Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 29 (1938)

Heft: 10

Artikel: Kabelmesstechnik

Autor: Foretay, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1059378

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: 09.08.2025

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

montre donc l'heureuse influence du cloisonnement de l'huile par le papier imprégné.

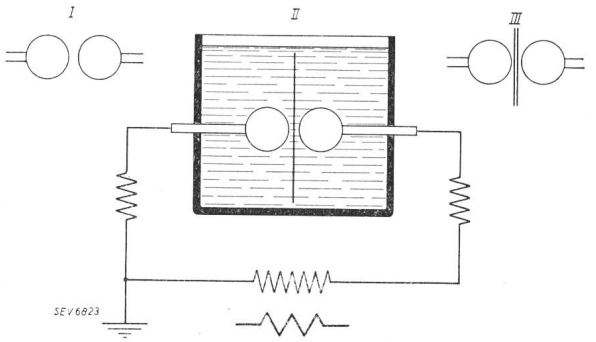

Fig. 18.
Schéma de l'expérience montrant l'influence du cloisonnement sur la rigidité diélectrique de l'huile. Ecartement des sphères 0,5 mm.

I Huile sans cloisonnement. Percement à 5 kV. *II* Huile cloisonnée par un papier de 0,11 mm. Percement à 10 kV. *III* Huile cloisonnée par deux papiers de 0,05 mm. Percement à 13 kV.

La seconde expérience est représentée schématiquement par la figure 19. Dans chaque expérience, une différence de potentiel fut créée entre les sphères. Dans les expériences 1 et 2 cette différence fut celle qui amena le passage de l'étincelle. Dans l'expérience 3 la différence fut la même que dans l'expérience 2; le claquage ne survint pas. Les indications du manomètre montrèrent que l'augmentation de pression fut minime dans le premier cas, très forte dans le deuxième et nulle dans le troisième. Il résulte de ces expériences que lorsque l'huile est placée en série avec un gaz, l'étincelle qui jaillit dans le gaz décompose l'huile qui se transforme rapidement en donnant de grandes quantités de gaz.

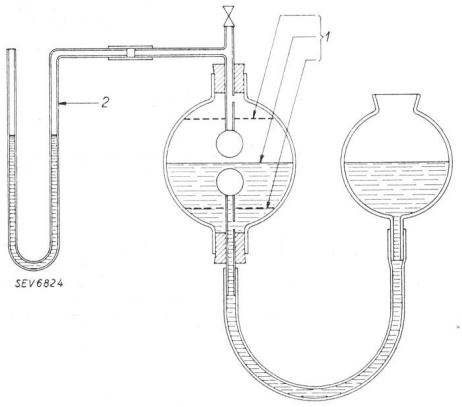

Fig. 19.
Schéma de l'expérience montrant la décomposition en gaz, de l'huile placée dans un champ électrique en série avec un gaz.
1 Niveau de l'huile. *2* Manomètre.

Il faut donc éviter que de l'air ne rentre dans un câble à huile pendant les opérations du montage et construire le câble à isolant comprimé de telle façon que la pression extérieure au câble puisse permettre les déformations nécessaires du câble pour qu'il ne se forme pas des vacuoles pendant les périodes de refroidissement.

Pour montrer la différence du degré de remplissage entre les câbles des 2 groupes, l'expérience schématisée par la figure 20 fut faite.

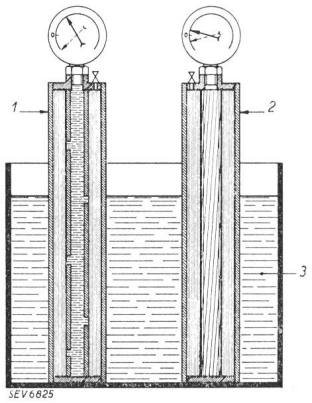

Fig. 20.
Schéma de l'expérience montrant la différence de remplissage entre un câble à huile (*1*) et un câble à matière (*2*).
3 Eau chaude, puis froide.

Lorsque les câbles s'échauffent, l'huile et la matière se dilatent conformément à leur coefficient de dilatation qui est à peu près le même. Le câble à huile étant plein, toute dilatation de l'huile provoque une forte augmentation de la pression, tandis que dans le câble à matière la pression reste pratiquement constante par suite de la présence de vacuoles dans lesquelles la matière provenant de l'augmentation du volume peut trouver place. Des phénomènes semblables mais inverses se produisent pendant le refroidissement. La pression dans le câble à huile baisse et atteint une valeur qui n'est qu'une petite fraction de la pression barométrique, tandis qu'elle ne baisse que peu dans le câble à matière.

Kabelmesstechnik.

Von *E. Foretay*, Cossonay.

Es wird das gesamte Gebiet der Kabelmesstechnik skizziert, nämlich die Rohstoffprüfung, die Ueberwachung der Fabrikation, die Prüfung des fertigen Kabels in der Fabrik und nach der Verlegung und die Fehlerortsbestimmung.

L'auteur donne un aperçu de la technique générale des câbles, et traite en particulier l'essai des matières premières, le contrôle de la fabrication, l'essai des câbles terminés en fabrique et après pose, ainsi que la recherche des défauts.

Wie in jeder anderen Industrie, sind auch in der Kabelfabrikation Prüfungen nötig, und zwar prüft man: die Rohstoffe, das Kabel während der Fabrikation und das fertige Kabel. Dazu kommt noch, wie bei der Maschinenindustrie, die Abnahmeprüfung nach der Montage. Es sollen nun diese verschiedenen Prüfungsarten näher untersucht werden:

a) Prüfung der Rohstoffe.

Die hauptsächlichsten Rohstoffe der Kabelindustrie sind Kupfer, Papier, Oele und Isolationsmassen, Blei, sowie die Schutzverkleidungen wie Papier, Jute, Armierung und ihre Imprägnierungsprodukte.

Das Kupfer.

Seine wichtigste Eigenschaft ist die elektrische Leitfähigkeit, die mit Hilfe der Thomson-Brücke gemessen wird. Man kann damit ein Stück von 50 cm bis 1 m Länge mit einer Genauigkeit einiger Tausendstel kontrollieren. Da das verwendete Kupfer stets hochwertiges Elektrolytkupfer ist, kann man von einer chemischen Analyse absehen, da das Vorhandensein von Verunreinigungen ohnehin durch die sehr empfindliche Leitfähigkeitsmessung festgestellt würde. Nach den SEV-

Normalien wird für die Leitfähigkeit ein Minimalwert von 57 $\frac{m}{Ohm\ mm^2}$ bei 20° C verlangt.

Für die Bleikabel, welche bei der Fabrikation und Verlegung auf- und abgewickelt werden, ist natürlich eine bestimmte Biegsamkeit erforderlich. Das für die Leiter verwendete Kupfer muss demnach ausgeglüht werden. Durch mechanische Prüfungen wird untersucht, ob es genügend weich ist. Nach den SEV-Normalien wird für Leiterkupfer eine maximale Zugfestigkeit von 20 bis 27 kg/mm² vorgeschrieben. Die nicht vorgeschriebene Bruchdehnung darf ungefähr 30 % erreichen.

Das Papier.

Das Isolationspapier für Kabel muss gewisse Haupteigenschaften aufweisen. Damit es genügend stark mit Isolationsmasse oder Oel imprägniert werden kann, muss es vor allem genügend porös sein. Diese Eigenschaft wird mit einem Spezialapparat geprüft: Man misst die Zeit, welche ein bestimmtes Luftvolumen benötigt, um eine unter konstanter Druckdifferenz stehende Papierprobe von gegebenen Abmessungen zu durchdringen. Nach vollzogener Imprägnierung muss das Papier eine möglichst hohe dielektrische Festigkeit und gleichzeitig eine gute Wärmeleitfähigkeit aufweisen, um die durch den Stromdurchgang im Leiter erzeugte Wärme leicht abzuleiten. Es sind dies zwei beinahe gegensätzliche Eigenschaften, die durch geeignete Versuche kontrolliert werden. Ueberdies müssen die guten mechanischen Eigenschaften auch nach der Trocknung und Imprägnierung erhalten bleiben, damit das Kabel nicht brüchig wird. Man untersucht diese Eigenschaft durch Zugversuche an Papierproben oder durch Biegen eines fertigen Kabelstückes. Schliesslich ist es besonders bei Höchstspannungskabeln vorteilhaft, über Papierarten mit verschiedenen Dielektrizitätskonstanten zu verfügen. Die entsprechenden Untersuchungen werden wiederum an Proben unternommen.

Oele und Imprägniermassen.

Die Imprägnier-Masse dient dazu, dem Papier die verlangten elektrischen Eigenschaften zu verleihen. Die wesentlichsten Bestandteile dieser Mischungen bilden die Mineralöle. Für Höchstspannungskabel werden die dünnflüssigen Oele verwendet, während bei den Massekabeln die dicken Oele (Zylinderöle) zur Anwendung kommen, wobei ihre Viskosität durch Kolophonium erhöht wird. Diese beiden Produkte werden durch chemische Analyse auf das Vorkommen von Verunreinigungen untersucht. Die wichtigsten physikalischen Charakteristiken, welche durch geeignete Apparate untersucht werden können, sind die Viskosität und der Schmelzpunkt. Das Wesentliche bilden jedoch die elektrischen Eigenschaften wie die dielektrische Festigkeit, welche dadurch gemessen wird, dass man eine steigende Spannung an zwei in eine Probe getauchte Elektroden anlegt, ferner der Isolationswiderstand (mit Gleichstrom gemessen) und vor allem die dielektrischen Verluste, die durch einen Spezialapparat gemessen werden. Dieser stellt eine Art demontierbaren Kondensator dar, dessen Dielektrikum aus einer Oelprobe oder aus dem zu untersuchenden Material besteht. (Fig. 1.) Dieser Versuch wird bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt. All diese erwähnten elektrischen Messungen sind sehr schwierig durchzuführen, da bei den kleinen Proben eine grosse Empfindlichkeit zur Erlangung von befriedigenden Resultaten erforderlich ist, und da auch Verunreinigungen, wie pflanzliche Faserteilchen, beim Messen der dielektrischen Festigkeit einen bedeutenden Fehler verursachen können. Diese Fasern (z. B. Baumwollteilchen), welche Feuchtigkeit enthalten, legen sich, unter dem Einfluss der Spannung zwischen die Elektroden und verursachen eine verfrühte Entladung.

