Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 29 (1938)

Heft: 10

Artikel: Hoch- und Höchstspannungskabel

Autor: Borel, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1059377

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

Hoch- und Höchstspannungskabel.

Von *J. Borel*, Cortaillod.

Heute ist die Kabelindustrie in der Lage, mit jedem erstrebten Sicherheitsgrad Kabelleitungen für die höchsten industriell angewandten Spannungen herzustellen. Diese Kabel sind dadurch gekennzeichnet, dass ihre Isolation aus Papier und einem imprägnierenden Stoff besteht, der ganz oder teilweise aus Mineralöl gebildet wird, unter Ausschluss jeder gasförmigen Isoliermittel. In diesen Kabeln spielt jedoch das Gas ebenfalls eine wichtige, wenn auch versteckte Rolle, die aber ausschliesslich mechanischer Natur ist. Im folgenden werden die Massekabel, die Druckkabel und, eingehender, die Oelkabel behandelt.

Dans l'état actuel de son développement, l'industrie des câbles peut réaliser avec toute la sécurité voulue, des canalisations pouvant fonctionner jusqu'aux plus hautes tensions industrielles utilisées aujourd'hui. Ces câbles sont caractérisés par le fait que leur isolant est constitué par du papier et un corps imprégnant formé en tout ou partie par de l'huile minérale à l'exclusion de tout isolant gazeux. Dans ces câbles le gaz joue néanmoins un rôle important bien que discret, mais un rôle exclusivement mécanique. Sont brièvement traités ici les câbles à matière visqueuse, à basse et à haute pression, les câbles à isolant comprimé et, d'une façon plus complète, les câbles à huile.

(Uebersetzung.)

Die Isolation der elektrischen Kabel besteht aus Zellulose in Form von Papier und aus einem Tränkmittel, das ganz oder doch zum grössten Teil aus einem Mineralöl von gewöhnlich sehr hoher Viskosität aufgebaut ist. Das Papier und die Oele, die in der Kabeltechnik als Isolierstoffe Verwendung finden, werden heute in so hervorragender Qualität auf den Markt gebracht, dass der Herstellung von Kabeln für sehr hohe Spannungen im Grunde genommen nichts mehr im Wege stünde, wenn nicht eine bestimmte Eigenschaft des Oeles das Problem sehr verwickelt gestalten würde.

Diese ungünstige Eigenschaft, die in keinem Zusammenhang steht mit den elektrischen Qualitäten des Oeles, betrifft dessen Wärmeausdehnung oder, genauer ausgedrückt, dessen übermässige Wärmeausdehnung im Vergleich mit derjenigen der Zellulose. So erstaunlich es auch erscheinen mag, so kann man heute doch feststellen, dass es in weit geringerem Masse die ungenügenden Qualitäten der Isoliermaterialien oder die in vielen Beziehungen unvollkommenen Herstellungsmethoden waren, die während mehr als einem Vierteljahrhundert die Fabrikation von Hochspannungskabeln verzögert haben, als die anscheinend unbedeutsame Tatsache, dass der kubische Ausdehnungskoeffizient des Oeles ungefähr dreimal grösser ist als derjenige der Zellulose.

Unter dem Einfluss der sowohl während der Fabrikation, als auch im Betrieb unweigerlich auftretenden Temperaturschwankungen bewirkt nämlich der verschiedene Ausdehnungskoeffizient des Oeles und der Zellulose die Bildung von kleinen Hohlräumen im Innern der Kabelisolation der Massekabel, derjenigen Kabelausführung, die während fast einem halben Jahrhundert unbestritten das Feld beherrschte.

Die kleinen Hohlräume, die auch als Vakuolen bezeichnet werden, enthalten verdünnte Gase, die sich unter der Einwirkung des elektrischen Feldes von einer gewissen kritischen Spannung an ionisieren. Dieser Vorgang führt zu elektrischen Entladungen, die allmählich die Zellulose und die Tränkmasse zerstören und schliesslich den Durchschlag der Isolation zur Folge haben. Diese Erkenntnis war es, die die Kabeltechniker veranlasste, bei der Herstellung von Hochspannungskabeln die grösste Vorsicht walten zu lassen. Die Ionisations- und Zerstörungserscheinungen in der Kabelisolation wurden vom Verfasser im Bulletin des SEV 1935, Nr. 16, bereits eingehend beschrieben, worauf hier verwiesen sei.

