordurchführungen gewidmet, die im Durchmesser erheblich kleiner sind und für den Transport bequemer. Die Fortschritte betreffen hierin in erster Linie eine wesentliche Verbesserung des Hartpapieres (Kunstharzpapier) im Sinne kleinerer dielektrischer Verlustwinkel, kleinerer Temperaturabhängigkeit desselben und gröserer Wärmeleitfähigkeit, ferner auf Grund vieler Prüfresultate sorgfältig erwogener Dimensionierung, Verwendung verschiedener kleiner Kunstgriffe in der Potentialsteuerung radial und axial. Durch Porzellanhauben über dem Oberteil werden solche Durchführungen mit gutem Erfolg auch für Freiluftgebrauch gebaut. Der Zwischenraum zwischen dem eigentlichen Isolatorkörper und der Porzellanhülle wird mit einer elastischen, isolierenden Ausgussmasse gefüllt, die hier nur den Zweck hat, vor Kondenswasser zu schützen, während die Masse elektrisch sehr wenig belastet ist.

Mehrmals sind Vorschläge gemacht worden, Durchführungen für hohe Spannungen zu kühlen, sei es durch Unterteilung in mehrere konzentrische Teilsolatoren oder durch Unterteilung derart, dass die Trennfugen die Form einer Kegelfläche mit gerader oder gekrümmter Seitenlinie haben und in den Trennfugen zur Kühlung Oel zirkulieren kann. Nach den einen Vorschlägen soll das Oel durch den Beitritt der wärmeren Schichten in Bewegung geraten, bei andern durch künstlichen Antrieb.

Einzelne Vorschläge gehen dahin, den zentralen Stromleiter zu kühlen durch Umgebung mit einer Oelschicht oder einer leicht verdampfbaren Flüssigkeit, welche mit der Atmosphäre in Verbindung steht (U.S.A. Pat. 1567201, 1925). Endlich wird noch vorgeschlagen, den Uebertritt der Wärme vom heissen Transformator-Oel in den Klemmenkörper durch Wärmeschutzschichten zu verzögern. Aber kaum eine dieser etwas gesuchten Massnahmen hat sich praktisch in erheblicherem Umfange eingeführt.

Aehnlichen Problemen wie bei Durchführungen begegnet man bei den Hochspannungskabel-Endverschlüssen. Man macht im allgemeinen mit massegefüllten Endverschlüssen gute Erfahrungen. Einsteils sind eben hier die Temperaturgrenzen wesentlich engere als bei Transformator-Durchführungen, ferner dimensioniert man gewöhnlich verhältnismässig gross.

Auch Durchführungen ganz aus Porzellan werden für viel höhere Spannungen gebaut, als dies früher der Fall war. Zum Beispiel berichten die Hescho-Mitteilungen 1926 29/30 von Mehrrohrdurchführungen, sowohl für Innenräume wie für Freiluftaufstellung, die aus koaxialen Porzellanteilen bestehen, für Nennspannungen von 100 kV; der Katalog 1926/27 der Ohio Brass Co. enthält vierteilige Durchführungen ganz aus Porzellan für 88000 V Nennspannung, ferner Oeldurchführungen für 220 kV, die ausser dem umhüllenden Porzellan drei koaxiale Porzellanröhren enthalten.

5. Stütz- und Hängeisolatoren für Freileitungen.

Die Formen der Stützisolatoren aus Porzellan, die früher unzählige Änderungen erfuhren, sind einigermassen endgültig geworden. Es bleibt beim sog. Delta-Isolator; Fig. 10 zeigt ein typisches Beispiel. Bis zu 35 kV sind in Deutschland hiefür VDE-Normalformen herausgegeben worden. Für hohe Spannungen ist der

Weitschirm-Isolator am gebräuchlichsten geworden, z. B. nach Fig. 11. In Deutschland ist das Zutrauen zu Spezialkittung, wie der Permanitkittung oder dem amerikanischen sog. Sandungsverfahren nicht allzu gross, da genügend lange Betriebserfahrungen fehlen, weshalb mehrteilige Isolatoren neuerdings zusammengehanft werden, indem

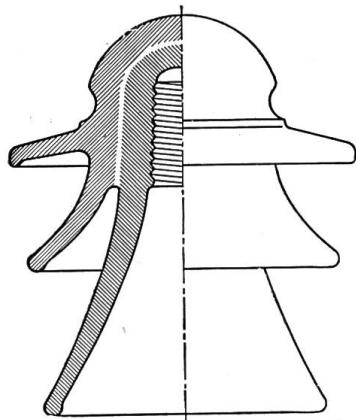


Fig. 10.
Delta-Isolator.