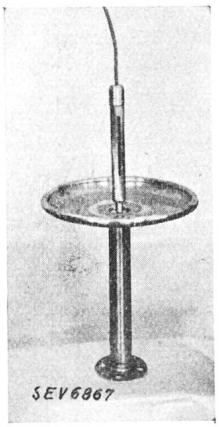

Fig. 1.
Apparat zur Prüfung von Oelen und Imprägniermassen.

Das Blei.

Das Blei, welches einen wasserdichten Mantel für das Kabel bildet, muss rein sein (wenigstens 99,5 %). Fremdkörper in Form von Körnern oder Teilchen, welche Löcher in dem aus der Presse herauskommenden Bleimantel hervorrufen könnten, müssen vermieden werden. Im allgemeinen ist es nicht schwierig, das handelsübliche Blei mit den verlangten guten Eigenschaften zu erhalten.

Schutzverkleidungen.

Der Bleimantel muss gegen Korrosion durch im Erdboden vorhandene Flüssigkeiten und überdies auch mechanisch geschützt werden. Ausserdem kann er in bestimmten Fällen durch vagabundierende Ströme angegriffen werden, welche von Gleichstromanlagen herrühren (Strassenbahnnetze usw.). Einen wirksamen Schutz bildet ein Spezialband, das direkt auf das Blei aufgebrachte «Elektronenfilter» [1]). Einen Schutz gegen chemische Einflüsse verleihen Papierbänder, die mit Asphaltöl imprägniert und mit einer Juteumspinnung versehen sind, welche ihrerseits ebenfalls mit Asphaltöl imprägniert ist. Das Ganze wird mit einem Gemisch von Teer oder Bitumen warm übergossen. Diese Materialien dürfen jedoch keine Beimischungen enthalten, welche das Blei angreifen könnten (Phenol, Ammoniak), was durch eine chemische Analyse geprüft wird. Im übrigen muss das Imprägnierungsmaterial genügend plastisch sein, um beim Rollen des Kabels nicht zu brechen; anderseits darf es aber nicht so plastisch sein, dass es, wenn sich das Kabel im Betrieb erwärmt, fliesst. Die zum mechanischen Schutz des Kabels verwendete Eisenarmierung soll genügend biegsam sein,

[1]) Bull. SEV 1937, Nr. 3, S. 54.

da sie auf das Kabel aufgewickelt wird, und dabei eine genügend grosse Zugfestigkeit besitzen muss. Der Zerreissversuch prüft diese Eigenschaft.

Nach diesen Untersuchungen der Rohstoffe kommen wir zu den Prüfungen bei der Fabrikation.

b) Kontrolle der Fabrikation.

Unter den verschiedenartigen Fabrikationsverfahren stellen die Trocknung und Imprägnierung die am schwierigsten kontrollierbaren und zugleich wichtigsten Vorgänge dar. Man kann diese Operation mit elektrischen Messungen verfolgen. Im Verlaufe der Trocknung im Vakuum variieren der Isolationswiderstand und die Kapazität, ebenso während der Imprägnierung. Die Kapazität steigt, bis das Papier mit Imprägniermasse gesättigt ist, wobei man die Operation mit Kapazitäts- und Isolationsmessung des im Imprägnierungsbehälter befindlichen Kabels kontrollieren kann. Man hat sogar Registrierapparate, mit deren Hilfe man den Prozess ununterbrochen verfolgen kann.

c) Prüfung der fertigen Kabel.

Die mit dem Bleimantel versehenen fertigen Kabel werden zur Prüfung ihrer Eigenschaften einer Serie von Versuchen unterworfen.

Zwei nicht besonders wichtige, doch immerhin interessante Messungen stellen die *Kapazitäts-* und *Isolations*messung dar. Mit Hilfe eines sehr empfindlichen Spiegelgalvanometers vergleicht man die dem Kabel und der Vergleichsnormale entsprechenden Ausschläge. In den Industrielaboratorien hat man Apparate, mit denen man diese beiden Messungen rasch nacheinander ausführen kann. Mit dem ersten Galvanometerausschlag misst man die Kapazität, und, nach einer Minute Aufladung, mit grösserer Empfindlichkeit den Isolationswiderstand. Als Stromquelle dient eine Batterie von 100 bis

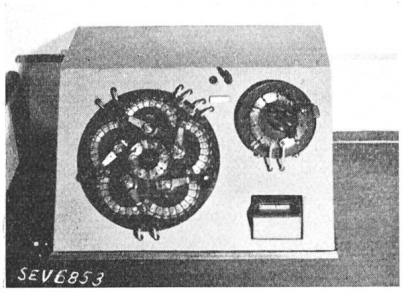

Fig. 2.
Wheatstone-Brücke.

500 V. In Cossonay besitzen wir einen Gleichrichter mit Stabilisator-Röhre, der eine vollkommen konstante Spannung von 300 V liefert, trotzdem das Netz Spannungsschwankungen bis zu 5 % aufweist. Dadurch ist man nicht mehr auf den lästigen und kostspieligen Unterhalt einer Batterie angewiesen.

Einen weiteren und wichtigeren Versuch bildet die *Messung des elektrischen Widerstandes der Leiter*. Für Kabel mit geringem Querschnitt, deren Widerstand $^1/_{10}$ Ohm übersteigt, verwendet man die Wheatstonesche Brücke (Fig. 2), wobei zweckmässig ein die Messleitung kompensierender Widerstand vorzusehen ist. Dadurch wird ein Rechnen vermieden, da nun der Apparat direkt den Widerstand des Kabels misst. Bei Kabeln mit grösserem Querschnitt, deren Widerstand nur den Bruchteil eines Ohms bildet, ist diese Messmethode zu unempfindlich und zu wenig genau. Man bedient sich einer Thomson-Doppelbrücke, der Strom- und Spannungsmessung oder auch eines Ohmmeters mit direkter Ablesung und verschiedenen Empfindlichkeitsstufen (Fig. 3). Bei diesen verschiedenen Me-

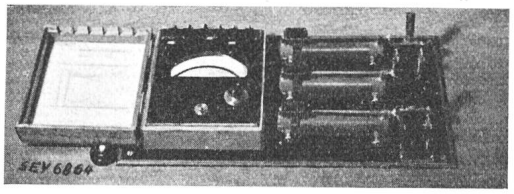

Fig 3.
Ohmmeter.

thoden kann man es leicht so einrichten, dass der Widerstand der Messleitungen das Messergebnis nicht beeinflusst. Im Hochspannungslaboratorium Cossonay sind diese beiden Apparate nebeneinander aufgestellt, wodurch man leicht den für das zu prüfende Kabel am besten passenden wählen kann (Fig. 4). Selbstverständlich muss stets die Messtemperatur angegeben werden. Es ist oft gar nicht so leicht, diese genau zu bestimmen.

Ein wichtiger Versuch ist die *Spannungsprobe*. Um sich zu vergewissern, dass jedes Kabel die Spannung, für die es gebaut ist, aushält, wird es während einer halben Stunde einer Spannung ausgesetzt, welche seine Betriebsspannung übertrifft. Gegenwärtig werden alle Niederspannungs-Papier-

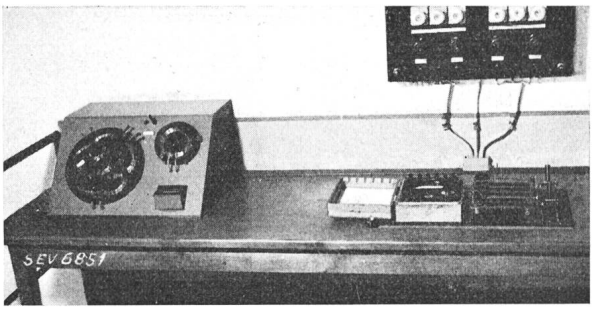

Fig. 4.
Wheatstone-Brücke und Ohmmeter.

