Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 23 (1932)
Heft: 17

Artikel: Fortschritte der Hochspannungstechnik in den letzten Jahren
Autor: Imhof, A.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057462

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: 22.08.2025

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

utilise avantageusement des interrupteurs automatiques et des coupe-circuit à retardement en connexion avec des coupe-circuit normaux. C'est possible lorsqu'on a soin de choisir les coupe-circuit assurant le tronçon de ligne de plus forte section pour une intensité sensiblement supérieure; p. ex. s'il s'agit de remplacer un coupe-circuit ordinaire de 6 A dans une installation intérieure par un coupe-circuit à retardement ou par un interrupteur automatique, le coupe-circuit normal du raccordement devra posséder un fusible de 25 A. Mais il est nécessaire que le tronçon de ligne précédant soit prévu pour une intensité de 25 A.

Dans les réseaux où le point neutre mis à la terre est connecté à la carcasse de différents appareils, il peut arriver que celle-ci prenne en cas de court-circuit une tension de contact dangereuse. C'est alors aux coupe-circuit à protéger contre les contacts fortuits. Pour juger de cet effet protecteur, il faut examiner plus attentivement, d'une part les prescriptions qui s'y rapportent, et d'autre part les caractéristiques «Intensité-Temps» des appareils protecteurs pendant les 10 premières secondes de leur fonctionnement. N'ayant pas exécuté nous-mêmes jusqu'ici assez d'essais sur cette partie de la caractéristique des interrupteurs automatiques et des coupe-circuit à retardement, nous reviendrons ultérieurement sur la question de la protection contre les contacts fortuits.

Fortschritte der Hochspannungstechnik in den letzten Jahren.

Von Prof. *A. Imhof*, Chefingenieur der Micafil A.-G., Zürich-Altstetten.

537.5+621.3.048+621.315.2+621.315.6+621.316.313+621.319.4

Anhand umfassend zitierter Literatur gibt der Autor einen Ueberblick über die neueste Entwicklung und die Tendenzen der Hochspannungstechnik. Zunächst wird über die Physik des Durchschlages und des Ueberschlages berichtet, dann über den Stand der organischen und anorganischen Isolierstoffe, speziell des Porzellans, der Kabeltechnik, der Durchführungen, der Kondensatoren und der Trockenhochspannungsapparate. Zum Schluss werden die Fortschritte in Laboratoriumseinrichtungen und Prüfmethoden beschrieben, das «Barrierenprinzip» erörtert und die heute angewandten Methoden zur Erzeugung hoher Spannungen angedeutet.

Cet article, contenant de nombreuses indications de sources, donne un aperçu sur les récents progrès et les tendances de la technique des hautes tensions. L'auteur traite tout d'abord le côté physique du percement et du contournement, puis les matières isolantes organiques et inorganiques, la technique des câbles, les traversées, les condensateurs et les appareils à haute tension sans isolant liquide. Pour terminer, l'auteur décrit les progrès réalisés dans les installations de laboratoires et dans les méthodes d'essai, explique le principe des «barrières» et esquisse les méthodes appliquées aujourd'hui pour produire de très hautes tensions.

I. Wissenschaftliche Arbeiten.

Das Gebiet der Dielektrika ist in den letzten Jahren mit Bienenfleiss wissenschaftlich bearbeitet worden und hat viele auch für die technische Praxis wertvolle Ergebnisse gebracht.

Die bekannten Theorien über den elektrischen Durchschlag haben einen weiteren Ausbau erfahren. Für diejenigen Leser, welche den Publikationen auf diesem Gebiet nicht genügend folgen können, um sich den Ueberblick über die Entwicklung der Durchschlagstheorien selbst zu bilden, sei zunächst auf eine zusammenfassende Arbeit von J. K. Gillett [1]) hingewiesen durch Wiedergabe einer kurzen, in der ETZ [2]) erschienenen Zusammenfassung. Ausgehend von Wagnerschen «Wärmedurchschlag», den man heute als unvollständig erklärt ansieht, da er den Einfluss der Isolatordicke und der Wärmeableitung durch die Elektroden unberücksichtigt lässt, leitet Gillett auf die allgemeinere Theorie von Rogowski und die spezielleren von Dreyfus und Fock über, die Beziehungen zwischen Durchschlagspannung, Isolatordicke und Temperatur festlegen und Formeln für die direkte Berechnung der Durchschlagspannung aus Wärmekonstanten, Dicke und Verlustfaktor aufstellen. Nachprüfungen hielten diese Theorien nur oberhalb bestimmter Temperaturen stand, während im darunter liegenden Temperaturbereich der Einfluss von Temperatur, Zeit und Leitfähigkeit fast verschwindet. Dem hier vorhandenen «rein elektrischen» Durchschlag scheinen die «Spalttheorien» von Rogowski, Griffith und Horowitz näher zu kommen, die das Vorhandensein winziger Spalten im Dielektrikum annehmen, die unter dem Einfluss des elektrischen Feldes gegen die Kräfte der Oberflächenspannung und der Elastizität aufbrechen. Aus der molekularen und technischen Festigkeit sich ergebende Widersprüche schienen in der Homogenität der Stoffe begründet zu sein. Aus einer Betrachtung der Feldverteilung in isotropen und anisotropen Medien wird die höhere Festigkeit von Stoffen möglichst feiner Mikrostruktur abgeleitet.

Unter den experimentellen Arbeiten, welche der weiteren Erforschung des Durchschlagsgebietes dienten, seien u. a. die Untersuchungen von R. Jost über die Durchschlagsfestigkeit einiger fester Isolierstoffe bei Beanspruchungen von langer bis zu ganz kurzer Dauer [3]) erwähnt: Zunahme der Festigkeit mit abnehmender Beanspruchungsdauer, bei einem Zeitintervall von 10^{-9} bis 10^{4} s; Durchschlagsverzug erst bei kürzesten Zeiten. W. Rogowski, Flegler und Tanner haben nachgewiesen, dass der Durchschlag bei Stoßspannungen und Atmosphärendruck in einem rapiden Zusammenbruch der Spannung besteht; das ganze Durchschlagsphänomen ist innert rund 10^{-8} s beendet. W. Rogowski und H. Klemperer haben darnach gezeigt, dass auch bei statischem Durchschlag der Zusammenbruch ähnlich rasch erfolgt [4]). Konrad Meyer [5]) unternahm den Versuch, die verschiedenen vorhandenen Anschauungen über den Durchbruch fester Isolatoren zu einer einheitlichen Theorie, die sich nur auf experimentell nachweisbare Voraussetzungen stützt, zusammenzufassen. Die Möglichkeit dazu bot die Anschauung, dass auch der rein elektrische Durchschlag von der Temperatur beeinflusst wird, aber erst von einer kritischen Temperatur an. Diese Anschauung bedingt

[1]) Siehe Literaturverzeichnis am Schluss.

eine neue Auffassung des wärmeelektrischen Durchschlages, der nicht mehr als ein durch elektrische Ursachen beschleunigter Wärmedurchschlag, sondern als ein durch die Temperatur erniedrigter elektrischer Durchschlag aufgefasst wird. Der Uebergang zum reinen Wärmedurchschlag erfolgt schliesslich dadurch, dass das Wärmegleichgewicht des Isolators labil wird, bevor der elektrische Durchschlag eingesetzt hat. In diesem Zusammenhang sei auch auf die Arbeiten von K. Moerder [6]) «Einfluss der Wärme auf den elektrischen Durchschlag» hingewiesen.

Mit dem Durchschlag von flüssigen Isolatoren haben sich u. a. Inge und Walther eingehend befasst [7]). Sie bestimmten für verschiedene sorgfältig gereinigte Flüssigkeiten (von Transformatorenöl, Xylol, Hexan und Pentan) die Abhängigkeit der Durchschlagspannung von der Beanspruchungsdauer, dem Elektrodenabstand, von Druck und Temperatur bei Gleich-, Wechsel- und Stoßspannungen. Aus den Versuchen lässt sich folgern, dass dem Durchschlag von flüssigen Isolatoren mindestens zwei Mechanismen zugrunde liegen müssen: Bei Stoßspannungen wahrscheinlich reiner Ionisationsprozess, bei dauernder Spannung wahrscheinlich Durchschlag thermischer Natur, wobei die Erwärmung der Flüssigkeit durch die in der Nähe der ionisierten Gasblasen auftretenden Wärmeverluste bedingt wird. Eine reichhaltige Literaturzusammenstellung über dieses Gebiet wurde in einer Arbeit von Nikuradse gegeben [8]). Im Laboratorium von Prof. Schumann ist von Engler und Knorr gezeigt worden, dass bei extrem gereinigtem und entgastem Oel die Abhängigkeit der Durchschlagspannung vom Druck ausbleibt, was von den vorhin genannten Autoren auch für Xylol nachgewiesen wurde. Mit der Druckabhängigkeit der Durchschlagspannung bei dielektrischen Flüssigkeiten befasst sich weiterhin H. Edler [9]). Auf Grund der Druckabhängigkeit der Entladespannung und der Druckunabhängigkeit der Stromspannungscharakteristik wird die Annahme gemacht, dass der Durchschlag durch eine partielle Verdampfung an der Uebergangsschicht der Elektroden eingeleitet wird. Die Ergebnisse von Messungen von L. S. Ornstein und G. J. D. Willemse an Transformatoröl über die Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätskonstanten und des elektrooptischen Kerreffektes weisen auf die Anwesenheit von Dipolen im Oel im Sinne der Debyeschen Ueberlegungen hin [10]). Aus Kurven für die Abhängigkeit des Verlustwinkels von der Frequenz bei Oelen, welche sich auf Grund dieses experimentellen Materials ergeben, hat Gemant [11]) zwei Einzelverlustkurven nachgewiesen und damit den Beweis erbracht, dass die Verluste in Oel bei Niederfrequenz nach einem andern Vorgang (Wagnereffekt) vor sich gehen, als bei Hochfrequenz (Debyeeffekt).