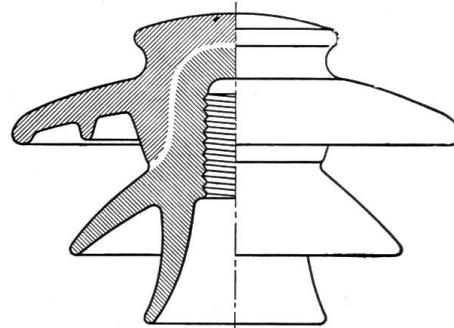


Fig. 11.
Weitschirm-Isolator.

der äussere mit Gewinde versehene Teil auf den umhüllten inneren Teil geschraubt wird (bis zu Trockenüberschlagsspannungen von etwa 180 kV). Namentlich aber ist es gelungen, nun auch dicke Porzellanscherben einwandfrei herzustellen, so dass auch grössere Isolatoren einteilig ausgeführt werden, so z. B. Weitschirm-Isolatoren bis zu einer Trockenüberschlagsspannung von 157 kV. Eine starke Tendenz besteht in der Herstellung sog. durchschlagsicherer Isolatoren, bei welchen die eiserne Stütze nicht tief in den Isolator hinauf ragt, oder sogar der Isolator massiv ausgeführt und durch eine Fussarmatur befestigt wird. Mit andern Worten, man bildet den Freileitungs-Isolator, abgesehen von der Oberflächenform, nach gleichen Prinzipien aus wie den Innenraumstützer, den man quasi mit Regenschutz-Dähern versieht (nach Hescho-Katalog bis 104 kV Trockenüberschlagsspannung). Derselbe besitzt weitausladende Ränder, wodurch ein grosser Regenüberschlagsweg zwischen Stütze und Leitungsdrähten erreicht wird. Die Umrisse des Isolatorkernes fallen angenähert in die Richtung der Kraftlinien, während die Regenschutzmäntel in die Aequipotential-

tialflächen fallen. Hierdurch werden Ueberbeanspruchungen der Luft in den Hohlräumen zwischen den Mänteln vermieden, so dass die Entladeerscheinungen erst kurz vor dem Lichtbogenüberschlag einsetzen.

Ganz allgemein haben sich aber für Spannungen über etwa 50 kV die Kettenisolatoren durchgesetzt, ja sogar für weit kleinere Spannungen sind sie vielfach üblich geworden. Die letzten Jahre brachten keine wesentlichen Neukonstruktionen, aber mehr und mehr konnte auch hier die Abneigung gegen das Kitten bemerkt werden, so dass sich kittlose Konstruktionen, wie der Kugelkopf- und V-Ring-Isolator, stark eingeführt haben. In steigendem Masse werden die durchschlagsicheren Motor-Isolatoren bevorzugt. Die Zugfestigkeit des Porzellans ist dermassen erhöht worden, dass man gegen Zugbeanspruchungen, wie sie hier auftreten, nicht mehr ängstlich ist. In die letzten Jahre fallen die Bestrebungen, für Spannungen von 10 bis 35 kV Kleinhänge-Isolatoren zu verwenden.

Seitdem stark quarzhaltige Gläser (Pyrexglas), die durch sehr kleinen Ausdehnungskoeffizient gekennzeichnet sind, in die Technik Eingang finden, werden wieder Anstrengungen zur Einführung von Glasisolatoren gemacht, in Europa namentlich durch Italien und Frankreich. Deren Formen sind von den Porzellan-Isolatoren übernommen worden. Die Wirkung und richtige Gestaltung der Schutzhörner ist sehr eingehend untersucht worden.