Bleikabel (bis 1000 V Betriebsspannung) auf 4000 V zwischen den Leitern und gegen den Bleimantel geprüft. Für die mit Gummi isolierten Niederspannungskabel beträgt die Prüfspannung 2000 V. Für Hoch- und Höchstspannungskabel weist die Prüfspannung den zwei- bis dreifachen Wert der Betriebsspannung auf. Diese Prüfungen werden mit Wechselstrom von 50 Per./s ausgeführt. Die Prüfspannung liefert ein Einphasentransformator, der ganz spezielle Arbeitsbedingungen erfüllen muss, denn ein Kabel stellt einen Kondensator dar, welcher eine oft beträchtliche Scheinleistung mit einem Leistungsfaktor von praktisch 0 voreilend

aufnimmt. Unter diesen Arbeitsbedingungen ist das Spannungsverhältnis zwischen Primär- und Sekundärseite stark verschieden vom Uebersetzungsverhältnis nach den Windungszahlen und variiert mit der Last. Im weiteren müssen die Kabel bei allen Spannungen zwischen weiten Grenzen geprüft werden können, wobei die Scheinleistung sogar bei relativ niedrigen Spannungen beträchtliche Werte annehmen kann. Im allgemeinen verfügt man über mehrere Transformatoren, wovon jeder zwei oder mehr Uebersetzungsverhältnisse aufweist. So haben wir z. B. in Cossonay einen Transformator von 30 kVA bei 8 und 16 kV (Fig. 5), der mit seiner Apparatur in einer Ecke des Laboratoriums aufgestellt ist, und einen andern mit einer einstündigen Leistung von 500 kVA (Fig. 6)[2]). Dieser ist umschaltbar auf drei verschiedene Sekundärspannungen von 90, 180 oder 360 kV. Die Spannungsregelung erfolgt auf der Niederspannungsseite mit Hilfe eines Induktionsreglers, eines Regeltransformators oder eines Generators, dessen Erregerstrom man variiert. Bei vielen Installationen schaltet man, um die Stromquelle zu entlasten, eine regulierbare Selbstinduktion parallel, die zum grossen Teil die vom Kabel aufgenommene kapazitive Belastung kompensiert. Infolge der Aenderung des Spannungsverhältnisses des Transformators bei Last muss man die an das Kabel angelegte Prüfspannung messen. Man kann zu dieser Messung eine Kugelfunkenstrecke verwenden, die für jede Messung eine neue Eichung erfordert, oder eine der direkten Hochspannungsmessmethoden wie: Kugel-Voltmeter (Hueter oder Sorensen), kapazitiver Spannungsteiler mit Messung des Scheitelwertes und des Effektivwertes der Spannung (Hartmann und Braun), Scheitelspannungsmessung (durch Gleichrichten des Ladestromes eines Luft-Kondensators) (Haefely, verbes-

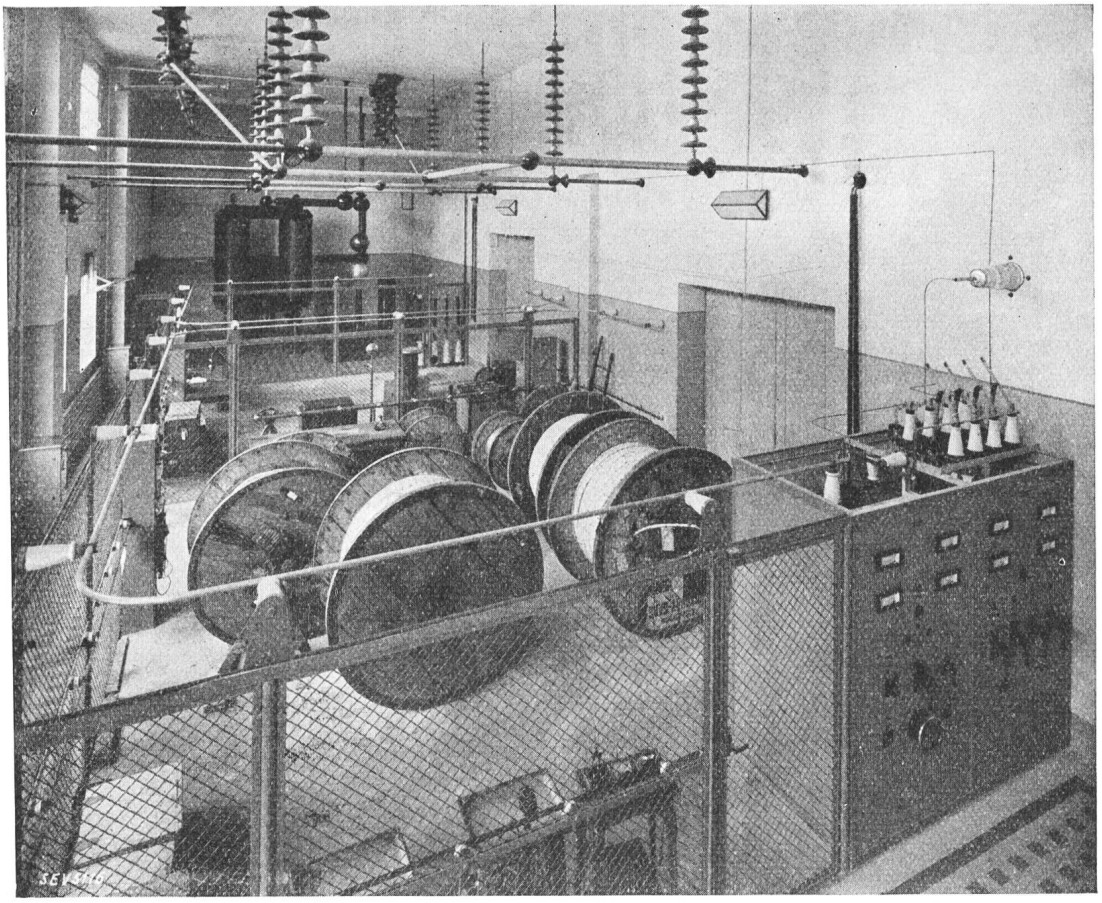

Fig. 5.
Laboratorium vom Podium aus gesehen.

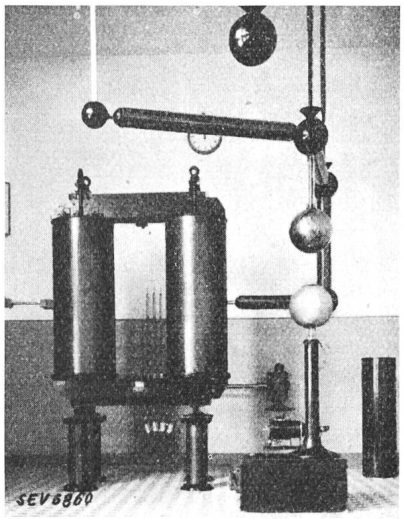

Fig. 6.
Prüftransformator 360 kV, 500 kVA.

[2]) Bull. SEV 1936, Nr. 3, S. 74.

sert durch Cossonay)[3]), Spannungswandler, vor allem für mittlere Spannungen, sowie elektrostatisches Voltmeter. Diese verschiedenen Methoden ergeben praktisch gut verwendbare Resultate.

Bei diesen Versuchen ist der eine Pol des Transformators im allgemeinen geerdet, ebenso auch der Bleimantel des zu prüfenden Kabels. Es ist leicht, zwischen Transformator und Erde ein Ampèremeter einzuschalten, um so den Ladestrom des Kabels messen zu können, eine Kontrolle, die stets empfehlenswert ist.

Ausser dieser eher empirischen Spannungsprobe ist vor allem die *dielektrische Verlustmessung* für die Hoch- und Höchstspannungskabel sehr wichtig. In jedem einer Wechselspannung ausgesetzten Isolator treten Verluste auf. Einerseits durchfliesst ihn ein Leitungsstrom, da der Isolationswiderstand eben nicht unendlich gross ist. Anderseits ist das in einem elektrischen Wechselfeld stehende Dielektrikum der Sitz von Verlusten, ähnlich den Hysteresisverlusten im Eisen, das in einem magnetischen Wechselfeld liegt. So werden jene Verluste etwa als dielektrische Hysteresisverluste bezeichnet. Diese beiden Verlustarten bilden in einem guten Kabel total 1 % der aufgenommenen Scheinleistung. Der Leistungsfaktor des Kabels ist demnach $\cos\varphi = 0{,}01$ voreilend. Im allgemeinen definiert man vorzugsweise als Verlustfaktor den Tangens des Winkels zwischen dem effektiven Ladestrom

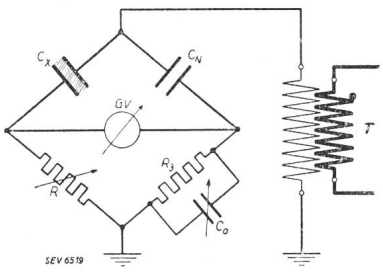

Fig. 7.
Schema der Schering-Brücke.
C_X zu prüfendes Kabel.
C_N Normalkondensator.
R veränderlicher Widerstand.
R_3 fester Widerstand $\frac{1000}{\pi}$
C_a veränderlicher Kondensator.
T Hochspannungstransformator.
GV Vibrationsgalvanometer.

des Kabels und dem senkrecht zur Spannung gerichteten Kapazitätsstrom. Man sieht leicht ein, dass ein gewöhnliches Wattmeter nicht zur richtigen Messung eines solchen Leistungsfaktors führt. Vor einigen Jahren hat man zu diesen Versuchen, direkt oder mit Hilfe einer Kompensationsmethode, Spezialwattmeter verwendet, jedoch hat man diese Einrichtung wieder verlassen, um sich der Messbrücke von Prof. Schering (Fig. 7) zu bedienen. Diese führt zu einer leichten und genauen Messung der Kapazität und des Verlustwinkels an dem unter Hochspannung stehenden Kabel.

Durch Regelung von R und C_a stellt man das Gleichgewicht der Brücke her, was durch das Wechselstrom-Vibrationsgalvanometer kontrolliert wird. Der Normalkondensator C_N ist ein verlustfreier Luftkondensator oder besser noch ein Pressgaskondensator. Bei einem Wert des unveränderlichen Widerstandes R_3 von $\frac{1000}{\pi} = 318{,}5$ Ohm und einer Frequenz der Brückenspannung von 50 Per./s ist der Tangens des Verlustwinkels gleich $^1/_{10}$ der Kapazität des Kondensators C_a in Mikrofarad (μF). Die Kapazität des untersuchten Kondensators C berechnet sich aus der Beziehung:

$$C_x = C_N \frac{R_3}{R}.$$

Bei Prüfungen von Kabeln mit hoher Kapazität wird zur Brücke noch ein Nebenschluss geschaltet, der den grössten Teil des Ladestromes aufnimmt, während nur ein Teil in die Brücke fliesst.