Eine elektrische Kabelanlage einschliesslich aller Zubehörteile, wie Verbindungsmuffen, Endverschlüsse und eventuellen Behältern bildet einen abgeschlossenen Raum, der unter dem Einfluss eines äusseren, den atmosphärischen nicht übersteigenden Druckes seine Form unverändert beibehält. Dieser abgeschlossene Raum enthält jedoch einen Stoff (Oel oder Tränkmasse), dessen Volumen in hohem Masse mit der Temperatur ändert. Da aber nur die Gase komprimierbar sind, so können die Volumenänderungen dieses Stoffes nur auf Kosten eines Gases vor sich gehen, wobei dessen Volumenänderungen denjenigen der Tränkmasse entsprechen, aber in entgegengesetztem Sinne erfolgen. In jedem Kabelsystem spielt daher notwendigerweise ein Ausgleichsgas eine sehr wichtige Rolle. Da je nach dem System die Wirkungsweise des Gases verschieden ist, lässt sich unter Zugrundelegung dieses Gesichtspunktes eine neuartige Gruppierung der verschiedenen Kabelarten vornehmen. Diese Betrachtungsweise führt zur Einreihung der Kabel in folgende zwei Gruppen.

1. Kabel, bei denen das Ausgleichsgas sich im Innern der Isolation befindet; das Gas steht also im Wirkungsbereiche des elektrischen Feldes.
2. Kabel, bei denen sich das Ausgleichsgas ausserhalb der Isolation befindet und infolgedessen elektrisch nicht beansprucht wird.

Jede dieser Gruppen kann ihrerseits in zwei Untergruppen aufgelöst werden, entsprechend folgender Tabelle:

Gruppierung der Kabelarten nach der Wirkungsweise des Ausgleichsgases.

Tabelle I.

I. Gas innerhalb der Isolation	II. Gas ausserhalb der Isolation
1. Gas unter niederem Druck (gewöhnliches Kabel, Massekabel genannt)	1. Gas abgeschlossen in Ausgleichsbehältern (Oelkabel)
2. Gas unter hohem Druck (neuartiges Massekabel)	2. Gas verteilt über die ganze Länge des Kabels (Druckkabel)

Gestützt auf diese bis heute noch nicht in Betracht gezogene Einteilung seien nun die verschie-

denen ausgeführten oder vorgeschlagenen Kabeltypen für Höchstspannungen näher betrachtet. Dabei soll das Oelkabel, das in der Hochspannungskabeltechnik schon einen Ehrenplatz einnimmt, eingehender gewürdigt werden.

Gruppe I.

Diese Gruppe umfasst diejenigen Kabel, deren Arbeitsweise durch ein in der Isolation eingeschlossenes Gas gekennzeichnet sind.

1. Das Gas steht unter niederem Druck (gewöhnliches Massekabel).

Dieser hinreichend bekannte Kabeltyp, der den grössten Teil der gegenwärtig verlegten Kabel für

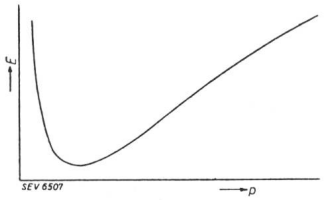

Fig. 1.
Abhängigkeit der dielektrischen Festigkeit E eines Gases in Funktion des Druckes p.

mittlere und hohe Spannungen darstellt, sei nur kurz behandelt. Wie die Erfahrung gelehrt hat, besitzen diese Kabel bis zu maximalen Spannungsgradienten von 4 kV/mm einen hohen Sicherheitsgrad. Dagegen ist es nicht angezeigt, sie für Betriebsspannungen über 70 kV vorzusehen. Bei dieser Kabelart spielen die im Innern der Isolation unweigerlich enthaltenen Vakuolen die Rolle des Gases, das die Volumenänderungen der Tränkmasse zu kompensieren hat. Diese Vakuolen sind es, die als Sitz der elektrischen Entladungserscheinungen den Grenzwert des maximalen Spannungsgradienten für diese Kabel festlegen. Nun unterliegen aber die elektrischen Phänomene, die sich in Gasen abspielen, relativ einfachen Gesetzen. Unter anderem ist bekannt, dass die dielektrische Festigkeit eines Gases stark von dessen Druck abhängt und einem Gesetze folgt, das graphisch durch Fig. 1 dargestellt ist.