Mehrere Untersuchungen befassten sich wiederum mit dem Luftdurchschlag. In einer Arbeit von E. Uhlmann [12]) sind Durchschlagswerte in Luft für konzentrische Zylinder bei verschiedenen Radien ermittelt. Eine Methode wird angegeben zur angenäherten Berechnung der tatsächlichen Feldverteilung unter Berücksichtigung des Einflusses freier Ladungen im Feld. Weiter sei auf eine in ihrer Art originelle Untersuchung über Drei-Elektrodenstrecken [13]) in dichten Gasen hingewiesen. Die Anfangsspannung einer feststehenden Zweielektrodenanordnung lässt sich durch Aenderung des Potentials einer feststehenden dritten Elektrode steuern. Die Steuerung ist am wirksamsten, wenn durch sie ein möglichst inhomogenes Feld in ein möglichst homogenes Feld oder umgekehrt verwandelt wird. Von unmittelbarer Bedeutung für die Technik der Dimensionierung von Isolationen ist eine grössere Arbeit von J. Kampschulte [14]) «Luftdurchschlag und Ueberschlag mit Wechselspannung von 50 und 100 000 Hertz». Zunächst werden die früheren Versuchsergebnisse von Marx und Schwaiger bestätigt, dass die Ueberschlags- und Durchschlagsvorgänge in flüssigen und gasförmigen Dielektrika im homogenen und inhomogenen Feld den gleichen Gesetzen wie die Durchschlagspannungen folgen. Ferner ergibt sich, dass auch bei Hochfrequenz für den Ueberschlag die gleichen Gesetzmässigkeiten vorliegen wie beim Durchschlag, nur liegen die Ueberschlagspannungen bei allen Isolierkörpern und allen Elektrodenformen niedriger als die Durchschlagspannung der Elektroden. Nur bei Paraffinkörpern liegen die Ueberschlagspannungen bei Hochfrequenz genau, bei 50 Per./s fast genau so hoch wie die Durchschlagspannungen. Bei fast allen Isolierstoffen und Elektrodenformen treten Vorentladungen bzw. stärkere Vorentladungen auf als beim Durchschlag. Die Versuche ergeben, dass das Absinken der Ueberschlagspannung gegenüber der Durchschlagspannung in erster Linie auf die raschere Ionisation zurückzuführen ist, denn bei Anordnungen ohne Vorentladungen liegt Ueber- und Durchschlagspannung gleich oder fast gleich hoch. Bei scharfkantigen Elektroden scheint sich bei Niederfrequenz ein Einfluss des Isolierstoffes bemerkbar zu machen. Hieher gehört ferner die Untersuchung von H. Ritz [15]) «Ueberschlag-Feldstärke an Isolatoren». Bei der Untersuchung der Einflüsse von Feuchtigkeit, Gasdichte und Feldform wird festgestellt, dass im Gegensatz zu den bisher bekannt gewordenen Ergebnissen die maximal mögliche Ueberschlags-Feldstärke, das ist die Feldstärke ohne Isolator, bei der relativen Feuchtigkeit von 0 bis 50 % an allen Dielektrika stets reproduzierbar erhalten wird. Der Uebergang von der Durchschlagsentladung auf die Oberflächenentladung ist nur durch die relative Feuchtigkeit bedingt. W. Rogowski [16]) trug durch eine Reihe von interessanten Vergleichen zwischen mit dem Durchschlag in Zusammenhang stehenden Erscheinungen an gasförmigen, flüssigen und festen Isolatoren bei zur Sicherung der Anschauung, dass der elektrische Durchschlag von Gasen, festen und flüssigen Isolatoren, wenn man vom Wärmedurchschlag absieht, in einem ganz ähnlichen Stoss-Ionisierungsvorgang bestehe wie der Durchschlag von

Gasen. Derselbe Forscher übt Kritik an Townsends Theorie in einer bemerkenswerten Arbeit über Gasentladung und Durchschlag [17]).

Von Inge und Weil wurden sehr eingehende experimentelle Untersuchungen über den Randdurchschlag und Randentladungen [18]) vorgenommen. Gegenstand grösserer Untersuchungen waren auch die Gleiterscheinungen auf Isolatoren in Transformatorenöl [19]). Schäffer untersuchte den elektrischen Durchschlag im Hochvakuum [20]).

Die bisher ungelöste Frage, ob bei Beanspruchungen durch inhomogene Felder die maximale Feldstärke oder das Linienintegral der Feldstärke über eine gewisse Länge massgebend sei, wurde zum Teil beantwortet. Inge und Walther haben gezeigt [21]), dass bei Glas ein kritischer Wert der maximalen Feldstärke zum Durchbruch führt, dass dies aber nicht für alle Isolierstoffe gilt. Für Schwefel wurde gefunden, dass beim Anwachsen der Inhomogenität des Feldes die Durchschlagspannungen bei gegebener Schichtdicke zu einem bestimmten Minimalwert streben. Gleiches gilt wahrscheinlich von Porzellan.

Die Raumkräfte, welche an den Raumladungen angreifen, sind im Gebiet der Gasentladungen bekannte Erscheinungen geworden und werden z. B. bei der elektrischen Staubreinigung mit gutem Erfolg ausgenützt. P. Böning [22]) hat nun auch Raumladungsprobleme in flüssigen Isolierstoffen untersucht. Das an Hochspannungskabeln schon häufig beobachtete Phänomen, dass sich die Tränkmasse in der Papierbewicklung in den äusseren Lagen angereichert hat, kann auf Grund des Ergebnisses erklärt werden.

II. Isolierstoffe.

Die Technik der Isolierstoffe hat einige interessante neue Produkte geschaffen und bestehende weiter entwickelt. Siemens & Halske berichten über ihr neues Material Sinterkorund [23]), ein aus reinem Aluminiumoxyd zu einem völlig dichten, kristallinen Körper gasinierten Isolierstoff, der für Automobilzündkerzen und neuerdings für viele weitere Dinge wie Pyrometerrohre, Lötkolben-Isolationen usw. Verwendung findet. Bemerkenswert ist der ungewöhnlich hohe elektrische Widerstand bei hohen Temperaturen, z. B. bei 400° 100 000 mal höher als bei Porzellan, und die hohe Wärmeleitfähigkeit. Der Schmelzpunkt beträgt 2050°, die Wasseraufnahme ist null, die Gasdichtigkeit besteht bis über 1720°.

Die Micafil A.-G. [24]) kam mit ihrem Oleocel auf den Markt, ein in Zylindern, Röhren, Platten und Winkelringen hergestelltes, im wesentlichen aus ölsaugfähigem Papier bestehendes Hochspannungsmaterial. Im Gegensatz zum bekannten Hartpapier sind die Papierschichten nicht durch zusammenhängende Harzschichten, sondern nur durch ein Punktsystem verklebt, so dass volle Quersaugfähigkeit für Oel besteht. Die Vorbehandlung und die elektrischen Eigenschaften sind gleich wie bei gutem Presspan; mechanisch ist das Material jedoch starr und formbeständig, ähnlich dem Hartpapier und wird auch in gleichen Abmessungen geliefert.

Dieselbe Firma machte Angaben [25]) über ein neues, von ihr erzeugtes, dem Bakelit verwandtes Kunstharz, das gegenüber dem normalen, für elektrotechnische Zwecke benützten Kunstharz den Vorteil kleinerer dielektrischer Verluste, insbesondere bei erhöhter Temperatur besitzt und daher vornehmlich zur Herstellung von Kondensatordurchführungen von hohem Wert ist.

Zu steigender Bedeutung kam auf der ganzen Linie der Hochspannungstechnik das mit dünnem Mineralöl imprägnierte Papier. Ganz ausserordentliche Durchschlagsfestigkeiten und technische Dielektrika mit früher ungewohnt kleinen dielektrischen Verlusten (bis unter $\operatorname{tg} \delta = 0{,}002$) ergeben die dünnen Hadernpapiere, zu denen nun in neuerer Zeit auch feinste Zellulosepapiere mit teilweise ebenbürtigen Resultaten getreten sind. Die letzteren bieten preisliche Vorteile. Während die feinen Papiere die grosse technische Entwicklung der Kondensatoren ermöglichten, spielt das dickere Zellulosepapier vor allem im neuzeitlichen Oelkabel eine grosse Rolle, teilweise auch für Kondensatoren, weiterhin, was für die letzte Zeit charakteristisch ist, für hochwertige Isolationen in elektrischen Apparaten wie Höchstspannungs-Stromwandler (Siemens & Halke-Kreuzkern-Wandler, Schleifenwandler der Ateliers de Constructions de Delle), Nullpunktsverbindungen von Transformatoren usw.

Im Anschluss an das ölimprägnierte Papier [26]) sei auch auf das neuerdings in Amerika für Kondensatoren, Messwandler u. a. verwendete druckgasimprägnierte Papier hingewiesen. Die dielektrischen Verluste sind die des Papieres, ohne Rücksicht auf Natur und Druck des Gases, während Anfangspannung, Funkenspannung und Gleitbüschelspannung bei 16 kg/cm² bei einer 6 bis 7 mal höheren Spannung als bei Atmosphärendruck auftreten. Diesbezüglich sei auf den Abschnitt «Statische Kondensatoren» verwiesen.

Die Isolation der Generatorspulen macht eine Wandlung durch infolge der Einführung des sogenannten Compoundfoliums [27]) (Micafil A.-G.), das dem altbekannten Schellackfolium in elektrischer Hinsicht überlegen ist und sich Wärmedehnungen besser anpasst. Die Verluste wachsen weniger stark mit steigender Temperatur, wie auch mit steigender Spannung. Gegen Ozon ist das Bindemittel weit unempfindlicher als Schellack.

Ueber den hochwichtigen mineralischen Grundstoff für alles Micafolium und die Mikanite, den Glimmer, wurden durch das Bureau of Standards, U. S. A., sehr eingehende Untersuchungen [28]) gemacht. Wegen ihrer Bedeutung für Elektroröhren wurden auch die dielektrischen Eigenschaften verschiedener Gläser in Abhängigkeit der Frequenz und der Temperatur untersucht [29]).