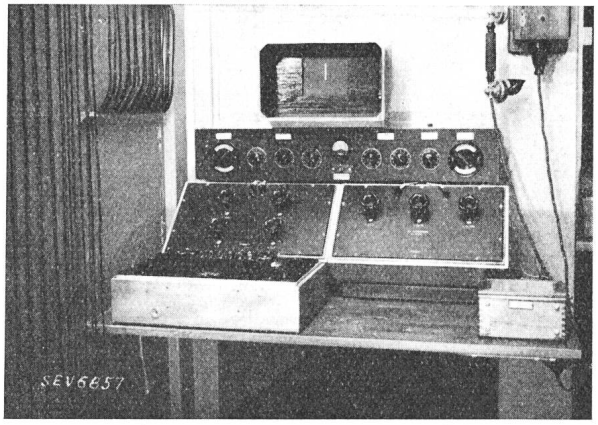

Fig. 8.
Schering-Brücke.

Die Hochspannung wird an die beiden Kondensatoren C_X und C_N gelegt, während der gemeinsame Punkt der Widerstände an Erde liegt; die Spannung an den Widerstandsklemmen beträgt nur 1 bis 2 Volt, so dass die Apparate ohne Gefahr bedient werden können.

Diese Messung ist sehr empfindlich und das beste Mittel, die Güte eines Hochspannungskabels zu prüfen. Bei gut imprägniertem Papier sind die Verluste gering und ändern sich nur wenig bei fortwährender Erhöhung der Prüfspannung (Fig. 9, Kurve 2). Im Gegensatz dazu wachsen, bei einem schlecht imprägnierten Kabel, die Verluste von einer bestimmten Spannung an sehr rasch (Kurve 1).

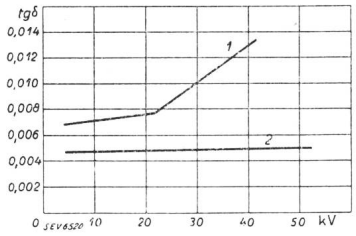

Fig. 9.
Dielektrische Verluste.
1 schlecht imprägniertes Kabel.
2 gut imprägniertes Kabel.

Diese Erscheinung erklärt sich folgendermassen: da das Papier nicht vollkommen imprägniert ist, bleiben darin Hohlräume, ganz kleine Luft- oder Gasblasen, deren Dielektrizitätskonstante den Wert 1 besitzt (die des imprägnierten Papiers ist 3,5). Infolge dieses geringen Wertes ist das elektrische Feld in den Hohlräumen verstärkt. Ist dann die Spannung in den Hohlräumen grösser als diejenige, die sie auszuhalten imstande sind, so bilden sich

[3]) E. Foretay, La mesure de la haute tension par courant capacitif redressé. Conf. Int. Grands Rés., Paris 1937. Bericht Nr. 102 Bull. SEV 1937, Nr. 19, S. 460.

Glimmerscheinungen, die eine Erhöhung der Verluste bewirken. Diese Erscheinung nennt man Ionisation; in einem vollkommen imprägnierten Kabel tritt sie nicht auf. Die obige, dem Werke von Klein, «Kabeltechnik», entnommene Figur bezieht sich auf alte Kabel der Bewag, Berlin [4]).

Es ist von Interesse, die dielektrischen Verluste nicht nur bei der Umgebungstemperatur, sondern auch im warmen Betriebszustand des Kabels zu messen. Ueberdies ist es wichtig zu kontrollieren, ob die Verluste nach der Abkühlung auf ihren Anfangswert zurückkommen, oder ob sie einen hö-

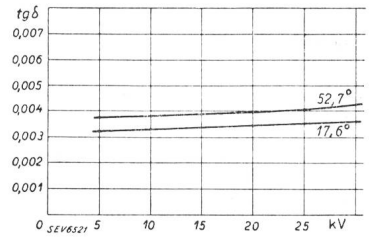

Fig. 10.

Stabilitätsprüfung.

heren Wert annehmen, was ein Zeichen von Ermüdung oder Alterung des Kabels darstellen würde. Diese Erwärmungszyklen können öfters wiederholt werden, um so die Betriebsbedingungen des Kabels zu reproduzieren; sie bilden somit ein wichtiges Kriterium, welches schon zu den Spezialprüfungen der Höchstspannungskabel gehört. Fig. 10 gibt die Verlustkurven in Funktion der Spannung für ein Dreileitersektorkabel von 70 mm² Querschnitt und 16 kV Betriebsspannung wieder. Im kalten Zustand (17,6°) variieren die Verluste nur wenig in Funktion der Spannung. Im warmen Zustand, bei einer Leitertemperatur von 52,7° sind die Verluste etwas grösser, was man durch die Leitfähigkeitserhöhung des Dielektrikums erklären kann. Nach der Abkühlung erhält man eine Verlustkurve, die sich mit der ersten genau deckt, ein Beweis, dass das Kabel im Laufe der Erwärmung und Abkühlung keine Aenderungen erfahren hat.

Man kann auch die Verluste in Funktion der Temperatur aufnehmen.

Schliesslich kann man noch folgende Prüfungen erwähnen, die an kurzen Abschnitten von fertigen Kabeln durchgeführt werden:

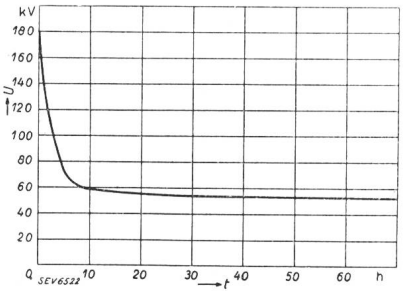

Fig. 11.

Zeitdurchschlagskurve eines 18-kV-Kabels.

Durchschlags-Prüfung, d. h. Bestimmung der Spannung, welche die Isolation durchschlägt und die ein Vielfaches der Betriebsspannung betragen muss.

Zeitdurchschlagskurve (Fig. 11). Ein Kabelstück wird einer Spannung ausgesetzt, deren Wert geringer ist als die erwähnte Durchschlagsspannung, und zwar bis der Durchschlag erfolgt. Die dazu benötigte Zeit wird notiert. Man wiederholt diesen Versuch für mehrere, immer tiefer liegende Spannungen. Die so erhaltenen Punkte ergeben eine Kurve, welche die Durchschlagsspannung in Funktion der Zeit darstellt. Diese Kurve strebt einer zur Zeitaxe parallelen Asymptote zu, deren Ordinate die Spannung ist, welche das Kabel unendlich lange ohne Aenderung aushalten kann und die höher als die normale Prüfspannung sein soll. Die Kurve Fig. 11 bezieht sich auf ein Dreileiterkabel von 70 mm² Querschnitt, Typ Hochstädter, für 18 000 V Betriebsspannung. Die asymptotische Spannung liegt etwas höher als 50 kV.

Ein praktischer Versuch ist die *Biegeprobe*, die darin besteht, ein Kabelstück um einen Dorn zu wickeln, dessen Durchmesser das 12- bis 25fache desjenigen des Kabels beträgt. Nach dem Strecken wird diese Operation mehrmals wiederholt. Das Kabelstück muss alsdann die normale Spannungsprobe aushalten und man bestimmt evtl. noch die Durchschlagsspannung.

Stoss-Prüfung. Bestimmte Kabel sind direkt mit Hochspannungsfreileitungen verbunden und so Ueberspannungen ausgesetzt. Es ist darum interessant, diese Vorgänge im Laboratorium mit Stossgeneratoren zu reproduzieren und sie mit einem Hochspannungskathodenstrahloszillographen zu be-

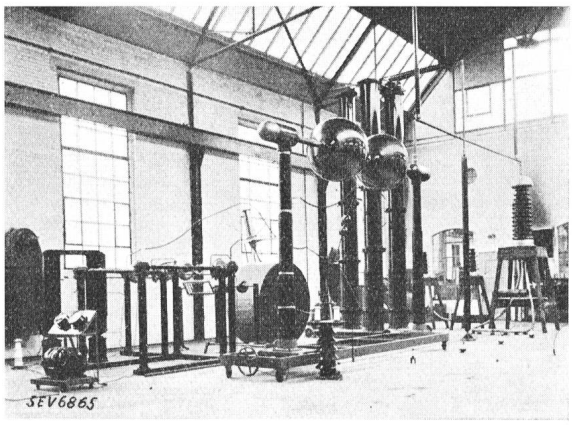

Fig. 12.
Stossgenerator 1200 kV (Kabelwerke Brugg).

obachten. Diese Apparate haben gezeigt, dass die Kabel mit imprägniertem Papier eine hohe Sicherheit gegen Blitzüberspannungen aufweisen, da die Ueberspannung, die sie momentan ertragen können, bis zum 20- und 30fachen Wert der Betriebsspannung beträgt.

Die Kabelzubehörteile wie Endverschlüsse und Verbindungsmuffen müssen ebenfalls sorgfältig geprüft werden. Es handelt sich hier selbstverständlich nur um die Typenprüfung zur Kontrolle, ob die neuen Modelle den Anforderungen entsprechen.