6. Prüfvorrichtungen.

Mehrere sehr bemerkenswerte Hochspannungs-Prüflaboratorien sind während der letzten Jahre entstanden. Den Prüfvorrichtungen ist vermehrte Aufmerksamkeit geschenkt worden. Schon die von der Firma Haefeli & Co. A.-G. gebauten Lufttransformatoren sind aus der Erwägung entstanden, dass Oelkessel und Durchführungen bei sehr hohen Spannungen unverhältnismässig gross und teuer werden. Während die Haefely-Transformatoren einzylindrige Wicklungen besitzen, wurden von der Hochspannungs-Apparate A.-G., Köln, nach Fischer interessante Lufttransformatoren gebaut, gekennzeichnet durch Anbringung der Wicklungen auf mehreren koaxialen Zylindern, die durch Luftdistanzen getrennt sind und deren einzelne Wicklungen nach aussen schrittweise kürzer gehalten sind, nach Art der Beläge von Kondensatordurchführungen. Die Wicklungszyliner des einen Kernes sind durch horizontale Verbindungen mit solchen des andern in Serie geschaltet. Prüftransformatoren erheblicher Leistung, die besonders wenig Raum einnehmen, sind von der A.-G. Brown, Boveri & Co. herausgebracht worden, und zwar in Einheiten bis zu 750 kV. Deren Eisenkern ist in Luft, die Wicklungen befinden sich in Oel, als Behälter dienen aber Hartpapierkessel, deren absolute Oeldichtung einwandfrei gelungen ist. Mit den ersten dieser Transformatoren sind in der Schweiz das Prüflokal der Micafil A.-G. (Fig. 12) und das Apparate-Versuchslkal der A.-G. Brown, Boveri & Co., Baden ausgerüstet.

Ueber die Hochspannungs-Messvorrichtungen wurde andernorts berichtet.

Für die Prüfung von Freileitungsisolatoren, Transformatoren usf. kamen auch in Europa vielfach Hochfrequenz- und Stossspannungs-Prüfvorrichtungen zur Anwendung. Die Isolierprodukte organischer Natur werden immer allgemeiner durch Messung der dielektrischen Verluste als wichtiges, wenn auch nicht vollständiges Kriterium, geprüft.

Die Porzellanfabrik Hermsdorf-Schomburg hat neuerdings eine Prüfmaschine gebaut, mit welcher Längs-, Quer- und Torsionsschwingungen der verschiedensten Isolatoren und Isolatorketten, mit 10 bis 1000 Schwingungen pro Minute, erzeugt werden können. Dabei lassen sich die Prüfstücke noch auf Zug und elektrisch beanspruchen. Dieselbe Firma hat eine Prüfkammer zur Untersuchung von Isolatoren bei starker Verschmutzung geschaffen.

Vereinzelt haben auch verschiedene experimentelle Methoden zur Bestimmung der statischen Feldverteilung Anwendung gefunden, so die Strohhalm- und Neonröhren-Methode, die elektrolytische, die Sonden- und die Kapazitätsmethode.

Zur Vornahme von Durchschlagsmessungen ohne Ueberlastung der Elektrodenränder wurde von E. Marx ein Verfahren vorgeschlagen, das auf der dem Druck proportionalen Zunahme der elektrischen Festigkeit flüssiger Isolierstoffe beruht. Die Prüfkörper und Elektroden werden in die unter Druck stehende Flüssigkeit gebracht.

7. Hochspannungsisolation elektrischer Maschinen.

Die Hochspannungsisolationen an Maschinen haben in letzter Zeit nicht viele wesentliche Änderungen erfahren. An Transformatoren haben sich die Schutzringe als Abschluss der Wicklungen gegen die Abstützungen hin allgemeiner eingeführt. Zur erheblichen Einsparung an Eisen- und Oelgewicht wurden die bei amerikanischen Konstruktionen bereits seit Jahren bekannten Hartpapierringe vielfach eingeführt.