Auf dem Gebiete der Isolierpressmassen sind mehrere bedeutende Neuerungen zu verzeichnen; wir nennen die sogenannte weisse Masse, die aller-

dings mehr für Galanteriewaren als für Isolationen wichtig wurde.

Als neues Verfahren führt sich immer mehr das sogenannte Spritzverfahren ein zur Herstellung von Rundstäben, Röhren, Profilstäben aller Art und sogar komplizierter Formstücke. Es ermöglicht gegenüber dem Pressverfahren oft wirtschaftliche Vorteile.

Die Isolieröle gaben naturgemäss immer wieder Anlass zu Untersuchungen. Besonderes Interesse verdient die Beachtung der im Oel gelösten Gase; u. a. sei diesbezüglich auf die Arbeiten von F. Koppelmann [30]) «Einige Beobachtungen über den Durchschlag von Isolierölen zwischen einer spitzen und einer abgerundeten Elektrode» verwiesen. Es werden Beobachtungen über den Einfluss des äussern Feldes, des Effektivwertes der Wechselspannung, des äussern Druckes, der gelösten Luft auf den Durchschlag von Isolierölen mitgeteilt bei Elektrodenanordnungen mit einer nadelscharfen Spitze. Derselbe Verfasser hat in der ETZ [31]) über das Verhalten der im Oel gelösten Luft berichtet; über dasselbe Thema siehe auch die Untersuchungen von H. Elder [32]).

Für Oelreinigungsapparate kommt mehr und mehr das Prinzip der Vakuumzerstäubung auf, besonders in Kombination mit der Filterpresse. Auch Vakuumzentrifugen (Sharples) werden verwendet.

Grössere Beachtung wurde in jüngster Zeit der Alterung der Isolierstoffe geschenkt. Von Interesse ist in dieser Hinsicht eine Publikation von V. M. Montsinger [33]) «Belastung von Transformatoren nach dem Grade ihrer Erwärmung». Als Maßstab des fortgeschrittenen Alterungsvorganges kann nicht die dielektrische, sondern nur die mechanische Festigkeit der Isolationen angesehen werden. Versuche, die an gelber und schwarzer getränkter Isolierleinwand in Luft und Oel bei verschiedenen Temperaturen von 90 bis 110° angestellt wurden, ergaben, dass die Minderung der Zugfestigkeit auf einen bestimmten Betrag der ursprünglichen in einem Zeitraum $y = A\,e^{-mx}$ ergibt, wobei A und m Konstanten, x die Temperatur bedeuten. Annähernd dieselbe Gesetzmässigkeit des Alterns ergab sich bei Versuchen an Kabelpapieren. Mit ungefähr 8° Temperatursteigerung wird die Lebensdauer des Isolierstoffes auf die Hälfte der Lebensdauer in der in der vorausgehenden niedrigeren Temperaturstufe verkürzt. Unter Oel findet die Alterung viel rascher statt als in Luft. Bei etwa 20 Jahre überschreitenden Zeiten sinkt die Festigkeit rasch, so dass sich selbst bei Raumtemperatur keine höhere Lebensdauer als 100 Jahre für die Isolationen ergeben würde.

Weiter sei auf die Publikation von Dr. H. Stäger [34]) «Ueber die Alterung organischer Werkstoffe» verwiesen.

Erfreulicherweise ist die Zusammenarbeit von Chemiker und Isolationsingenieur reger geworden. In diesem Zusammenhang sei auf das wertvolle Buch von Dr. H. Stäger hingewiesen «Elektrotechnische Isoliermaterialien» [35]), das erstmalig die elektrotechnischen Isolierstoffe vom Standpunkt des Chemikers mit Würdigung der elektrischen Probleme betrachtet, weiterhin auf eine Arbeit desselben Verfassers, «Untersuchungen von elektrischen Isolierharzen» [36]). Für den Elektrotechniker gut lesbar sind die sehr aufschlussreichen Vorträge von Wilhelm Ostwald, «Kolloidwissenschaft, Elektrotechnik und heterogene Katalyse [37]).

III. Porzellantechnik im allgemeinen.

Die Technik des Hochspannungsporzellans sucht das Feld nicht nur auf den alten Gebieten zu behaupten, sondern neue Gebiete zu erobern.

In die neueste Zeit fällt die Entwicklung der sogenannten selbstreinigenden bzw. «verschmutzungssicheren» Hänge-Isolatoren [38]). Es zeigte sich, dass Spezialisolatoren für Salzablagerungen (Meeresküste) grundsätzlich anders zu konstruieren sind als Isolatoren für Industriegegenden und Bahnbetriebe. Für die ersteren ist ein möglichst grosser Kriechweg wesentlich, so dass weite Schirmtypen mit zahlreichen Rippen auf der Unterseite der Schirme in Frage kommen. Derartige Isolatoren sollen sich in England, Schweden und Amerika bereits gut bewährt haben. Anders bei den eigentlichen Verschmutzungsisolatoren. An den Rippenkanten scheiden sich infolge des stärkern elektrischen Feldes Staubteilchen vorzugsweise nieder. Man vermeidet daher Rippen. Für die Form der Schirme ist eine durch Versuche ermittelte Gestaltung notwendig, um die Staubabscheidung auf der unteren Seite zu verringern. Die Schirmkante muss derart sein, dass das Wasser gut abtropfen kann, ohne sich mit dem Schmutz zusammen unter der Einwirkung des Feldes in den Schirm hinein und an der Unterseite hoch zu ziehen. Der obere Schirm wird kleiner gemacht als der untere, um durch abtropfendes Wasser vom obern auf den untern Schirm die Selbstreinigung des letzteren zu verbessern. Auch bei den Bahnisolatoren wurde durch Versuche diejenige Type herausgefunden, die bei starker Verschmutzung und Verrussung und bei Nebel die grösstmögliche Ueberschlagsfestigkeit besitzt. Ein doppelschirmiger Motorisolator erwies sich als günstiger als der reine Knüppelisolator.

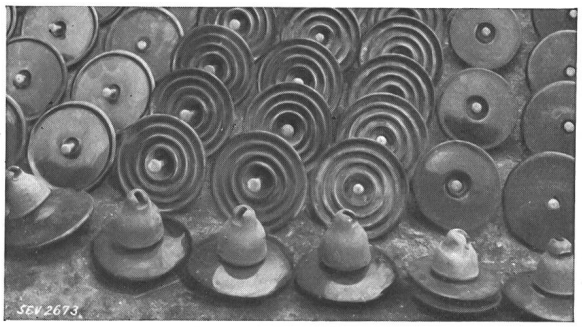

Fig. 1.
Verschmutzungsisolatoren der Porzellanfabrik Hermsdorf.

Sowohl in Europa wie in Amerika wurden Kopplungskondensatoren [39]) [40]) für die leitungsgerichtete Hochfrequenztelephonie und Fernmessung

entwickelt, z. B. in Europa erstmalig von den Hescho-Werken in einer Art Flaschenform mit Einführungsisolator, von der Porzellanfabrik Rosenthal in Form von Tellern. Die Hescho-Kondensatoren werden für Nennspannungen von 35 und 60 kV und Kapazitäten von 2000 und 1000 cm hergestellt. Rosenthal haben neuerdings drei Typen von Kondensatoren entwickelt mit einem Scheibendurchmesser von 500, 350 und 160 mm mit 3000 bzw. 1500 bzw. 375 cm Kapazität. Die Betriebsspannung beträgt in allen Fällen 15 bis 25 kV, die Prüfspannung 50 kV. Der Verlustwinkel wird zu $\operatorname{tg} \delta =$ 0,015 bis 0,02 angegeben.

Die neue und erfolgreich begonnene Tendenz im Messwandlerbau, ölfreie Konstruktionen zu fin-

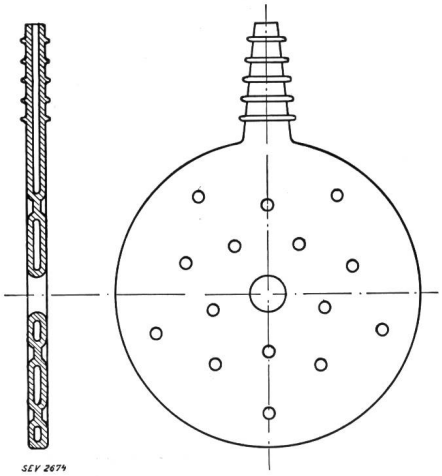

Fig. 2. Kopplungskondensator der Porzellanfabrik Rosenthal.
Der eine Kondensatorbelag befindet sich in den Hohlräumen des Körpers mit Zuleitung durch den rohrähnlichen Ansatz; der andere befindet sich auf der äussern Oberfläche, mit Zuleitung mittels eines Schraubenbolzens durch die Oeffnung im Zentrum.

den, bot der Porzellantechnik neue Aufgaben, sowohl ziemlich schwierige Probleme der Formtechnik, wie auch wohl erstmalig die Aufgabe, relativ hohe Dauerspannungen bei einiger Erwärmung zu ertragen. In letzterer Hinsicht ist das Porzellan wesentlich schlechter, als gemeinhin geglaubt wurde. Immerhin sind sehr erfolgreich Trockenspannungs- und Stromwandler (Fischer-Wandler und Querlochwandler) entwickelt worden, deren Isolation im wesentlichen aus Porzellan besteht. Dabei wurde auch von der Möglichkeit, leitende Metallüberzüge anzubringen, Gebrauch gemacht. Besonders grosse Isolierstücke werden in Porzellan und Sillimanit (Steinzeug) bereits ohne Mühe für Isoliermantel-Transformatoren gefertigt (Meyerhans-Spannungswandler von BBC, Stützer-Stromwandler als Kreuzkern-Wandler von Siemens und Isoliermantel-Stromwandler von BBC und Delle). Von der Kittbefestigung, an der man bei grossen Teilen lange festhielt, wurde fast durchgehends zur Klauenbefestigung mit Kork- und Gummidichtung übergegangen.