Die Kabelverbindungen zwischen den einzelnen Teilstücken müssen durch geeignete Mittel die Fortleitung des Stromes sicherstellen und werden je nach Spannung entweder durch eine Isolationsmasse isoliert, die in heissem Zustand in eine zwei-

[4]) Klein, Kabeltechnik Fig. 75, S. 91.

teilige, gusseiserne Muffe gegossen wird, oder auch durch imprägniertes Papier, das von Hand aufgewickelt und alsdann mit einer dichten Umhüllung geschützt wird. Die Kabelendverschlüsse bilden ein Abschlussorgan, welches das Ausfliessen der Imprägnierungsmasse aus dem Kabel und das Eindringen von Feuchtigkeit verhindern soll. In diesen Endverschlüssen sind für die Leiter Durchführungsisolatoren aus Porzellan vorgesehen, ähnlich denjenigen bei Transformatoren.

Um Gewissheit über das Verhalten dieser Organe im Betrieb zu erhalten, werden Spannungsproben gemacht. Ebenso sind auch die Messung der dielektrischen Verluste und die Erwärmungsversuche zu empfehlen, wie auch die Bestimmung der Zeitdurchschlagskurve. All diese Prüfungen sind wie bei den Kabeln durchzuführen. Zur Untersuchung eines neuen Typs wird ein Kabelstück mit Verbindungsmuffen und Endverschlüssen montiert und zusammen der Prüfung unterzogen, um die Homogenität des Ganzen zu kontrollieren. Solche Prüfungen erfordern eine ziemlich umfangreiche Apparatur, wie Hochspannungstransformator, Messbrücke zur Bestimmung der dielektrischen Verluste mit Vergleichskondensator und, im allgemeinen, eine Gleichstrommaschine, die isoliert aufgestellt und von einem mit langer isolierter Welle versehenem Motor angetrieben wird. Der so erzeugte Strom fliesst durch die Kabelleiter und erwärmt sie bis zur Betriebstemperatur. Die isolierte Maschine steht unter Prüfspannung, wie auch die Leiter des Prüfkabels. Auf diese Art hat man in Holland eine ganze Reihe von Vergleichsmessungen an verschiedenen Höchstspannungskabeltypen durchgeführt [5]).

Bei einem an die Freileitung angeschlossenen Hochspannungskabel ist vor allem der Kabelendverschluss den von der Freileitung herrührenden Ueberspannungen unterworfen. Es ist darum angezeigt, den Endverschluss einer Stossprüfung zu unterziehen, wie es Herr Schneeberger in seinem Bericht Nr. 211 an der Conférence Internationale des Grands Réseaux vorgeschlagen hat. Ein gut ausgeführter Kabelendverschluss kann ohne Schaden kurzzeitige Ueberspannungen, sowohl bei normaler Frequenz als auch bei Stoss, aushalten, und zwar bis zu einer Spannung, welche den Ueberschlag des Isolators herbeiführt, wodurch eine maximale Sicherheit garantiert ist. Die Betriebs-Ueberspannungen sind stets geringer als dieser Grenzwert.

Eine weitere Kontrolle der Kabel besteht in der *Prüfung der Masse der verschiedenen Bestandteile.* Die SEV-Normalien oder die Pflichtenhefte bestimmen die Isolationsdicke, die Stärke des Bleimantels und der Armierung, was durch geeignete Massnahmen kontrolliert wird. Eine gute Methode besteht darin, dass ein Kabelstück von 1/2 m oder 1 m Länge gewogen und sein effektives Gewicht mit dem berechneten Fabrikationsgewicht verglichen wird. Jedes grössere Abweichen zeigt eine Unstimmigkeit an, welche sich durch Einzelwägen der verschiedenen Bestandteile, wie Kupfer, Blei, Papier usw. herausstellen wird.

Bis dahin wurde nur von Kabeln gesprochen, die mit imprägniertem Papier isoliert sind. Bei gewissen, besonders Niederspannungsanlagen, verwendet man auch sogenannte Gummibleikabel. Die Versuche an Kabeln mit diesem Dielektrikum sind dieselben wie an den Kabeln mit Papierisolation. Dazu kommt jedoch noch eine mechanische Prüfung des Gummis.

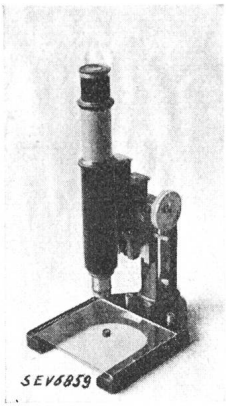

Fig. 13.
Messmikroskop.

Da der Gummi elastisch ist, so bereitet das Messen seiner Dicke Schwierigkeiten, weil die gewöhnlichen Messgeräte, wie Schublehre, Mikrometer usw. einen Druck ausüben und so das Ergebnis fälschen können. Seit mehreren Jahren schon haben wir eine einfache Methode eingeführt, die genaue Resultate ergibt, da der Gummi dabei nicht gepresst wird. Man schneidet auf dem zu messenden Leiter einen kleinen Gummiring aus, den man alsdann unter das Messmikroskop setzt. Das Probemuster wird verschoben und seine Dicke in allen Teilen mit Hilfe des Okular-Mikrometers gemessen, wobei kein Druck ausgeübt und somit auch ein Messfehler vermieden wird.

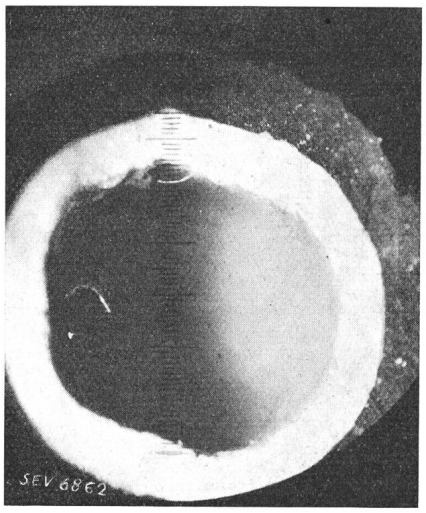

Fig. 14.
Messung der Gummiwandstärke.

d) Prüfung der Kabel nach deren Verlegung.

Nachdem das Kabel mit Erfolg all die erwähnten Prüfungen bestanden hat, kann es versandt und verlegt werden. Nach der Verlegung und Montage von Verbindungsmuffen und Endverschlüssen versichert man sich mit Hilfe von Prüfungen, dass das Kabel ohne Beschädigung verlegt wurde und die Verbindungen und Endverschlüsse in Ordnung sind.

[5]) G. Th. Bakker. Un essai comparatif avec des câbles pour une tension de service de 150 kV. Conf. Int. des Grands Réseaux, Paris 1937. Rapport Nr. 229.

Ein erster Versuch besteht in der *Isolationsmessung mit Gleichstrom.* Man könnte die klassische Methode anwenden, jedoch ist ein Spiegelgalvanometer am Montageplatz nicht sehr praktisch. Wir ziehen einen Isolationsmesser mit Hochspannungsinduktor für z. B. 2500 V vor, der bis zu 10 000 Megohm misst. Die Empfindlichkeit reicht für die Praxis gut aus und der Apparat ist sofort messbereit. Nur ist darauf zu achten, dass die Messleitungen sehr gut isoliert sind.

Die Messung des *Leiterwiderstandes* wird mit dem Drehspul-Ohmmeter, mit der Thomson-Brücke oder mit Volt- und Ampèremeter durchgeführt. Bei langen Leitungen, deren Widerstand ziemlich gross ist, kann man auch die gewöhnliche Wheatstonesche Brücke benützen, vorzugsweise die Schleifdraht-Ausführung. Dabei sind die Kontakte sorgfältig herzustellen; für die Messleitungen sind grosse Querschnitte zu verwenden und ihr Widerstand muss berücksichtigt werden. Bei einem Dreileiterkabel misst man je zwei am entgegengesetzten Kabelende in Serie verbundene Leiter und wiederholt diese Operation bei dreimaliger Vertauschung. Schwierigkeiten bereitet stets die genaue Bestimmung der Kabeltemperatur, so dass man von diesen Widerstandsmessungen keine sehr grosse Genauigkeit verlangen kann; sie bilden nur eine Kontrolle.

Die wichtigste Prüfung ist die *Spannungsprobe.* Man kann diese bei Wechselstrom vornehmen, sofern man über einen Generator und einen Transformator von ausreichender Leistung und Spannung mit passendem Regulierbereich verfügt. Die Mehrzahl der Normen und Pflichtenhefte schreiben eine einstündige Prüfung vor, bei einer Spannung, die das 1,5fache oder nach CEI das 1,73fache der Betriebsspannung beträgt. Jedoch zieht man meistens vor, Gleichstrom für diese Prüfung anzuwenden, was verschiedene Vorteile bietet. Das Kabel bildet einen Kondensator, dessen Kapazität bei einer langen Hochspannungsleitung schon einen bedeutenden Wert annimmt. Die für den Versuch notwendige Scheinleistung kann meistens durch einen transportablen Transformator nicht bewältigt werden. Z. B. benötigt man für die Prüfung einer 1 km langen Leitung von 200 mm² Querschnitt, die aus drei Einleiterkabeln besteht, bei einer Spannung von 45 kV eine Scheinleistung von 445 kVA. Dabei beträgt der Ladestrom 3,3 A/km Kabellänge. Bei Gleichstrom kann man zur Aufladung des Kabels mehrere Minuten verwenden, während bei Wechselstrom die Prüfspannung in $^1/_{100}$ Sekunde erreicht werden muss. Sobald die vorgeschriebene Spannung erreicht ist, hat man dem Kabel nur noch den ganz geringen Ableitungsstrom zu liefern, welcher für den weiter oben erwähnten Fall etwa 1 mA/km betragen dürfte. Die erforderliche Gleichspannung erhält man durch Gleichrichten der Hochspannung eines Transformators. Die leicht transportierbare Apparatur besteht im Prinzip aus einem Hochspannungstransformator, dessen Primärspannung mit Hilfe eines Reguliertransformators oder eines Induktionsreglers regulierbar ist, und einem Gleichrichter, bestehend aus ein, zwei oder vier Glühkathodenventilen mit ihren Heizstromquellen (Transformatoren oder Generatoren, die über eine isolierte Welle von einem Motor angetrieben sind). Das Ganze ist ergänzt durch die nötige Schalt- und Messapparatur. Wir verfügen in Cossonay über drei transportierbare Apparaturen, die für Hochspannungsprüfungen mit Gleichstrom verwendet werden:

1. Eine Apparatur bis zu 5000 V und 100 mA (Fig. 15). Diese ist in unsern Laboratorien gebaut worden und dient zur Prüfung der Niederspannungskabel; sie dient ausserdem noch hauptsächlich zur Speisung der Hochspannungsmessbrücke, die wir weiter unten im Kapitel über die Fehlerortsbestimmung beschreiben werden. *)

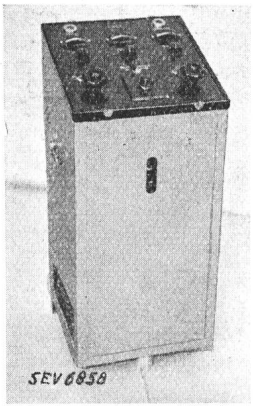

Fig. 15.