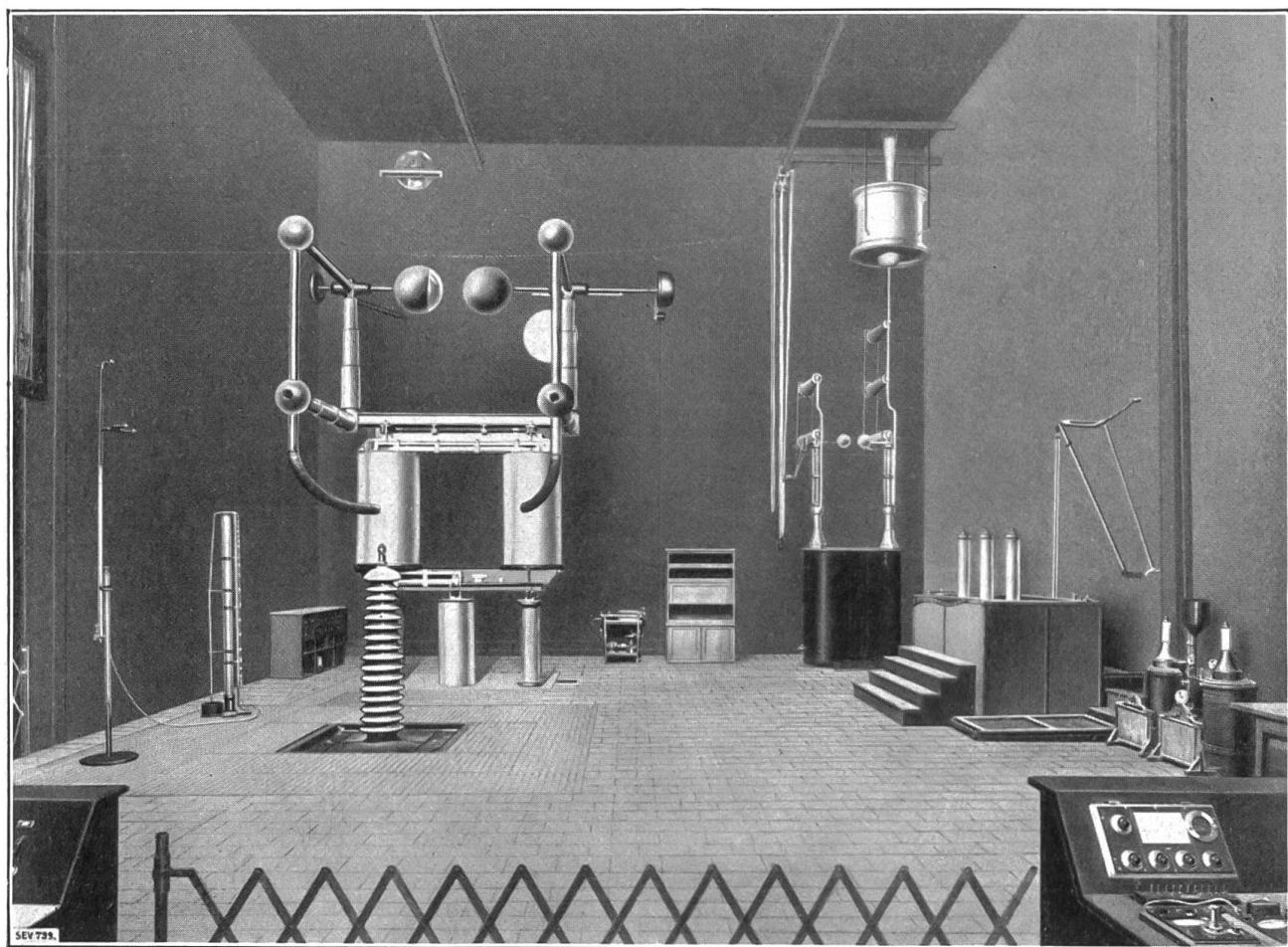


Fig. 12.
Hochspannungsversuchslab der Micafil A.-G.