Auf dem Gebiete der Porzellantechnik sind auch in den letzten zwei Jahren mehrere bedeutende theoretische Arbeiten publiziert worden, die sich auf ein grosses Versuchsmaterial stützen. Wir erwähnen u. a. die umfassenden Versuchsarbeiten von Harald Müller über die zweckmässige Bemessung und Formgebung von Lichtbogen-Schutzarmaturen für die Leitungs- und Apparate-Isolationen [41]), ferner die Versuche über das Verhalten der Isolatoren gegen Ueberspannungen verschiedenen zeitlichen Ablaufs [42]), die Arbeiten, welche sich auf den Durchschlagsversuch unter Oel beziehen [43]), endlich die Untersuchungen von A. Weber [44]), die, ausgehend von dem Verhalten der Durchführungen vor dem Ueberschlag, die Entladungserscheinungen bei den verschiedenen Spannungsarten untersuchen und zu der Feststellung führen, dass die Ueberschlagssicherheit von Durchführungen durch die Anordnung grosser Schirme längs des Ueberschlagweges wesentlich erhöht werden kann. Die Porzellanfabrik Rosenthal befasste sich ebenfalls sehr ausführlich mit dem Lichtbogenschutz an Freileitungsisolatoren, ausgehend von systematischen Versuchen mit möglichst betriebsmässigen Anordnungen [45]). Aus Anlass des in Aussicht genommenen Leitungsbaues über den Gotthard hat dieselbe Firma Korona-Versuche [46]) bei veränderlichem Barometerstand und veränderlicher Temperatur vorgenommen. Bemerkenswert ist ferner eine Arbeit über den Durchschlagsvorgang bei Gleichstrom-Stossbeanspruchung an keramischen Isolatoren [47]).

IV. Kabel.

Wie bei Kondensatoren vom Ersatz des ölgetränkten Papieres durch Pressgas umschwemmtes Papier Erwähnung getan wurde, ist auch von Bestrebungen zu berichten, Hochspannungskabel mit Pressluft und Papier zu isolieren. Die festigkeitserhöhende Wirkung des Papieres reiner Luft gegenüber ist nach Angaben von Gemant [48]) nicht im ganzen Druckgebiet vorhanden; bei hohen Drucken verschwindet sie, indem das Papier sogar herabsetzend auf die Festigkeit der Luft wirkt.

Das Oelkabel erfuhr eine weitere praktische Entwicklung. Eine Reihe von Problemen betreffend die Verlegung, die Muffen und Endverschlüsse, die Ueberwindung von Höhendifferenzen waren zu überwinden. In der Schweiz wurden im Jahre 1931 die ersten Oelkabel erfolgreich verlegt [49]) zwischen den Unterwerken Drahtzug und Selnau in Zürich. Diese Verlegung stellt die erste Seekabelverlegung eines Oelkabels überhaupt dar. Dessen Betriebsspannung beträgt 50 kV, der Querschnitt $3 \cdot 150$ mm², die Dauerstromstärke beträgt 435 A. Ein Massekabel hätte einen Querschnitt von $3 \cdot 240$ mm² erfordert. Das Kabel steht unter Heliumgasdruck.

Für Spannungen bis etwa 50 kV werden aber auch die Massekabel mit Erfolg angewandt und es sind Bemühungen im Gange, diese auch für noch höhere Spannungen neben dem Oelkabel durchzusetzen. Während das Hochstätter-Kabel allgemein geworden ist, vermochte sich das Silbermann-Kabel nicht zu behaupten.

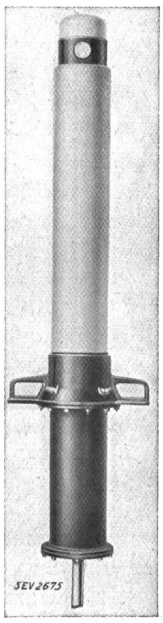

Fig. 3. Kabelendverschluss für 300 kV Prüfspannung.

Erschwerte Probleme bieten bei den hohen Spannungen auch die Endverschlüsse. Erwähnenswert sind in diesem Zusammenhang die elektrisch gesteuerten Endverschlüsse der Micafil A.-G., welche mit Erfolg für Prüfspannungen bis 600 kV hergestellt wurden. Fig. 3 zeigt einen solchen Endverschluss für 300 kV Prüfspannung.

Mit der Einführung der sogenannten V-Kabel, bestehend aus drei verseilten Einleiter-Bleikabeln, wurde auch die muffenlose Verbindung [50]) erprobt, bei der die drei Spleißstellen so gegeneinander versetzt sind, dass keine starke Verdickung entsteht. Es ist daher keine gusseiserne Schutzmuffe nötig, sondern die Armierungsdrähte werden über die Verbindungsstelle geschoben.

V. Durchführungen.

Die Kondensatordurchführungen der hierfür führenden Firmen haben sich bewährt und stark eingeführt [51]). Durch Verwendung eines verbesserten Kunstharzes ist es der Micafil gelungen, den Verlustwinkel und dessen Temperaturabhängigkeit derart zu vermindern, dass das vordem schwierige

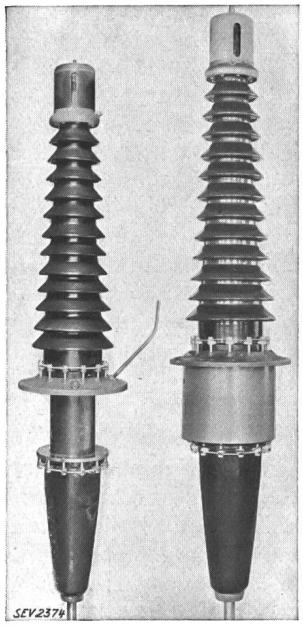

Fig. 4.
Oelschalterdurchführungen der Micafil A.-G., ölgefüllt, für 150 kV Nennspannung, links ohne, rechts mit Stromwandler.

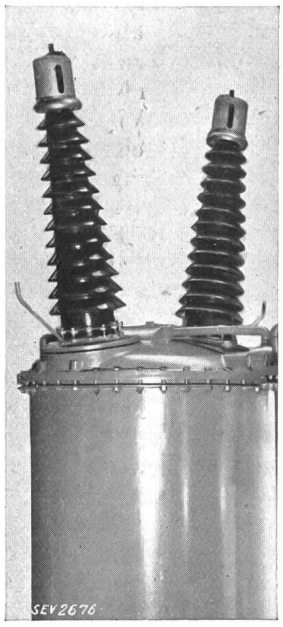

Fig. 5.
Oeldurchführung Fig. 4 auf Oelschalterdeckel montiert.

Problem des Wärmedurchschlages auch bei sehr hohen Betriebsspannungen kaum mehr besteht.

Das Kondensatorprinzip wurde, kombiniert mit dem der Feldsteuerung durch die verschiedenen Dielektrizitätskonstanten von Hartpapier und Oel, in höchst zweckmässiger Weise zur Konstruktion von besonders schlanken ölgefüllten Durchführungen verwendet [51]) [52]).

Die Tendenz, ölfreie Apparate zu schaffen, hat zur weiteren Entwicklung von Porzellan-Mehrrohr-Durchführungen geführt, als ungesteuerte Typen durch die Hermsdorf-Schomburg-Isolatoren G. m. b. H. [53]), als Kondensatortypen durch Rosenthal [54]). Die Elektrizitäts A.-G. vorm. W. Lahmeyer & Co. schlug eine Porzellan-Mehrrohr-Durchführung vor, bei welcher die Zwischenräume der einzelnen Porzellanrohre durch das Kondensationsprodukt aus Phenol oder Kresol und Formaldehyd ausgegossen sind. Diese Schicht bildet einen Bestandteil der Gesamtisolation. Eine solche Schicht ist allerdings elektrisch weit weniger fest als die anschliessenden Porzellanschichten [55]). Diesbezügliche Bestrebungen sind schon alt [56]), aber die praktischen Schwierigkeiten wurden erst neuerdings überwunden.

Eine gute zusammenfassende Darstellung der an Durchführungen auftretenden Probleme ist von H. Wirth in dieser Zeitschrift [57]) gegeben worden.

VI. Kondensatoren.

Die Technik der statischen Kondensatoren hat einen ungewöhnlichen Aufschwung genommen. Das allgemein verwendete Dielektrikum ist unter Hochvakuum getrocknetes und mit Transformatorenöl imprägniertes Papier hoher Qualität. Die immer weitere Vervollkommnung der Papiere hat ermöglicht, auch die bei Spannungen von nur 220 V nötigen ungewöhnlich dünnen Isolierschichten zu

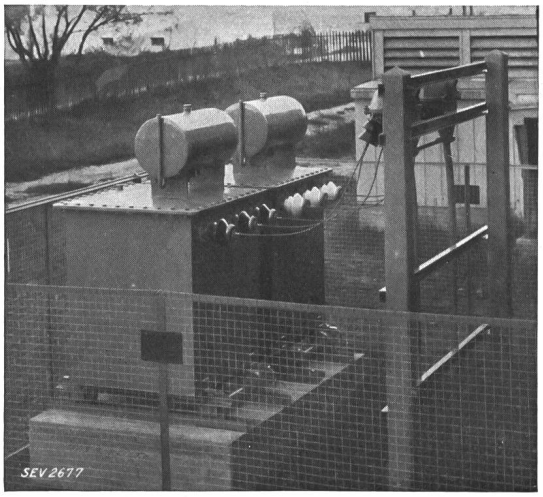

Fig. 6.
Hochspannungskondensatoranlage der Micafil A.-G., 580 kVAr, 8000 V.

bilden, soweit, dass auch schon bei diesen Spannungen durchaus wirtschaftliche Kondensatoren gebaut werden können. Allgemein sind die Preise ganz ausserordentlich gesunken, einesteils ermöglicht durch die Senkung der Papierpreise und die äusserst mögliche Materialausnützung, andernteils erzwungen durch grossen Konkurrenzkampf. In der Schweiz sind runde Kondensatorwickel charakteristisch, zum Teil in vertikaler, zum Teil in horizontaler und endlich in schiefer Axanordnung. In Deutschland haben sich mehr die flachen Wickel

eingeführt, um Raum zu sparen. Beide Formen weisen Vor- und Nachteile auf. Bei hohen Spannungen ist die Serieschaltung gleicher Wickel allgemein geworden (nicht bei Gleichspannungs-Kondensatoren). Dies hat sich bewährt; schon sind cos φ-Kondensatoren für 22 000 V, vereinzelt solche für noch höhere Spannungen im Betrieb. Auch Freiluftkondensatoren haben sich bis jetzt bewährt, ebenso Kondensatoren in Tropenklima. Ein weites Anwendungsgebiet für Oelpapierkondensatoren geben die Gleichrichteranlagen, sog. Wellenglätter, und die Sendestationen für Radioverbindungen. Es bietet heute keine Schwierigkeiten, wirtschaftlich Gleichspannungskondensatoren für Durchschlagspannungen von über 100 000 V herzustellen. Die Gewichte neuzeitlicher grösserer Kondensatoren betragen bei Spannungen über 380 V etwa 3,5 bis 7 kg/kVAr.