Apparatur für Gleichstrom bis 5 kV.

2. Eine Apparatur mit einem Glühkathodenventil. Das Ganze ist in einem Pult enthalten und dient für die Prüfungen bis 30 kV.

3. Eine Apparatur für Prüfungen bis 200 kV (Fig. 17 u. 18), aus folgenden Teilen bestehend: Bedienungspult mit Regeltransformator für alle 5 in der Schweiz üblichen Niederspannungen, sowie den nötigen Bedienungs- und Messeinrichtungen und den Sicherheitsvorrichtungen zur Vermeidung von Ueberlastungen und Bedienungsfehlern. Die genaue Hochspannungsmessung wird mit einer Präzisions-Kugelfunkenstrecke ausgeführt, die gleichzeitig das Kabel nach der Prüfung entlädt. Die Hochspannung wird durch einen 10-kVA-Transformator von 220/100 000 V erzeugt. Die Gleichrichtung des Stromes erfolgt mit Hilfe zweier Glühkathodenven-

Fig. 16.

Apparatur für Gleichstrom bis 30 kV.

*) Vgl. Bull. SEV 1938, Nr. 4, S. 76.

tile mit ihren Heiztransformatoren, wovon der eine unter der vollen Spannung der Apparatur steht. Ein Doppel-Oelkondensator von $2 \times 0{,}04$ μF erlaubt, die Transformatorspannung zu verdoppeln. Zwei Widerstände, aus einem mit destilliertem

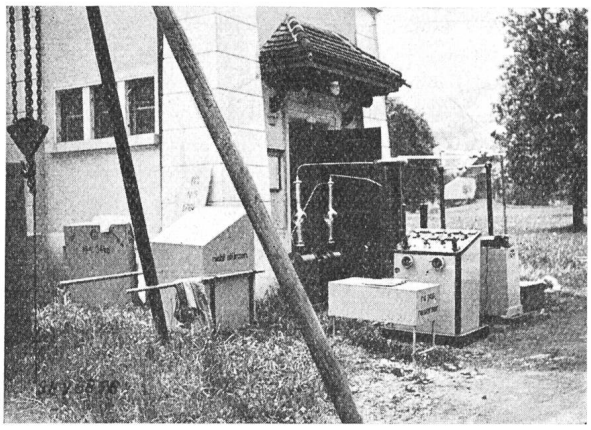

Fig. 17.
Apparatur für Gleichstrom bis 200 kV.

Wasser gefüllten Glasrohr, begrenzen den Strom im Falle eines Kabelfehlers oder beim Ueberschlag an der Kugelfunkenstrecke. Die Einzelteile sind in Transportkisten verpackt. Die Anordnung der verschiedenen Verbindungskabel und Hochspannungsleitungen ist so zweckmässig getroffen, dass man die Apparatur in einer Stunde betriebsfertig zusammenstellen kann. Aus dem Schaltplan, Fig. 19, welcher die wesentlichen Organe darstellt, geht die Wirkungsweise hervor.

Zur Heizung der Glühkathoden kann man auch kleine Generatoren verwenden, die isoliert aufgestellt und über lange isolierende Wellen angetrieben sind, wie in der 400-kV-Apparatur der Kabelwerke Brugg.

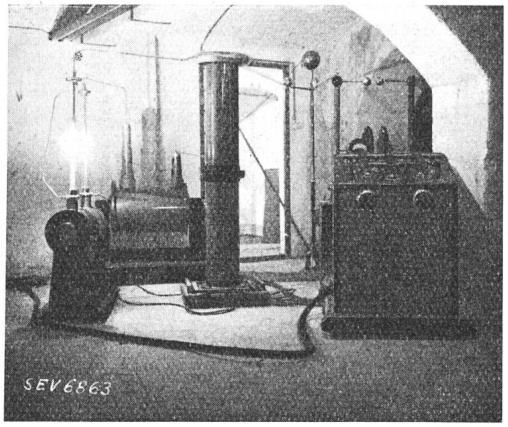

Fig. 18.
Apparatur für Gleichstrom bis 200 kV.

Ein weiteres, sehr interessantes Prinzip besteht auch in der Kaskadenschaltung von mehreren Einheiten, wovon jede aus einem Transformator und einem Gleichrichter zusammengesetzt ist. Jeder Transformator hat eine isolierte Wicklung, welche die folgende Stufe speist. Dies ist die von den Kabelwerken Cortaillod für ihre 450-kV-Apparatur angewandte Methode.

Da die Ermüdung der Isolation bei Gleichspannung geringer ist, wendet man bei der Prüfung

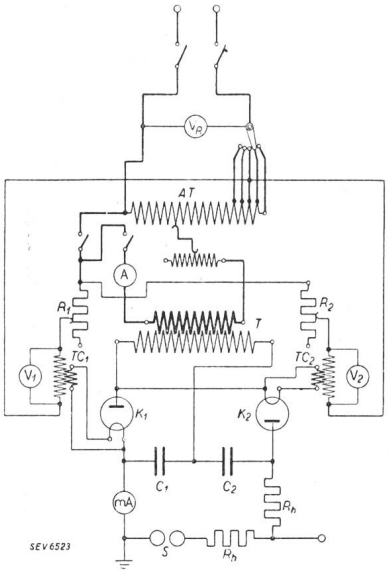

Fig. 19.
Schema der 200-kV-Gleichstromanlage.
V_R Netzvoltmeter.
AT Spartransformator.
A Ampèremeter.
R_1 R_2 Heizwiderstände.
TC_1 TC_2 Heiztransformator.
V_1 V_2 Voltmeter.
T Hochspannungstransformator.
K_1 K_2 Glühkathodenventile.
C_1 C_2 Kondensatoren.
mA Milliampèremeter.
S Kugelfunkenstrecke.
R_h Wasserwiderstände.

mit Gleichstrom eine höhere Spannung an als bei Wechselstrom, und zwar den vierfachen Wert der Betriebsspannung. Wenn die verwendete Apparatur ein genügend empfindliches Milliampèremeter in der Erdleitung enthält, so kann man leicht den geringen Ableitungsstrom des Kabels messen und daraus den Isolationswiderstand bei Hochspannung errechnen. Ausserdem bedingt jede schwache Stelle

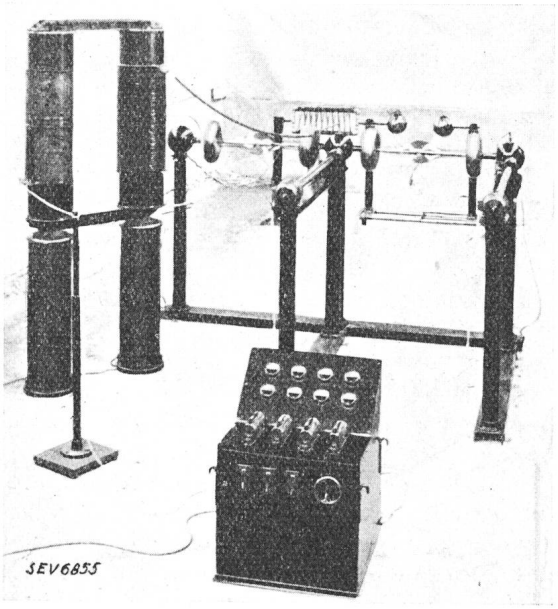

Fig. 20.
Apparatur für Gleichstrom bis 400 kV (Kabelwerke Brugg).

der Anlage eine Unstetigkeit dieses Stromes, was durch plötzliche Zeigerausschläge am Apparat angezeigt wird. Im allgemeinen nimmt der Strom, besonders während der ersten Minuten des Versuches, ständig ab.