2. Das Gas steht unter hohem Druck.

Bei einer gegebenen Elektrodenform und einem gegebenen Elektrodenabstand weist ein jedes Gas bei einem bestimmten, ziemlich niedrigen Druck eine minimale Durchschlagsfestigkeit auf. Wird der Druck erhöht oder erniedrigt, so steigt die Durchschlagsfestigkeit, so dass der Gedanke einleuchtend ist, die Güte eines Kabels durch eine entsprechende Beeinflussung des Druckes der in der Isolation enthaltenen Gase steigern zu wollen. Es ist leider unmöglich, eine hinreichende, auf die Dauer Erfolg versprechende Druckverminderung zu erreichen. Die Gase, die durch das Papier absorbiert worden sind und nach und nach aus diesem wieder frei werden, verunmöglichen eine derartige Massnahme.

Dagegen fällt es, scheinbar wenigstens, wesentlich leichter, eine Druckerhöhung zu erwirken. Man glaubte sogar anfänglich, durch ein solches Vorgehen ohne besondere Schwierigkeiten einer endgültigen Lösung des Problems der Höchstspannungskabel zuzustreben.

Aus noch nicht abgeklärten Gründen wurde man in dieser Erwartung jedoch getäuscht, obschon man gleichzeitig mit der Druckerhöhung auch die Anwendung von Gasen mit hohem Molekulargewicht erwogen hat, die unter gleichen Druckverhältnissen bei wesentlich höheren Spannungen ionisiert werden als Gase von niedrigerem Molekulargewicht (siehe Tabelle II).

Tabelle II.

Gas	Molekulargewicht	Ionisationsgradient kV/mm
Wasserstoff	2	1500
Stickstoff	28	2000
Azetylen	26	2300
Kohlensäure	44	2500
Methyl-Chlorid . . .	50,5	2750
Butan	58	2900
Aether	74	3500
Chloroform	119,5	4500

Nach dem gegenwärtigen Stand der Forschungen scheint es verfrüht, über die Erfolgsaussichten dieses Kabelsystems prophezeien zu wollen, das nach den Ideen seiner Befürworter die Einfachheit des Massekabels mit einer wesentlich höheren Grenzspannung vereinigen würde. Allerdings darf nie vergessen werden, dass die Gaseinschlüsse in der Isolation ihrer geringen Dielektrizitätskonstanten wegen immer der schwache Punkt bleiben werden. In Serieschaltung mit imprägniertem Papier werden diese immer höheren elektrischen Beanspruchungen ausgesetzt sein als das Papier selbst. Dieser Umstand lässt klar die Schwierigkeiten des Problems erkennen.

Die zweite Gruppe umfasst die erfolgreichen Vertreter der Hoch- und Höchstspannungskabel:

Gruppe II.

Kabel, deren Arbeitsweise von der Wirkung eines ausserhalb der Isolation befindlichen Gases abhängt.

2. Gas über die ganze Länge des Kabels verteilt. (Druckkabel.)

Infolge ihrer Aehnlichkeit mit den Massekabeln, sowohl hinsichtlich des Aufbaues, als auch der Herstellungsart, ist es angezeigt, zuerst von den Druckkabeln zu sprechen, obschon ihre Verwirklichung jüngeren Datums ist als diejenige der Oelkabel.

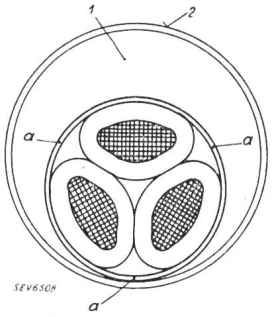

Fig. 2.
Druckkabel. Durch leichte Formänderungen an den mit a bezeichneten Stellen gestattet der Bleimantel die Dilatation und Kontraktion der Tränkmasse unter Verhinderung von Hohlraumbildung.
1 Gas unter Druck, *2* Eisenrohr.