Die dielektrischen Verluste konnten auf noch vor wenigen Jahren unmöglich gehaltene Werte erniedrigt werden. Die Tangente des Verlustwinkels, direkt am Dielektrikum gemessen, erreicht Werte von 0,0015 bis 0,004. Im Gleichspannungsfeld werden Durchschlagsfestigkeiten erreicht von 2 bis $2{,}5 \cdot 10^6$ V/cm bei feinen Papieren, von 0,6 bis $1 \cdot 10^6$ V/cm bei starken Papieren, bei Schichtdicken von wenigen Papierlagen. Die Unmöglichkeit, das Oel dauernd absolut gasfrei zu erhalten, begrenzt die praktisch zulässige Dauerfeldstärke auf Werte, die vor einigen Jahren in der Isolationstechnik phantastisch erschienen wären, deren Ueberwindung jedoch einen weiteren Fortschritt voraussehen lässt. Aehnlich den ölgefüllten Kabeln, die unter Kohlensäure- oder Heliumdruck gehalten werden, wird auch bei Kondensatoren an eine analoge Behandlung gedacht.

In den U. S. A. haben sich mit Erfolg neben den Oelpapierkondensatoren für Hochspannung auch die Pressluft-Papierkondensatoren eingeführt. Der Verfasser verdankt Herrn A. A. Bölsterli von Hamden eine diesbezügliche Mitteilung, die hier wiedergegeben sei:

«Merkwürdigerweise ist von der Erscheinung, dass Luft, und ganz allgemein Gase, eine mit dem Druck stark zunehmende elektrische Festigkeit aufweisen, relativ sehr wenig Gebrauch gemacht worden, obwohl sie in den Laboratorien der Physiker schon Ende des vorigen Jahrhunderts erforscht wurde. Immerhin finden wir in den Pressluftkondensatoren von Fessenden und Wien die ersten Anwendungen und in den neuesten Messkondensatoren von Palm und Schering (von Hartmann & Braun gebaut) sehr bemerkenswerte Beispiele, die sich bis zu Höchstspannungen von 300 kV hinauf erstrecken. In der praktischen, d. h. der mit der Kraftversorgung verknüpften Hochspannungstechnik sind meines Wissens jedoch in Europa bisher keine Anwendungen von Pressgasen zu Isolierzwecken bekannt geworden. Die schon erwähnten Pressluftschalter können nicht als solche Anwendungen angesprochen werden, da in ihnen die Pressluft lediglich zum Ausblasen des Lichtbogens, nicht aber zur Isolierung im gewöhnlichen Sinne gebraucht wird.

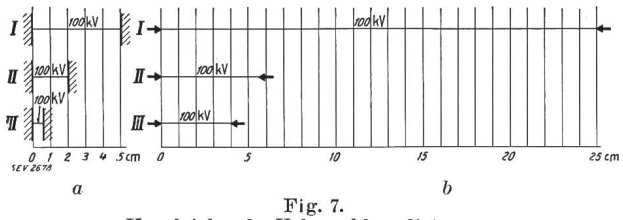

Fig. 7.
Vergleichende Ueberschlagsdistanzen,
a im homogenen Feld,
b an Nadelfunkenstrecke.
I in atm. Luft bei 760 mm Hg,
II in kommerziellem Transformatorenöl, gut getrocknet und filtriert,
III in Stickstoff bei 16 kg/cm².

In den Vereinigten Staaten ist ein vielversprechender Anfang gemacht worden, indem seit einiger Zeit Pressgaskondensatoren zur Verwendung für Phasenkompensation hergestellt werden. Eine grössere Anzahl solcher befindet sich in verschiedenen Kraft- und Industrieanlagen im Betrieb und hat sich vorzüglich bewährt. Vor kurzem ist eine kleinere Anlage für direkten Anschluss an die 11 000-V-Fahrleitung der New York, New Haven & Hartford Railroad dem Betrieb übergeben worden. Andere Hochspannungsapparate, wie Transformatoren, Messwandler und Schalter sind zum Teil gebaut worden, zum Teil noch in der Entwicklung begriffen.

Eine Haupterrungenschaft liegt in der vollständigen Beherrschung des Abdichtungsproblemes, das bei einzeln aufgestellten Apparaten für deren Verwendbarkeit ausschlaggebend ist. Der anfängliche Füllungsdruck des Gases bleibt, abgesehen von den durch Temperaturänderungen bedingten Schwankungen, die sich selbst bei Freiluftaufstellung innerhalb ± 10 % bewegen, dauernd erhalten und erfordert daher keinerlei Wartung.

In welchem Masse sich z. B. für Stickstoff die elektrische Festigkeit steigern lässt, zeigt Fig. 7, in welcher vergleichsweise die Schlagweiten bei einer Spannung von 100 kV_{eff} in Luft, Oel und Stickstoff von 16 kg/cm² dargestellt sind. Die Ueberlegenheit des Pressgases erstreckt sich sowohl über homogene, als auch inhomogene Felder. Bei 16 kg/cm² kann man in Stickstoff, Luft oder Kohlensäure mit einem Verhältnisfaktor von ca. 6 bis 7 zuverlässig rechnen, d. h. die Anfangsspannung, Funkenspannung und Gleitbüschelspannung einer Konstruktion ist in Pressgas von genanntem Druck in diesem Verhältnis grösser als in atmosphärischer Luft.

In den Pressgaskondensatoren für Phasenkompensation wird unter Vakuum getrocknetes, dünnes Hadern- oder Zellulosepapier zwischen Aluminiumfolien verwendet. Das Papier wird durch das Pressgas (N_2) gewissermassen imprägniert und gewinnt dabei erheblich an elektrischer Festigkeit. Die Papierfasern wirken ausserdem als Schikanen für die Elektronenbewegung, welchem Umstande es wohl zuzuschreiben ist, dass die Festigkeit gegenüber Stoßspannungen erheblich höher ist als gegenüber Dauerspannungen, was für

Pressgas allein wenigstens im homogenen Feld nicht der Fall ist. Die dielektrischen Verluste sind die des Papieres, ohne Rücksicht auf Natur und Druck des Gases. Sie sind von der Grössenordnung wie sie für ölimprägnierte Kondensatoren gemessen werden, dagegen sind sie von der Temperatur fast unabhängig. Fig. 8 zeigt einen 3-Phasen-Pressgaskondensator für 90 kVAr, 4000 V, 60 Per./s in Mastmontage. Der Kesseldurchmesser ist 52 cm, die Höhe über die Klemmen gemessen 140 cm, das Gewicht 370 kg.

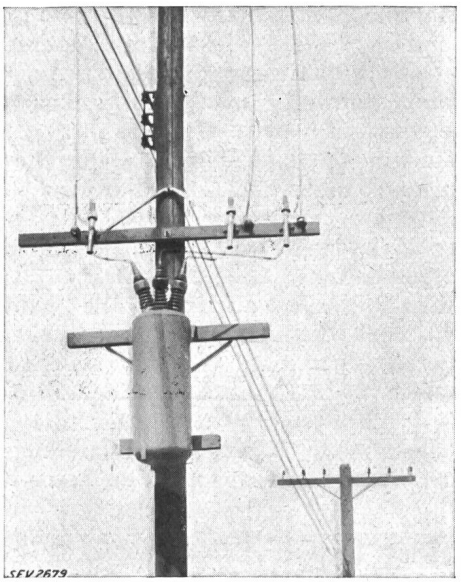

Fig. 8.
Pressluftkondensator, auf Mast montiert.

Als Füllgas gibt man Stickstoff den Vorzug vor Luft, um Oxydation auszuschliessen. Die Schäden durch Glimmen und Gleitfunken an Papierisolation sind bei Abwesenheit von Sauerstoff und nicht zu langer Dauer der Ueberbeanspruchung unvergleichlich geringer als in Luft. Eine Schwärzung (Verkohlung) tritt erst beim vollständigen Durchschlag ein.

Ueber pressgasisolierte Leistungstransformatoren liegen noch keine eingehenden Erfahrungen vor. Kleinere Einheiten sind gebaut worden und haben sich gut bewährt. Dasselbe gilt von Messtransformatoren. Bei Leistungstransformatoren verwendet man zur Verbesserung der inneren Wärmeabgabe zweckmässig ein Gemisch von Wasserstoff oder Helium und Stickstoff. Mit einem Mischverhältnis 50 % N_2, 50 % He werden die Temperaturverhältnisse ungefähr dieselben wie bei Oelfüllung.