Man kann im weiteren auch die *dielektrischen Verluste* nach der Kabelverlegung messen. Wie bei den Versuchen im Werk, verwendet man auch die Schering-Brücke, welche jedoch etwas abgeändert wird, da der Bleimantel eines verlegten Kabels an der Erde liegt. So wird die Brücke zwischen Prüftransformator und Erde geschaltet oder, was noch häufiger geschieht, auf die Hochspannungsseite. In diesem Falle liegt die Brückenecke an Erde, und

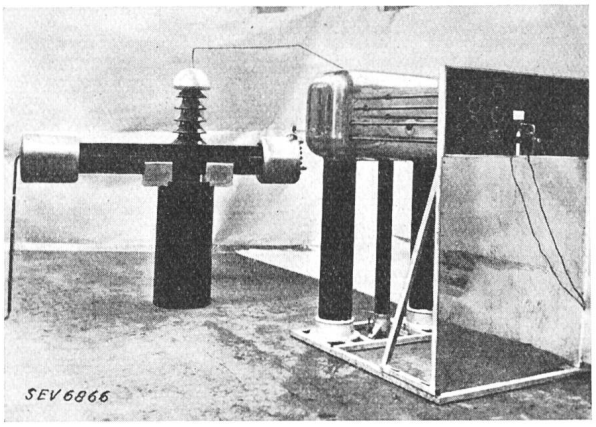

Fig. 21.
Schering-Brücke für Messungen nach der Verlegung eines Kabels.

der den Widerständen gemeinsame Punkt ist mit der Hochspannungsklemme des Transformators verbunden. Das Ganze, Apparate und Vibrationsgalvanometer, steht unter Hochspannung gegenüber der Erde.

Um Messirrtümer, welche durch die Kapazitäten der Apparate gegenüber der Erde und der Umgebung enstehen könnten, zu vermeiden, ist das Ganze in einem Faraday-Käfig untergebracht, in dem sich auch der Versuchs-Ingenieur befindet. Das Ganze ruht auf Isolatoren, welche für die maximale Prüfspannung berechnet sind.

Eine andere, von Herrn Schneeberger [6]) vorgeschlagene Lösung besteht darin, dass man nur die Apparate unter Hochspannung setzt, welche dann über isolierte Wellen gesteuert werden, während der bedienende Ingenieur in Sicherheit ist.

Für die Höchstspannungs-Oelkabel ist noch eine Dichtigkeitsprobe notwendig, wie auch für Rohre, welche Druckkabel enthalten.

Gewisse Unternehmungen lassen ihr Hochspannungskabelnetz periodisch durch Isolationsmessung und Spannungsprobe mit Gleichstrom prüfen. Dies erlaubt, eine Schwächung des Kabels, hervorgerufen, z. B. durch eine Verletzung des Bleimantels durch mechanische oder Korrosions-Einflüsse, schon in ihrem Anfangsstadium zu entdecken. So kann ein Fehler schon frühzeitig ausgebessert und eine Betriebsstörung vermieden werden. Diese Kontrollen sind auch bei Netzen zu empfehlen, deren Betriebsspannung erhöht wird. In Netzen, wo man nicht über die notwendige Apparatur verfügt, können die Kabelfabriken diese Kontrollmessungen vornehmen.

Fehlerortsbestimmung.

Diese zahlreichen und eingehenden Prüfungen, denen die Kabel im Werk und nach der Verlegung unterzogen werden, geben volle Sicherheit, dass das Kabel fehlerfrei ist. Immerhin kann auch ein tadellos hergestelltes Kabel durch äussere mechanische Einflüsse beschädigt werden, z. B. durch Pickelschläge, Boden-Verschiebungen oder durch Korrosion infolge von vagabundierenden Strömen, wodurch der Bleimantel manchmal vollständig durchfressen wird und so die Feuchtigkeit des umgebenden Bodens eindringen lässt. Durch eine ungeschickte Handhabung kann das Kabel bei der Verlegung verdreht oder geknickt werden, wodurch das Papier bricht und ein Isolationsfehler entsteht. Um diese Fehler beseitigen zu können, muss zuerst deren Lage festgelegt werden.

Folgende Fälle sind möglich: Es kann ein Kurzschluss zwischen einem Leiter und dem Bleimantel, zwischen mehreren Leitern, evtl. sogar zwischen allen drei Leitern, unter sich oder mit dem Bleimantel vorhanden sein. Es kann auch ein unvollkommener Kurzschluss vorliegen, z. B. eine schlechte Isolation vorhanden sein, die für die einzelnen Leiter verschiedene Werte aufweist.

Die Leiter können auch unterbrochen sein, was am häufigsten bei Niederspannungsnetzen auftritt. Denn bei einem Kurzschluss ist der Strom bei der Fehlerstelle so gross, dass ein starker Lichtbogen entsteht, der die Leiter auf mehrere Zentimeter verbrennen kann. Dieser Fehler ist manchmal auch mit einem mehr oder weniger vollständigen Isolationsdefekt verbunden.

In diesen beiden Fällen sind die Fehlerortsbestimmungs-Methoden verschieden. Um den heutigen Fortschritt besser zu beleuchten, sei die am Anfang der Kabeltechnik angewandte empirische Methode erwähnt. Bei einem Fehler an einem Kabelstück hat man dasselbe in der Mitte entzweigeschnitten, worauf die schlechte Hälfte nochmals aufgeteilt wurde, was sich so fortsetzte, bis man schliesslich ein Stück von einigen Metern besass, das die Fehlerstelle enthielt und nun durch ein neues Teilstück ersetzt wurde. Das reparierte Kabel glich dann schon beinahe einer Kette von Verbindungsmuffen. Wenn die heutigen Methoden auch keine Genauigkeit von einem Zentimeter ergeben, so führen sie doch bei richtiger Anwendung zu guten Resultaten. Eine häufig vorkommende Schwierigkeit ist die, dass man eine ganz genaue Fehlerortsbestimmung verlangt, während man ja die Kabellänge nur auf einige Meter genau kennt.

Wenn das Kabel einen Isolationsfehler ohne direkten Kurzschluss aufweist, geht man am einfachsten so vor, dass man die Fehlerstelle durch Wechsel- oder Gleichstrom ausbrennt, um auf diese Art einen direkten Kurzschluss zwischen den Leitern oder gegen das Blei zu erzeugen. Eine sehr interessante Methode, die wir gleich kennenlernen werden, beruht auf der Anwendung von hochge-

[6]) E. Schneeberger. L'essai des câbles à très haute tension après la pose. Conf. Internat. des Grands Réseaux, Paris 1935. Bericht Nr. 222, S. 11.

spanntem Gleichstrom unter Benutzung einer Spezial-Messbrücke.

Bei direktem Kurzschluss wird die Lokalisierung durch *Widerstandsmessung* erreicht. Es ist allerdings zu vermeiden, dass der Widerstand der Fehlerstelle mitgemessen wird. Nehmen wir z. B. einen Kurzschluss zwischen Leiter und Bleimantel an, während die übrigen Leiter gesund sind. Man verbindet an einem Kabelende den defekten und einen gesunden Leiter und am andern Ende bringt man die Messapparatur an, um so eine Wheatstonesche Brücke (Fig. 22) zu bilden, deren Teile gebildet werden einerseits durch die beiden Teile des defekten Leiters mit Rückführung über den gesunden, anderseits durch die beiden regulierbaren Widerstände. Bei Gleichgewicht der Brücke hat man die Beziehung:

$$\frac{a}{b} = \frac{X}{2\,L - X} \quad \text{oder} \quad X = \frac{2\,aL}{a+b}$$

Es ist dies die sogenannte Schleifen-Methode. Im Falle eines Fehlers zwischen zwei Leitern geht man auf dieselbe Weise vor, indem die Erde durch den

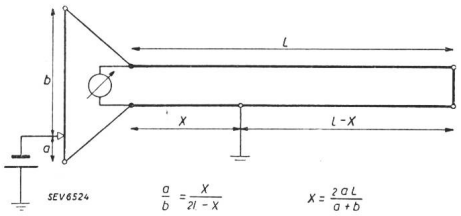

Fig. 22.
Fehlerortsbestimmung nach der Schleifenmethode.

defekten Leiter ersetzt wird. Ist kein Leiter des Kabels gesund, um die Schleife zu bilden, so muss längs der Kabelleitung eine Hilfsleitung gelegt werden, im allgemeinen von dünnerem Querschnitt als die Kabelleiter. In diesem Fall ist man dann genötigt, das Widerstandverhältnis der Hilfs- und Kabelleitung pro Meter in die Rechnung einzuführen.

Wenn ein Leiter unterbrochen ist, benützt man *Kapazitätsmessungen*. Die gesunden Leiter werden bei diesen Messungen mit dem Bleimantel und der Erde verbunden und die Kapazität der beiden Teile des unterbrochenen Leiters, von beiden Kabelenden ausgehend, gemessen. Diese Messung kann mit Gleich- oder Wechselstrom vorgenommen werden. Im ersteren Fall verwendet man eine Batterie und ein sehr empfindliches Spiegel- oder Zeigergalvanometer. Die Ausschläge am Apparat sind den Kapazitäten proportional. Diese Messmethode kann befriedigende Resultate ergeben, sofern die beiden Teilstücke nicht allzu ungleich sind und die Isolation an der Fehlerstelle noch gut ist. Dies ist jedoch nicht der Fall, wenn die Leiterunterbrechung durch einen Kurzschluss hervorgerufen wurde, der das Papier mehr oder weniger vollständig verbrannt hat. Unbequem ist im allgemeinen auch die Verwendung eines sehr empfindlichen Galvanometers, das sorgfältig nivelliert werden muss.