Turbogeneratoren grösster Leistung (z.B. 80000 kW BBC-Generatoren für die Hellgate-Centrale³⁾) brachten das Problem, die Isolierkanäle in den Nuten so zu konstruieren, dass die ganz beträchtlichen Wärmedehnungs-Unterschiede von Metall und Isolation nicht zur Zerstörung der Kanäle führt.

Was die Prüfung der Maschinen anbelangt, wurde anlässlich der 4. Tagung der Conférence Internationale des Grands Réseaux électriques à haute tension in Paris vorgeschlagen, ausser der Spannungsprobe wie bei Kabeln die Grenzspannung (siehe Seite 165) zu ermitteln, die 1,2 bis 1,5 mal grösster sein solle, als die höchste im Betriebe vorkommende Ueberspannung.

³⁾ Siehe Bull. S.E.V. 1928, No. 19, S. 611.

Literatur-Verzeichnis.

1. Mathematische Theorien über den Durchschlag fester Isolermaterialien. Dr. Ing. *Dreyfuss*, Basel, Bull. S. E. V. 1924, S. 321 und 577.
2. Der Durchschlag fester Isolierstoffe als Folge ihrer Erwärmung. *K. Berger*, Bull. S. E. V. 1926, S. 37. — B. B. C.- Mitteilungen 1926, S. 115.
3. Zur Theorie des Wärmegleichgewichtes fester Isolatoren. *K. Berger*, E. T. Z. 1926, S. 673.
4. Versuche zur Natur des elektrischen Durchschlages. *W. O. Schumann*, Z. Techn. Phys., Bd. 6 1927, S. 439.
5. Durchschlag von Isolatoren bei hohen Temperaturen. *L. Inge* und *A. Walther*, Z. Phys., Bd. 34 1927, S. 15.
6. Der Durchschlagsmechanismus an festen Isolermitteln. *P. L. Hoover*, J. A. I. E. E., Bd. 45, Sept. 1926 (Auszug in E. und M. 1927, S. 371).
7. Zur Wärmetheorie des elektrischen Durchschlages *V. Fock*, A. f. E., Bd. 19 1927, No. 1, S. 71.
8. Durchschlagsspannung und Durchschlagfestigkeit. *V. Retzow*, A. f. E., Bd. 20 1928, No. 3, S. 270.
9. Untersuchungen über den elektrischen Durchschlag und Ueberschlag im unhomogenen Feld. *Erwin Marx*, A. f. E., Bd. 20 1928, No. 5/6, S. 589.
10. Zur Theorie des elektrischen Durchschlages, I. Die Durchschlagsfunktion. *P. Böning*, A. f. E., Bd. 20 1928, No. 1, S. 88, ferner Bd. 21, No. 1, S. 25.
11. Stossspannung und Durchschlag bei Gasen. *W. Rogowski*, A. f. E., Bd. 20 1928, No. 1, S. 99.
12. Oil breakdown at large spacings. *Douglas F. Miner*, J. A. I. E. E. 1927, S. 336.
13. Durchschlag von Hartpapierisolation bei elektrischem Stoss im Vergleich z... Dr. Ing. *F. Grünwald*, E. T. Z. 1927, No. 4, S. 103.
14. Des matières premières dans la construction électrique. A. C. E. C. 1927, mehrere Nummern.
15. V. D. E.-Vorschriften für Transformator- und Schalteröle. E. T. Z. 1927, S. 473.
16. Standardisation rules for compounds. *H. W. L. Bruckman*, Grands Réseaux 1927, Bd. 33.
17. Effet de la pression des gaz occlus dans les isolants sur leurs caractéristiques d'ionisation par Everett-S. Lee. Grands Réseaux 1927, Bd. 29.
18. Testing and conditions of use of insulating materials. *E. Bitterli*, Grands Réseaux 1927, Bd. 20.
19. Untersuchungen über Spitzenentladungen in Transformatorenöl. *A. Nikuradse*, A. f. E. 1928, No. 4, S. 403.