Die Druckkabel sind im Grunde genommen Massekabel, bei denen ein unter Druck stehendes Gas in direkter oder indirekter Weise auf die Iso-

lation einwirkt, die Vakuolenbildung unterdrückt und die Kabelmasse, die infolge Temperaturerhöhungen aus der Isolation ausgetreten ist, zwingt, wieder in diese zurückzufliessen.

Das folgende Beispiel möge beitragen, die Wirkungsweise dieses Kabeltyps besser zu verstehen. Ein gewöhnliches, dreiphasiges Sektorkabel befinde sich in einem Eisenrohr, das ausserdem Gas unter Druck enthält (Fig. 2). Die Isolation dieses Kabels ist gekennzeichnet durch den Verlauf der Kurve, die die dielektrischen Verluste in Funktion der Spannung darstellt (Fig. 3). Wie ersichtlich, ionisieren sich die in der Isolation enthaltenen Vakuolen von einer gewissen Spannung U_1 an. Der

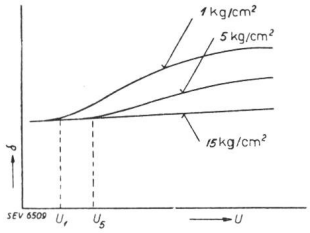

Fig. 3.

Verlauf des Verlustwinkels δ eines Kabels in Funktion der Spannung U und des Druckzustandes der Isolation.

Gasdruck im Rohre werde nun um 5 kg/cm² erhöht. Werden hierauf die Verlustwinkel des Kabels gemessen, so kann festgestellt werden, dass der Eintritt der Ionisation bei höherer Spannung erfolgt. Gleichzeitig kann auch eine Verminderung der Ionisation konstatiert werden.

Nach Erhöhung des Druckes auf 15 kg/cm² ist praktisch keine Ionisation mehr nachweisbar. Es ist nicht schwer, für diese Erscheinung eine Erklärung zu finden. Unter der Wirkung des Druckes deformiert sich der Bleimantel an den mit *a* bezeichneten Stellen (Fig. 2), und auf diese Weise wird der Druck auf die Isolation übertragen. Dadurch verkleinern sich die Vakuolen und verschwinden schliesslich bei genügend hohem Druck, was durch die Resultate der Verlustwinkelmessungen bestätigt wird. Von grosser Bedeutung ist die Tatsache, dass gleichzeitig auch die Grenzspannung eine beträchtliche Erhöhung erfährt, und zwar im Verhältnis von 1 : 2 bei einer Drucksteigerung vom Atmosphärendruck auf 15 kg/cm².

Die Druckkabel können anstandslos unter Zugrundelegung von Spannungsgradienten bis max. 10 kV/mm betrieben werden.

Wenn sich ein Druckkabel erwärmt, so dehnt sich die Tränkmasse aus und dringt durch das Papier oder bewirkt ein Anschwellen der Isolation. Der durch die Ausdehnung auftretende Druck überträgt sich auf den Bleimantel, der infolgedessen ausgeweitet wird. Während der Abkühlung spielen sich die Vorgänge in umgekehrter Richtung ab. Wenn die Erwärmung eine Volumenzunahme der Tränkmasse und Volumenabnahme des Gases zur Folge hat, so bewirkt die Abkühlung eine Verminderung des Tränkmassevolumens und eine entsprechende Vergrösserung des Gasvolumens.

Dieser sinnreiche Kabeltyp ist das Ergebnis langer Forschungsarbeiten, die zum Zwecke hatten, dem gewöhnlichen Massekabel das Feld für höhere Betriebsspannungen zu erschliessen. Durch die Entwicklung des Druckkabels erfuhr die Theorie des Kabeldielektrikums aufschlussreiche Bereicherungen und, was besonders wertvoll ist, praktische Bestätigung durch Messresultate.

Das Druckkabel hat seine Feuerprobe in Hochspannungsnetzen gut bestanden. Verschiedene Anlagen von zusammen ungefähr 50 km Länge wurden in Deutschland, Norwegen, Dänemark und England für Betriebsspannungen von 50 bis 110 kV ausgeführt.

Zur Zeit werden Versuche angestellt, um die Möglichkeit zu prüfen, das Druckgas nicht in eine Eisenrohrleitung, sondern in einen das Kabel umhüllenden, bewehrten Bleimantel einzuschliessen. Diese äussere Kabelhülle würde also einen Bestandteil des Kabels bilden und gleichzeitig mit diesem hergestellt, so dass die Montage einer Rohrleitung dahinfallen würde. Die bezüglichen Entwicklungsarbeiten sind noch nicht so weit fortgeschritten, als dass man heute schon den Betriebsleuten darüber berichten könnte.