Zur Kapazitätsmessung ziehen wir im allgemeinen die Methode mit tonfrequentem Wechselstrom vor (800 Per./s), die wir in Cossonay eingeführt haben. Man benützt eine Messbrücke, ähnlich denen in der Telephonkabeltechnik verwendeten (Fig. 23). Sie enthält zwei feste Zweige von je 1000 Ohm, einen Widerstand und eine regulierbare Kapazität in Serie und die zu messende Kapazität im vierten Zweig. Als Stromquelle dient ein Summer, der von einer Batterie gespeist wird, und als Stromanzeiger ein gutes Telephon. Diese

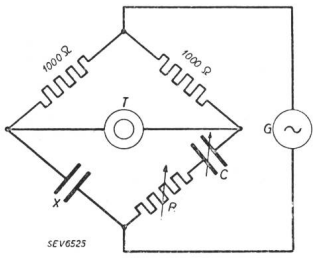

Fig. 23.
Kapazitätsmessbrücke.
X zu messende Kapazität.
R veränderlicher Widerstand.
C veränderlicher Kondensator.
T Telephon.
G Generator.

Methode weist gegenüber der Gleichstrommethode verschiedene wichtige Vorteile auf. Der Vergleichskondensator, dessen Kapazität, bei Gleichgewicht der Brücke, derjenigen des zu messenden Kabelstückes gleich ist, kann mit hoher Präzision geeicht werden (wenigstens 1 ‰ Genauigkeit). Die Genauigkeit der Messung ist von der Länge der einzelnen Kabelabschnitte unabhängig. Im Gegensatz zur Gleichstrommessung können also ganz ungleiche Längen auf den beiden Seiten der Fehlerstelle mit derselben relativen Genauigkeit gemessen werden. Es ist z. B. vorgekommen, dass bei der Lokalisierung eines gebrochenen Drahtes in einem Signalkabel von 500 m Länge mit Gleichstrommessung 30 Meter Distanz zwischen Kabelende und Fehlerstelle gefunden wurden, bei Wechselstrommessung jedoch nur 6 m. Die Fehlerstelle war in Wirklichkeit in 5,9 m Entfernung. Ein weiterer Vorteil der Wechselstrommethode besteht darin, dass der Ableitungsstrom, welcher bei verbrannter Fehlerstelle ziemlich bedeutende Werte annehmen kann, mit der Spannung phasengleich ist, während der Kapazitätsstrom um 90° gegen diese verschoben ist. Diese beiden Vektoren sind also einzeln abgeglichen, die Ableitung durch den regulierbaren Widerstand, und die Kapazität durch den Kondensator.

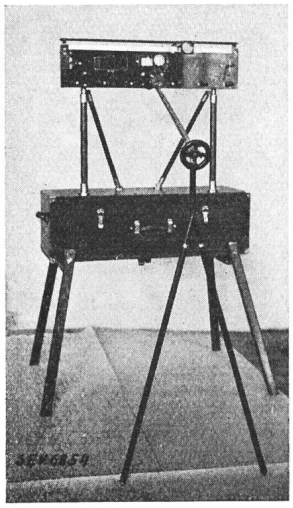

Fig. 24.
Hochspannungs-Messbrücke.

Bei Gleichstrom addieren sich der Ableitungs- und der Ladestrom, so dass man im Falle einer schlechten Isolation eine zu hohe scheinbare Kapazität erhält. Dass man die Benützung eines so empfindlichen Instruments wie es das Galvanometer ist, das sorgfältig montiert werden muss, vermeiden kann, ist ebenfalls ein Vorteil der Wechselstrommethode, die praktischer und schneller ist.

Zur Lokalisierung von Kurzschlüssen hat man noch die Hochspannungsmessbrücken. Der Apparat mit seinem Galvanometer ist isoliert aufgestellt und wird mit einem Isolierstab bedient. Die Ablesung vollzieht sich mit Hilfe eines Fernrohres oder einer Lupe. Der hauptsächlichste Vorteil besteht darin, dass man hochgespannten Gleichstrom verwenden kann, welcher durch den für die Prüfung nach der Kabelverlegung verwendeten Generator erzeugt wird. Bei Höchstspannungskabeln hat nämlich die Fehlerstelle einen so hohen Widerstand, dass selbst eine 100- oder 200-V-Batterie keinen genügend grossen Strom liefert, um eine befriedigende Empfindlichkeit zu erreichen. Bei vereinzelten Fällen, besonders wenn die Fehlerstelle sich in einer mit Kompoundmasse gefüllten Kabelmuffe befindet, ist es sehr schwierig, einen eindeutigen Fehler zu erhalten. Brennt man ihn mit Hilfe

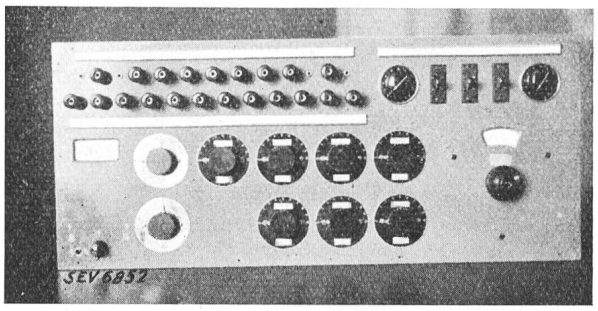

Fig. 25.
Universalapparat zur Lokalisierung von Fehlern.

eines Wechselstromes aus, so fliesst nach Abschalten des Prüftransformators und Anschliessen der Messapparatur die Isolationsmasse um die Fehlerquelle herum und diese verschwindet neuerdings. Bei Verwendung der Hochspannungsbrücke ist es der Meßstrom, der zum Verbrennen der Fehlerstelle dient.

Man kann ferner alle zur Widerstands- und Kapazitätsmessung nötigen Elemente in einer einzigen Apparatur vereinigen, wie in dem Messkasten, den wir in unserem Laboratorium gebaut haben.

Eine für bestimmte Fälle interessante Vorrichtung beruht auf der Bestimmung des veränderlichen magnetischen Feldes, das ein mit Wechselstrom oder mit pulsierendem Gleichstrom durchflossenes Kabel umgibt. Der einfachste Apparat ist ein dreieckiger Rahmen von ca. 1 m Seitenlänge, der aus einer grossen Anzahl von isolierten Drahtwindungen besteht, welche mit einem Telephon verbunden sind. Hält man den Rahmen so, dass eine Seite zum Boden parallel liegt, so hört man im Telephon ein Geräusch, das durch die im Rahmen induzierten Ströme hervorgerufen wird. Auf diese Weise kann man durch einfaches Absuchen der Bodenoberfläche den Verlauf eines Kabels finden. Im Falle eines Erdschlusses hört der Strom jenseits der Fehlerquelle auf und somit auch das Geräusch im Telephon. Die Fehlerquelle ist damit bekannt. Andere, verbesserte Apparate besitzen an Stelle des Rahmens eine Spule mit Eisenkern, die über einen Verstärker mit dem Telephon verbunden ist. In gewissen Fällen, besonders bei Kabeln ohne Eisenarmatur, erhält man zufriedenstellende Resultate.

Die Fehlerortsbestimmung ist ebenso sehr eine Kunst wie eine Wissenschaft, die eine lange Praxis erfordert. Jeder einzelne Fall ist neu und von dem andern verschieden. So kann ich von folgendem Spezialfall berichten: Ein Dreileiterkabel für 6000 V hatte Erdschluss an einem Leiter. Um den Fehler auszubrennen, legte man, langsam ansteigend, an den Leiter die Spannung des 30-kV-Gleichstromgenerators und erhielt dabei zuerst einige Entladungen. Darauf wurde die Spannung auf 24 kV gesteigert und auf dieser Höhe gehalten, ohne dass sich etwas ereignete. Der Isolationsfehler war verschwunden. Einige Stunden später tauchte er wieder auf. Ein neuer Spannungsversuch zeigte die gleichen Resultate wie der erste. Da es sich um Feuchtigkeit handeln musste, welche in das Kabel eintrat und unter der Wirkung der Spannung wieder verschwand, so haben wir versucht, dieses mit einem intensiven Strom zu heizen, gefolgt von Ruhepausen, während denen die Feuchtigkeit von neuem eindringen konnte. Immer noch zeigte sich kein Resultat. Nun setzten wir die Hochspannungsmessbrücke ein und konnten so bei Stromdurchtritt, der nur einen Augenblick dauerte, eine sehr unbestimmte Angabe erhalten. Die Fehlerstelle musste nahe bei einem Kabelende sein. Da sich an dieser Stelle eine Verbindungsmuffe befand, liessen wir diese öffnen und fanden in der Füllmasse einen Luftsack, dessen Seiten feucht waren. Diese Feuchtigkeit, welche den Stromdurchtritt ermöglichte, verdampfte unter dem Einfluss der Spannung, wodurch der Fehler stets wieder verschwand. Nach der Abkühlung kondensierte der Dampf und bewirkte so den Isolationsfehler.

Mit diesen Ausführungen hoffe ich, Ihnen gezeigt zu haben, dass die Kabelmesstechnik eine ebenso komplexe wie vielseitige Wissenschaft darstellt, welche heute einen Entwicklungsgrad erreicht hat, der erlaubt, eine vorzügliche Qualität unserer Industrieerzeugnisse zu garantieren.

Hochfrequenztechnik und Radiowesen — Haute fréquence et radiocommunications

Comité International Spécial des Perturbations Radiophoniques (CISPR).

Sitzung von Brüssel, Dez. 1937.

621.396.82

An der Sitzung der Groupe d'Experts des Comité International Spécial des Perturbations Radiophoniques der Commission Electrotechnique Internationale (CISPR), die vom 15. bis 17. Dezember 1937 in Brüssel stattfand, nahmen Delegierte von Belgien, Deutschland, Frankreich, Grossbritannien, Holland, Italien, Oesterreich, Polen, Schweiz, Tschechoslowakei und Beobachter aus Norwegen, Japan und USA teil. Das Comité Electrotechnique Suisse war durch die Herren Dr. W. Gerber (PTT) und Dr. H. Bühler (SEV) vertreten.