Für Spezialfälle, wo Oel aus Gründen der Feuersgefahr ausgeschlossen ist und grösste Raumausnützung geboten ist, wie z. B. bei Cottrell Rauchreinigungsanlagen auf Schiffen und für grosse Wohnhäuser in Großstädten, sowie für Röntgenanlagen in Spitälern, bietet der Pressgastransformator die einzig mögliche Lösung. Einheiten von 6 kVA und 120 kV sind für ähnliche Spezialzwecke in grösserer Zahl im Betrieb. Dass der Mittel- und selbst Grosstransformator mit Pressgasisolation technisch möglich ist, kann nicht bestritten werden. Ob er wirtschaftlich wesentliche Vorteile bietet, ist m. E. noch nicht abgeklärt [58]).»

An Drehkondensatoren wurden von E. Darmstädter Untersuchungen über die Verluste bei sehr schnellen elektrischen Schwingungen unternommen [59]).

VII. Trocken-Hochspannungsapparate.

Die Tendenz nach ölfreien «trockenen» Anlagen bietet auch der Isolationstechnik neue, interessante Probleme. Auf dem Gebiete der Prüftransformatoren ist man in den letzten Jahren eher wieder zum Oel zurückgekehrt, wenn man auch verstanden hat, dessen Menge sehr einzuschränken. Hingegen wurden Trockenmesswandler geschaffen, die weniger vom elektromagnetischen, als vom Isolationsstandpunkt aus interessant sind, so der bereits bekannte Querlochstromwandler von der Koch & Sterzel A.-G., neuerdings der Trockenwandler mit «gebogener Durchführung» der Sachsenwerke und der Stromwandler der Ateliers de Constructions Electriques de Delle, dessen Isolation sozusagen ein grosser Hewletisolator ist, weiterhin der Fischer-Trockenspannungswandler von Koch & Sterzel. Bei allen diesen Apparaten besteht der Hauptisolationskörper aus Porzellan und das wesentlichste Merkmal besteht darin, Trennfugen zu vermeiden. Die Betriebsspannung für solche Konstruktionen war bisher auf etwa 18 bis 25 kV begrenzt. Auf erheblich höhere Spannungen soll der Trockenspannungswandler von Imhof [60]) (Bauart Koch & Sterzel) führen. Es ist zu erwarten, dass die nächste Zukunft auf diesem Gebiet zahlreiche Fortschritte bringen wird.

VIII. Laboratoriumseinrichtungen und Prüfmethoden.

Ueber eine hochinteressante Erweiterung der Untersuchungsmethoden für Isolierstoffe berichtet Gemant [61]). Die Ströme in Isolierstoffen werden oszillographisch aufgenommen. Die Methode gestattet, nicht nur die Grundwellen, sondern auch die Oberwellen in den Strömen zu ermitteln. Sie beruht darauf, dass eine Art Scheringbrücke nur auf die Kapazität des Prüfobjektes abgeglichen wird, so dass die an den Brückenpunkten auftretende Spannung dem Unterschiede zwischen Gesamt- und Kapazitätsstrom proportional ist. An den Brückenpunkten ist über einen Röhrenverstärker ein Oszillograph angeschlossen, der den Strom formgetreu wiedergibt. Gleicht man die Brücke auf die Grundwelle vollständig ab, so gibt das Oszillogramm allein die Oberwellen.

An drei technischen Isolierstoffen (Lackleinen, Glas und Hochspannungskabel) sind Aufnahmen gemacht worden, welche deutlich die Oberwellen zeigen.

Es besteht die Vermutung, dass jeder Isolierstoff eine ihm eigentümliche charakteristische Ober-

wellenform aufweist. Die Spannungs- und Zeitabhängigkeit des dielektrischen Verlustes drückt sich in charakteristischer Weise in diesen Oberwellen aus, so dass es verständlich ist, dass jedes Dielektrikum seine ihm eigentümliche Oberwellenform aufweist. Die Oberwellen zeugen von Elektronenstössen und Ionisation, also von Vorgängen, die für den Isolierstoff schädlich sind, auch wenn sie in der festen Phase stattfinden.

Eine weitere, sehr hübsche und möglicherweise noch manchen Aufschluss gebende Untersuchungsmethode wurde von Gemant im Jahre 1931 angegeben unter der Bezeichnung «Elektrophotographie von Isolierstoffen» [62]). Die Methode gestattet, einerseits Dichte und Verteilung der feinsten Poren in Isolierstoffen festzustellen, anderseits, auf blasenfreie Stoffe angewandt, in die dem Durchschlag zugrunde liegenden Vorgänge Einblick zu erhalten. Photographisches Papier weist, zwischen Plattenelektroden im homogenen Feld ausgesetzt, Schwärzungen auf. Es wurde nachgewiesen, dass diese durch das Glimmen der dünnen Luftschicht, welche mit dem Papier in Serie geschaltet ist, zustande kommen. Der Effekt wird zur Untersuchung von Isolierstoffen verwendet, welche zu diesem Zwecke unmittelbar einer lichtempfindlichen Schicht aufliegen. Da die Schwärzungen durch Glimmen der im Isolierstoff eingeschlossenen Luftbläschen entstehen, erhält man ein gewisses Bild über die Heftigkeit und Verteilung der feinsten Poren und Risse im Isolierstoff. Es ergab sich, dass eingeschlossene Bläschen nur unter dem Einfluss von Wechselspannung glimmen, bei Gleichspannung dagegen nicht. Aber auch einige vollständig blasenfreie Isolierstoffe, sowohl flüssige wie feste, geben zu Schwärzungen Anlass. Hier handelt es sich um die Stossionisierung und das Glimmen in der flüssigen und festen Phase.

Die gleiche Erscheinung wurde schon im Jahre 1920 von G. Reboul [63]) beobachtet, jedoch mit sehr ungünstiger Versuchsanordnung hervorgerufen und unrichtig gedeutet.

Ein recht hübsches Phänomen des Auftretens von Aequipotentiallinien im elektrischen Feld wurde von P. Böning, Woosung (China), entdeckt [64]). Wird eine mit Elektroden beklebte Glasscheibe mit aktiver Kohle (u. a.) bestäubt, so bilden sich, sobald an die Elektroden eine hinreichende Spannung gelegt wird, Staublinien und -Bänder aus, die Aequipotentiallinien entsprechen. Die veröffentlichten photographischen Bilder zeigen, dass die Liniensysteme ausserordentlich deutlich sind. Auf Grund bereits bekannter Erscheinungen, insbesondere auf Grund von Raumladungen, Feldumbildungen, Ionenstauungen, kann das Phänomen gedeutet werden.

Dr. J. Labus fand eine neue experimentelle Sondenmethode zur Ermittlung von Potentiallinien. Erforderlich ist ein Modell des Versuchsbereiches, ein Röhren-Voltmeter, ein Potentiometer und eine 1000periodige Wechselstromquelle [65]).

Die Firma Hartmann & Braun A.-G. brachte eine neue schreibende Ueberspannungsmesseinrichtung nach Binder-Heyne (Institut für Starkstrom- und Hochspannungstechnik der technischen Hochschule Dresden) auf den Markt. Die Messeinrichtung verwendet als wesentlichen Bestandteil die sogenannte Staffelfunkenstrecke [66]). Diese ist durch eine besondere Schaltung in Verbindung mit einem H. & B.-Zeitschreiber gebracht, der das Ansprechen der einzelnen parallel geschalteten Funkenstreckenelemente, die auf verschiedene Schlagweiten eingestellt sind, aufzeichnet. Beim Auflauf einer Welle sprechen um so mehr «Schreibfedern» an, je höher die aufgetretene Ueberspannung ist. Für Spannungen über 25 kV wird ein kapazitiver Spannungsteiler vorgeschaltet.

Mit dem Bestreben, auch für hohe Spannungen einen statischen Spannungsmesser kleiner Abmessungen herzustellen, schuf W. Rogowski ein Pendel-Elektrometer [67]) für hohe Spannungen, in Anlehnung an das Blattelektroskop. Auch die an sich bereits bekannten statischen Spannungsmesser erfuhren weitere Verbesserungen im Sinne der Anpassung an die technischen Bedürfnisse und der Erweiterung der Messbereiche bis zu sehr hohen Spannungen.

Fig. 9.
Statisches Voltmeter von Trüb, Täuber & Cie. für 1 Million Volt.

K. Kuhlmann schuf einen Messkondensator mit einer von null exakt linear ansteigenden Kapazität [68]).

Für Laboratoriumsmessungen ist die Kugelfunkenstrecke immer noch das wertvollste Spannungsmessgerät geblieben, besonders wegen der vorzüglichen Kontrollmöglichkeit. Eine sehr wert-

volle Vergleichsuntersuchung, welche die Kenntnis der Kugelfunkenstrecke ergänzt, stellt die Arbeit von S. Franck «Eichspannungen für Kugelfunkenstrecken» [69]) dar. Sämtliche wichtigeren Messungen an Kugelfunkenstrecken in Luft werden darin zusammengestellt und mit den VDE-Normen verglichen. Die Abweichungen, besonders der neueren Messungen, von den deutschen Normen (Peeksche Formeln) sind erheblich. Es werden neue Eichwerte für Kugeln bis zu 200 cm Durchmesser angegeben und ihre Ableitung aus Aehnlichkeitsbeziehungen gezeigt.

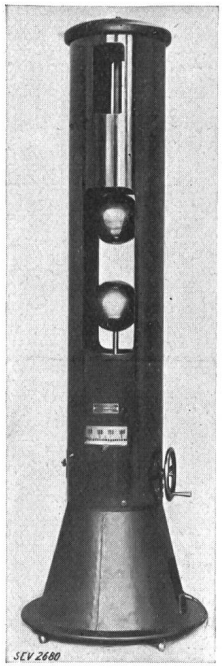

Fig. 10.
Kugelmessfunkenstrecke der Micafil A.-G.