Es sei nicht unterlassen, den Erfinder des Druckkabels zu nennen. Es ist M. Höchstädter, dessen Name in der Kabeltechnik wohlbekannt ist.

Beiläufig sei noch erwähnt, dass man auch versucht hat, das Druckgas unmittelbar zwischen Bleimantel und Kabelisolation einzuschliessen. Solche Kabelkonstruktionen haben jedoch bis heute noch keine ganz befriedigenden Resultate ergeben.

1. Das Ausgleichsgas befindet sich in Behältern.

Zu dieser Gruppe gehören die

Oelkabel,

die zufolge ihrer ständig zunehmenden Verbreitung besondere Aufmerksamkeit verdienen.

Allgemeines.

Bei den Oelkabeln ist das Ausgleichsgas nicht über die ganze Kabellänge verteilt, sondern in Behältern eingeschlossen, die an ganz bestimmten Stellen an die Kabelleitung angeschlossen sind. In diese Behälter fliesst das Oel aus dem Kabel, wenn sich dieses erwärmt, und umgekehrt aus dem Behälter in das Kabel zurück, wenn es sich abkühlt. Die Zunahme bzw. Abnahme des Oelvolumens entspricht jederzeit der Abnahme bzw. Zunahme des Gasvolumens.

Damit der Oeldurchfluss in beiden Richtungen ohne Ausbildung von starken Ueber- oder Unterdrucken vonstatten geht, müssen folgende beiden Bedingungen erfüllt sein:

1. Bestehen eines oder mehrerer Längskanäle von hinreichendem Querschnitt im Kabel.
2. Hohe Dünnflüssigkeit des Oeles.

1. Längskanäle. Im Grunde genommen enthalten alle Kabel mit verseilten Leitern Längskanäle von allerdings kleinem Querschnitt. Sie werden von den Hohlräumen zwischen den einzelnen Drähten gebildet, und ihr gesamter Querschnitt beträgt etwa 25 % des scheinbaren Leiterquerschnitts. So weisen z. B. bei einem Leiter von 150 mm² Kupferquerschnitt diese Zwischenräume eine Gesamtfläche von 49 mm² auf. Abgesehen von sehr kurzen Kabel-

längen ist es jedoch nicht möglich, diese Kanäle in Betracht zu ziehen, obschon ihr totaler Querschnitt relativ gross ist. Das den Flüssigkeitsströmungen zugrunde liegende Gesetz von Poiseuille besagt nämlich, dass die Durchflussmenge in einer zylindrischen Leitung proportional der vierten Potenz des Rohrdurchmessers zunimmt, gemäss der Formel:

$$Q = \frac{\pi (p_0 - p_1)}{8 \eta L} R^4$$

wo Q die Durchflussmenge, $p_0 - p_1$ der Druckunterschied zwischen den Kanalenden, L die Länge, R den inneren Halbmesser des Kanals und η den inneren Reibungskoeffizienten der Flüssigkeit bedeutet. Mit Hilfe dieser Formel kann dargelegt werden, dass unter sonst gleichen Verhältnissen ein gewöhnlicher verseilter Leiter von 150 mm² nur etwa den hundertsten Teil der Oelmenge übertragen kann, die ein Leiter desselben Querschnitts und Durchmessers durchfliessen lassen würde, wenn bei diesem alle Zwischenkanälchen zu einem einzigen Kanal im Zentrum vereinigt wären. Aus diesem Grunde besitzen die heute verwendeten Oelkabelleiter einen möglichst grossen zentralen Kanal. Es wäre auch möglich, Oelkanäle zwischen der Isolation und dem Bleimantel vorzusehen, aber aus Gründen sowohl elektrischer, als mechanischer Natur wurde diese Möglichkeit nicht weiter verfolgt. In den verseilten Dreileiterölkabeln wird der Oeldurchfluss auf natürlichste Weise durch die von den Zwickeln zwischen Leitern und Bleimantel gebildeten Kanäle geleitet.