20. Die Durchschlagsspannung zwischen scharfen Kanten unter Oel. *Fr. Wöhr*, A. f. E., Bd. 20 1928, No. 4, S. 444.
21. Beiträge zur Beurteilung von Hartpapier. *Kumlik*, E. & M. 1928, S. 1045.
22. Insulation, The Opportunity of Research. *J. B. Whitehead*, J. A. I. E. E., Jan. 1929.
23. Hochspannungskabel. *P. E. Schneeberger*, S. T. Z. 1927, No. 38, S. 614.
24. 130 kV-Kabel. *L. Emanueli*, Energia Elettrica 1925, No. 2, E. T. Z. 1925, No. 45.
25. Ueber Abrundungen bei Muffen und Endverschlüssen metallisierter Kabel. *Loebner*, A. f. E. Bd. 27, S. 152.
26. A new 132 kV Cable joint. *D. M. Simons*, J. A. I. E. E. march, 1927.
27. Zur Herstellung von Hochspannungskabeln. Dr. *Konstantinowski*, E. & M. 1928, S. 1183.
28. Same Problems in High-Voltage Cable Development. *E. W. Davis* and *W. N. Eddy*, J. A. I. E. E., Jan. 1929.
29. Ionisation Studies in Paper Insulated Cables. *C. L. Dawes*, *H. H. Reichard*, *P. H. Humphries*. J. A. I. E. E., Jan. 1929.
30. Beitrag zur technischen Berechnung von Kondensatordurchführungen. *A. Imhof*, Bull. S. E. V. 1926, S. 586.
31. Condenser terminals under uniform surface chocs. *Alexander Smouroff*, Grands Réseaux 1927, Bd. 29.
32. Die Wirkung von Schutzfunkenstrecken bei Durchführungen. *H. Müller*, E. & M. 1928, S. 1043.
33. Ueber den elektrischen und mechanischen Sicherheitsgrad von Hochspannungs-Freileitungen. Dr. Ing. *K. Draeger*, Elektro-Journal 1927, S. 343.
34. Die neuen Prüfvorschriften des V. D. E. für Hochspannungsisolatoren. Dr. Ing. *W. Weicker*, Hescho-Mitteilungen 1928, No. 43.
35. Ueber die Bemessung von Schutzarmaturen für die Leitungs- und Apparate-Isolation mit Rücksicht auf Ueberspannungen. Dr. Ing. *H. Müller*, Hescho-Mitteilungen 1928, No. 41/42.
36. Lichtbogen-Ueberschläge mit hoher Leistung an Freileitungs-Isolatoren. Dr. Ing. *K. Draeger*, E. & M. 1928, S. 953.
37. Hochspannungs-Prüfeinrichtungen zur Erzeugung von Gleich- und Stossspannungen. *Hans Mehlhorn*, Siemens Zeitschrift 1927, S. 525.
38. Neue Prüftransformatoren, Bauart B. B. C. *A. Meyerhans*, B. B. C.- Mitteilungen 1927, S. 105.
39. Die Ueberschlagsspannung von Isolatoren bei verschiedenem zeitlichem Verlauf der angelegten Spannung. Dr. Ing. *Marx*, Hescho-Mitteilungen 1925, No. 17, S. 1.
40. Ein Hochspannungs-Freiluft-Versuchsfeld für 1000 kV gegen Erde. Bergmann-Mitteilungen 1928, No. 3, E. & M. 1928, S. 1147.
41. Erfahrungen und Fortschritte im Bau von Kabel-Prüfeinrichtungen für hohe Gleichspannung. *H. Mehlhorn*, Siemens-Zeitschrift 1928, S. 590.
42. Beitrag zur Messung der Spannungsverteilung bei Isolator-Oberflächen. *P. Pulides* und *A. L. Müller*, E. T. Z. 1928, S. 1648.
43. A Modern Industrial High-Pressure Laboratory. *A. Imhof*, Electrical Review 1928, August 17th.
44. Die Bestimmung der Durchschlagfestigkeit von festen Stoffen im homogenen Felde. *Erwin Marx*, E. T. Z. 1929, No. 2, S. 41.