IX. Allgemeines über technische Isolationen.

Die Erkenntnis klärt sich immer mehr, dass es zwei Grundmethoden gibt, nach denen sich das elektrische Feld beherrschen lässt. Eine wirtschaftliche Anwendung dieser Prinzipien wird schliesslich zu einer verhältnismässig leichten Ueberwindung der Höchstspannungsschwierigkeiten führen. Die eine Methode ist diejenige der Potentialsteuerung mit dem Prinzip der rechnerisch leicht zugänglichen Seriekondensatoren und oder mit der induktiven Steuerung. Das zweite, oft noch fruchtbarere Prinzip, allerdings nur in isolierenden Flüssigkeiten und komprimierten Gasen anwendbar, ist dasjenige der Barrierensysteme. Barrieren aus Material, das in erster Linie eine hohe momentane Durchschlagsfestigkeit besitzt, haben den Zweck, Faserstoffbrücken und Gaswege zu zerschneiden und somit quasi die Durchschlagsfestigkeit der isolierenden Flüssigkeit zu erhöhen. Die durch die Erfahrung erprobten Hauptlehrsätze der Barrierentechnik sind:

1. Die Verteilungsdichte ist proportional der Feldstärke zu wählen, soweit dies praktisch möglich ist, d. h. an den Stellen grosser Spannungsgradienten sind die Barrieren am dichtesten zu lagern.

2. Die Zahl der Barrieren ist so gross zu wählen, als dies mit Rücksicht auf andere Bedingungen (Preis, mechanische Festigkeitsforderungen, Oelzirkulation usw.) möglich ist; deren Stärke ist in Abhängigkeit von deren Zahl zu wählen und zwar so, dass für die gesamte dielektrische Schicht die grösstmögliche elektrische Festigkeit erreicht wird (Es gibt in jedem Falle ein Minimum).

3. Die Momentan-Durchschlagsfestigkeit der Barrieren muss so gross sein, dass die gesamte Prüfspannung am Dielektrikum kurzzeitig durch die Barrieren allein getragen werden kann.

Diese Erkenntnisse sind bei Einzelnen in den letzten Jahren mehr oder weniger klar in ihren Konstruktionen zum Ausdruck gekommen, wenn sie auch noch nirgends vollständig ausgesprochen wurden und die eigentliche Wissenschaft der Barrierentechnik noch der Entwicklung harrt. Beschränkte man sich früher in der Hauptsache auf die Verwendung von Zylindern, Rohren, Platten und Elektrodenisolationen (in Form von Umbändelungen, Umpressungen und aufgeklebten Faserstoffisolationen), so kommen seit einigen Jahren in stets erhöhtem Masse winkel- und U-förmige Kragen zur Verwendung, vor allem im Transformatorenbau.

Auch in Luft ist neuerdings der Anwendung von Barrieren viel Aufmerksamkeit geschenkt worden. In einer Arbeit von H. Roser [70]) wird die Wirkung von dünnen Schirmen, welche im unhomogenen elektrischen Feld senkrecht zur Entladerichtung in Luft angebracht sind, für verschiedene Elektroden-

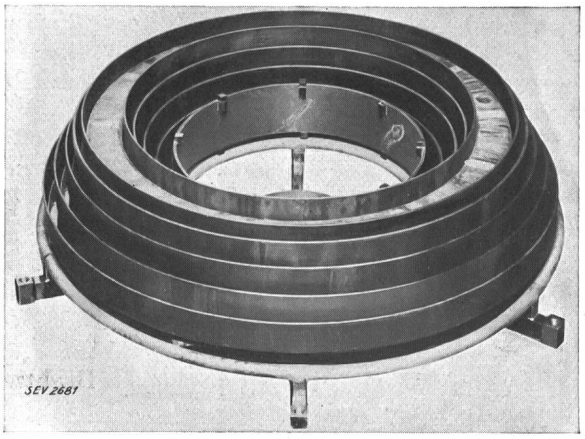

Fig. 11.
Winkelringe, ineinandergestellt.

formen bei Stoss-, Gleich- und Wechselspannung und verändertem Schirmmaterial untersucht. Es ergaben sich folgende Schirmeffekte:

a) Erhöhung der Durchschlagspannung,
b) Begrenzung der Vorströme,
c) Stabilisierung der leuchtenden Vorentladungen.

Die Porzellantechnik macht viel Gebrauch von Barrieren gegen Oberflächenentladungen [71]).

Die induktive Potentialsteuerung fand eine Reihe interessanter Anwendungen, vor allem im Messwandlerbau, so u. a. durch BBC [72]) (Meyerhans), Koch & Sterzel [73]), Imhof [60]), Fischer [74]) (Köln).

Die Feldverteilung zwischen zwei gegeneinander versetzten parallelen Halbebenen und namentlich zwischen drei gegeneinander versetzten parallelen Halbebenen wurden neuerdings von Grösser eingehend untersucht, womit der Technik der Potentialsteuerung ein guter Dienst erwiesen wurde [75]).

Die Methoden der Potentialsteuerung und der Barrierensysteme wurden in den vergangenen Jahren gelegentlich in sehr geschickter Weise kombiniert (Oelklemme von Micafil A.-G., H. Wirth).

X. Erzeugung hoher Spannungen.

Auf dem Gebiete der Prüftransformatoren sind seit dem letzten Bericht (Bull. SEV 1929, Nr. 6) keine auffallenden Neuerungen bekannt geworden; aber die Zahl der industriellen Prüflaboratorien für Spannungen von 500 kV und mehr hat dank der einfacheren Erzeugungsmöglichkeit rasch zugenommen. Während die 50periodige Wechselspannung von 1 Million Volt in Europa schon in verschiedenen Prüfstationen erreicht wurde, ist zur Zeit in der Porzellanfabrik Norden (Kopenhagen) eine neue Prüfstation von ungewöhnlichem Ausmass im Bau, in welcher eine Spannung von 1½ Millionen Volt gegen Erde zur Verfügung stehen wird. Die Prüfstation besteht aus einer grossen Prüfhalle von 21·36 m Grundfläche sowie einem etwas niedrigeren Anbau von 21·24 m Grundfläche. In der grossen Halle, die ein 21 m hohes Gebäude ohne Etagen oder Scheidewände darstellt, wird eine 2-Millionen-V-Prüfanlage für Gleichstromstossproben, eine 1-Million-V-Prüfanlage für Hochfrequenzprüfungen und ein Transformatoraggregat für Einphasen-Wechselstrom, bestehend aus zwei kaskadenverbundenen ¾-Millionen-V-Transformatoren, installiert (Koch & Sterzel A.-G.). Die Leistungsfähigkeit dieser Transformatoren beträgt 900 kVA.

Erwähnenswert sind die Versuche der deutschen Physiker Brasch und Lange auf dem Monte Generoso bei Lugano, die mit Hilfe atmosphärischer Elektrizität Spannungen bis 15 Millionen V gegen Erde verfügbar machten. Zwischen zwei überhöhten Berggipfeln war ein 670 m langes Drahtseil isoliert aufgehängt.

Ebenfalls Spannungsstösse gewaltiger Höhe wurden künstlich mit Stossgeneratoren erzeugt. Die AEG Berlin hat durch Verwendung von 250 Kondensatoren, die parallel aufgeladen und dann in Serie entladen werden, Stoßspannungen von 2,5 Millionen V hervorgebracht. Es gelang, Kathodenstrahlröhren für diese Spannung herzustellen, so dass Kathodenstrahlen gewaltiger Geschwindigkeit und damit Röntgenstrahlen von enormem Durchdringungsvermögen (18 cm Bleiwandung) erzeugt werden konnten. Um die Härte der Röntgenstrahlung weiterhin zu steigern und um eine Atomzertrümmerung in grösserem Umfange zu ermöglichen, soll ein Stossgenerator für Spannungen von 7 Millionen V gebaut werden.

In einem Spannungslaboratorium in Pittsfield (Mass.) besteht eine Stossfunkenstrecke für 5 Millionen V, die bei Parallelschaltung zweier Hälften eine Stoßspannung von 2,5 Millionen V liefert und dabei eine Gesamtkapazität von 10 000 μF aufweist, nach Angaben der General Electric Review [76]) die grösste Kapazität, die bis heute ein solcher Apparat aufweist. Ein neuer 3-Millionen-V-Stossgenerator soll sogar die doppelte Kapazität des letzteren erhalten. Zur Messung der Spannung wurde eine vertikale Funkenstrecke mit Kugeln von 2 m Durchmesser aufgestellt.

Bemerkenswert hohe Spannungen wurden neuerdings auch für Röntgenröhren angewandt, um näher an die Wirkung der γ-Strahlen des Radiums zu gelangen. Während es bisher möglich war, Röntgenröhren nur mit etwa 200 kV *dauernd* zu betreiben, wird von H. Herrmann und R. Jaeger [77]) eine Anlage beschrieben, die 400 kV im Dauerbetrieb anzuwenden gestattet. Dabei werden vier Glühkathoden-Gleichrichter in Serie zur Gleichrichtung benützt [78]). Auch die General Electric Review [76]) berichtet von einem Hochspannungsgleichrichter für 400 kV Gleichspannung bei 0,0030 A für Röntgenröhren.

Literaturverzeichnis.

1) The Electrician, Bd. 103, S. 423.
2) ETZ 1931, Heft 10, S. 327.
3) Archiv für Elektrotechnik 1929, S. 305.
4) Archiv für Elektrotechnik 1929, S. 127.
5) Archiv für Elektrotechnik 1930, S. 151.
6) Archiv für Elektrotechnik 1930, S. 174.
7) Archiv für Elektrotechnik 1929, S. 279.
8) Archiv für Elektrotechnik 1931, S. 826.
9) Archiv für Elektrotechnik 1930, S. 37.
10) Zeitschrift für Techn. Physik 1930, S. 345.
11) Zeitschrift für Techn. Physik 1930, S. 544.
12) Archiv für Elektrotechnik 1929, S. 323.
13) Zeischrift für Techn. Physik 1930, S. 349.
14) Archiv für Elektrotechnik 1930, S. 525.
15) Archiv für Elektrotechnik 1932, Heft 1.
16) Archiv für Elektrotechnik 1930, S. 569.
17) Archiv für Elektrotechnik 1931, S. 551.
18) Archiv für Elektrotechnik 1931, S. 597.
19) Archiv für Elektrotechnik 1931, S. 607.
20) Archiv für Elektrotechnik 1931, S. 647.
21) Archiv für Elektrotechnik 1930, S. 88.
22) Zeitschrift für Techn. Physik 1930, S. 373.
23) ATM, Lieferung 6, Dezember 1931.
24) Micafil-Nachrichten 1932, Nr. 3, ferner Bull. SEV 1932, Nr. 5, S. 112.
25) Bull. SEV 1932, Nr. 5, S. 112; ferner Rapport Nr. 66 der Conférence Internationale des Grands Réseaux électriques à H. T., Paris 1931.
26) Bull. SEV 1931, Nr. 11, S. 245.
27) BBC-Mitteilungen Okt. 1930, S. 304.
27) BBC-Mitteilungen Okt. 1930, S. 304. Bull. SEV 1931, Nr. 24, S. 589.
28) Bureau of Standards «Journal of Research» Aug. 1931, No. 2, Vol. 7.
29) Archiv für Elektrotechnik 1931, S. 715.
30) Archiv für Elektrotechnik 1932, 3. Heft, Bd. XXVI.
31) ETZ 1931, Heft 46; Bull. SEV 1932, Nr. 3, S. 76.
32) Archiv für Elektrotechnik 1931, 6. Heft, S. 447.
33) JAIEE, Bd. 41, S. 293; ETZ 1931, Heft 23, S. 739.
34) Ueber die Alterung organischer Werkstoffe. Von Dr. H. Stäger, Baden.
35) Elektrotechnische Isoliermaterialien. 1931. Stuttgart, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft m. b. H., Bd. XV. «Chemie in Einzeldarstellungen». S. Bull. SEV 1932, Nr. 14, S. 369.
36) Micafil-Nachrichten 1931, Nr. 2.
37) Sonderdruck aus Kolloidchemische Beihefte, Monographie zur reinen und angewandten Kolloidchemie. Bd. XXXII, Heft 1—4, 1930.
38) Hescho-Mitteilungen, Heft 56; Stemag-Nachrichten 1931, Heft 9; Analoge Untersuchungen der A.-G. Rosenthal & Co.
39) Hescho-Mitteilungen, Heft 50.
40) General Electric Review, Vol. 35, 1932, No. 1.
41) Hescho-Mitteilungen, Heft 41/42 und 44/45.
42) Hescho-Mitteilungen, Heft 53/54 und 57/58.
43) Hescho-Mitteilungen, Heft 59/60.
44) Hescho-Mitteilungen, Heft 63.

45) Mitteilungen der Porzellanfabrik Rosenthal, Nr. 15, 16 und 18.
46) VDE-Fachberichte 1931 der Frankfurter Tagung.
47) Archiv für Elektrotechnik 1932, in Vorbereitung.
48) Archiv für Elektrotechnik 1931, 3. Heft, S. 181.
49) Bull. SEV 1932, Nr. 9, S. 198.
50) ETZ 1932, S. 455.
51) Rapport No. 66 der Conférence Internationale des Grands Réseaux électriques à H. T. 1931. A. Imhof: Progrès réalisés dans la construction des isolateurs de traversée et particulièrement des isolateurs de traversée type condensateur.
52) Micafil-Nachrichten Nr. 2, H. Wirth: Oelgefüllte Durchführungen.
53) Hescho-Mitteilungen, Heft 29/30, S. 40; Heft 47/48, S. 1539; ETZ 1927, Heft 19, S. 290.
54) ETZ 1931, Heft 24, S. 769.
55) DRP 512 804 vom 10.8.1928.
56) Schweiz. Patent Nr. 105 092 von A. Imhof.
57) Bull. SEV 1932, Nr. 3. H. Wirth: Durchführungsisolatoren, Richtlinien für die Wahl verschiedener Ausführungsarten.
58) Näheres über Pressgasisolierung s. Bull. SEV 1931, Nr. 11, S. 245.
59) Archiv für Elektrotechnik 1930, S. 701.
60) Rapport No. 65 der Conférence Internationale des Grands Réseaux électriques à H. T. Paris. 1931.
61) Oszillographie von Strömen in Isolierstoffen. Archiv für Elektrotechnik 1930, S. 683.
62) Zeitschrift für Techn. Physik 1931, Nr. 5, S. 250.
63) C. R. 171 (1920) 1052 und 173 (1921). 1162.
64) Zeitschrift für Techn. Physik 1931, Nr. 1, S. 50. (Mitteilungen aus dem elektrotechnischen Institut der Tung-Chi-Universität.)
65) General Electric Review 1929, S. 383 u. 548, Vol. XXII. Auszug in A. f. E. 1931, 1. Heft, S. 17.
66) Archiv für Elektrotechnik 1930, Bd. 24, Heft 4.
67) Archiv für Elektrotechnik 1931, 7. Heft, S. 521.
68) Archiv für Elektrotechnik 1931, 10. Heft, S. 666.
69) ETZ 1930, Nr. 22, S. 778.
70) ETZ 1932, Nr. 17, S. 411.
71) Hescho-Mitteilungen, Heft 63.
72) BBC-Mitteilungen Nr. 2, S. 89, Februar 1930.
73) Mitteilungen aus dem Arbeitsgebiet der Koch & Sterzel A.-G., Heft T 17/1930 und Heft T 18/1931.
74) ETZ 1931, Nr. 34, S. 1084.
75) Archiv für Elektrotechnik 1931, 3. Heft, S. 193.
76) General Electric Review 1932, Nr. 1, Vol. 35.
77) Zeitschrift für Techn. Physik 1930, S. 461.
78) ETZ 1931, Heft 27, S. 859.

Miscellanea.

Internationales Institut für Dokumentation. Das Institut International de Documentation (Institut International de Bibliographie), Bruxelles, Palais Mondial, hält vom 30. August bis 3. September d. J. seine 11. Konferenz ab. Anmeldung und Auskunft bei Dr. Walter Schürmeyer, Bibliothek für Kunst und Technik, Frankfurt a. M., Neue Mainzerstrasse 47.

3e Réunion Plénière, du 15 au 21 juillet 1932 à Paris, de la Commission Mixte Internationale pour les expériences relatives à la protection des lignes de télécommunication et des canalisations souterraines (CMI).

Nos lecteurs connaissent déjà le but et l'organisation de ce groupement international, fondé en 1927 sous l'impulsion du «Comité Consultatif International des communications téléphoniques à grande distance» (CCI), par l'article de la Direction Générale des Télégraphes, Berne, paru au Bulletin 1928, No. 10, p. 332/333, et la note insérée dans le Bulletin 1931, No. 1, p. 30. Cette dernière annonçait en particulier que la 3e réunion plénière de la CMI (la 1re ayant eu lieu en février 1927 à Berne et la 2e en avril 1929 à Paris) se tiendrait à Paris au printemps 1931. Diverses circonstances imprévues ayant nécessité le renvoi de cette réunion, celle-ci n'a pu avoir lieu que tout dernièrement, du 15 au 21 juillet 1932 à Paris.

Nous rappelons que la CMI comprend deux sections: la première s'occupe de la *protection des lignes de télécommunication contre l'action perturbatrice des installations d'énergie*, et la seconde de la *protection des canalisations souterraines contre la corrosion due à l'électrolyse et aux actions chimiques*. Chaque section répartit en outre ses travaux entre un certain nombre de Comités d'Etudes, dont voici la liste:

1re Section (depuis 1927).

1er CE: Mesure de l'influence perturbatrice des installations d'énergie.
2e CE: Mesures à prendre pour diminuer les troubles dus aux redresseurs.
3e CE: Influence de la mise du point neutre à la terre dans les installations à courants polyphasés.
4e CE: Importance que présente la bonne conductibilité des voies dans les installations de traction à courant alternatif pour la valeur de la tension induite sur les lignes téléphoniques voisines.
5e CE: Influence sur les lignes de télécommunication des variations accidentelles ou normales du courant continu des lignes de traction.
6e CE: Limites tolérables à admettre pour les bruits induits sur les lignes téléphoniques.
7e CE: Dissymétries des circuits téléphoniques à grande distance par rapport au sol.
8e CE: Induction mutuelle entre deux lignes.
9e CE: Comparaison des divers dispositifs de protection contre les chocs acoustiques.
10e CE: Influence des croisements des lignes d'énergie électrique à haute tension et des lignes de télécommunication.

2e Section (1929—1932).

1er CE: Bibliographie de la corrosion.
2e CE: Naissance des courants vagabonds.
3e CE: Effet des courants vagabonds dans les lignes de télécommunication et les canalisations souterraines (eau, gaz, électricité, etc.).

Comme on voit, si les travaux de la CMI sont en général tous du domaine de l'électrotechnique (courant fort et courant faible), ceux de la 1re section intéressent plus spécialement les administrations du téléphone et du télégraphe, l'industrie électrique des machines et des appareils, les exploitants de lignes d'énergie et de traction, tandis que les travaux de la 2e section ont une importance capitale pour toutes les industries, sociétés ou administrations possédant des canalisations métalliques souterraines, de même que pour les fabricants de câbles, de tuyaux et d'accessoires, comme les joints et enduits isolants, etc. Les délibérations du mois dernier, à Paris, ont fait ressortir en particulier la vigilance qu'il convient d'exercer sur les phénomènes de corrosion dus aux courants vagabonds. Pour mener à bien ces recherches, une division plus poussée du travail a paru opportune; c'est pourquoi, en vue de décharger les deux derniers Comités d'Etudes, on a remplacé les 3 comités de la 2e section par les 8 comités suivants:

2e Section (à partir de 1932).

1er CE: Bibliographie et bibliothèque.
2e CE: Mesure des différences de potentiel (entre rails et canalisations de toute sorte, entre deux points du sol, entre deux points du réseau de rails).
3e CE: Mesure des intensités du courant (dans les rails, dans les canalisations, dans le sol, à l'entrée ou à la sortie des canalisations).