2. *Dünnflüssigkeit des Oeles.* Der Einfluss dieser Eigenschaft auf die Durchflussgeschwindigkeit ist naheliegend. Diese ist nach der Poiseuilleschen Formel umgekehrt proportional dem Koeffizienten der inneren Reibung, d. h. mit andern Worten, proportional dem Grad der Dünnflüssigkeit.

Geschichte und Technik der Oelkabel.

Es dürfte nur wenigen bekannt sein, dass das Oelkabel fast gleichzeitig mit den ersten Massekabeln in Erscheinung getreten und somit schon alten Ursprungs ist. Das erste mit flüssigem Oel imprägnierte Kabel datiert aus dem Jahre 1875 und hat den Engländer David Brooks zum Erfinder. Dieser hatte sich das Problem gestellt, mit Textilumspinnung isolierte Kupferleiter in ein Eisenrohr einzuziehen und dasselbe hierauf mit flüssigem Oel zu füllen. Um die Volumenänderungen des Oeles unschädlich zu machen, hatte er auch schon an die Aufstellung von Ausgleichsbehältern gedacht. Das Oelkabel von 1875, dessen Grundprinzip in manchen Beziehungen demjenigen heutiger Systeme entspricht, ist jedoch in einem wichtigen Punkt von diesen verschieden. Gegenwärtig werden Oelkabel zur Uebertragung höchster Spannungen angewendet, während Brooks sein Kabel für ganz niedrige Spannungen, nämlich zu Telegraphie-Zwecken vorgesehen hat. Diese Tatsache lässt erkennen, dass die Gründe, die den Erfinder zu seinem System geführt haben, in keiner Weise denen entsprechen, die zur Verwirklichung des Oelkabels für die Energieübertragung unter den höchsten Spannungen führten.

Im Jahre 1875 waren die Bleipressen noch im Kindheitsstadium. Es war wohl möglich, kürzere Bleirohre von mehr oder weniger befriedigender Qualität zu pressen; aber man war noch nicht so weit, einen nahtlosen Bleimantel unmittelbar über ein Kabel pressen zu können. Es ist deshalb verständlich, dass man zu Eisenrohren Zuflucht nahm und diese mit Oel füllte, um die darin befindlichen isolierten Leiter vor Feuchtigkeitseinflüssen zu schützen. Diese Kabelart wurde aber in der Folge vom Massekabel verdrängt, dessen Isolation aus imprägniertem Papier besteht und die von einem unmittelbar darüber gepressten Bleimantel umschlossen ist. Als Tränkmasse wird sehr dickflüssiges Oel verwendet, das bei normaler Temperatur kaum fliesst, oder Oel, das durch Beimengung gewisser Stoffe verdickt worden ist.

Erst 40 Jahre später, als Folge zahlreicher, eingehender Forschungsarbeiten auf dem Gebiete der Isolationsstoffe, sollte das flüssige Oel wiederum seinen Einzug in die Kabeltechnik halten.

Im Jahre 1913 beschrieb Watson (England) ein mit Oel getränktes Hochspannungskabel. Auch bei diesem System geschieht die Oeldruckregulierung durch Ausgleichsbehälter. Watson vertrat die Ansicht, dass die Verwendung dünnflüssigen Oeles die Verminderung der dielektrischen Verluste zur Folge haben und die Lebensdauer des Kabels verlängern sollte. Seine Voraussagen wurden, allerdings erst 10 Jahre später, durch Versuchsresultate bestätigt. Zu seiner Zeit war man über die Bedeutung der dielektrischen Verluste noch im unklaren, da nur wenige sich damals an solche Probleme der Messtechnik heranwagten. Trotz der Richtigkeit seiner Annahme war Watson kein Erfolg beschieden.

Nach unserer Ansicht ist sein Misserfolg der folgenden, scheinbar unwichtigen Tatsache zuzuschreiben: Watson hatte vorgesehen, den Oelfluss durch einen zylindrischen, zwischen dem Leiter und der Isolation angeordneten Raum zu leiten. Aus Gründen, die mit den dielektrischen Verlusten in keinem Zusammenhang stehen, ist diese Stelle jedoch die ungeeignetste. Um diese Behauptung zu beweisen, ist es nötig, etwas tiefer in das Wesen des elektrischen Durchschlages von Oelen einzudringen.

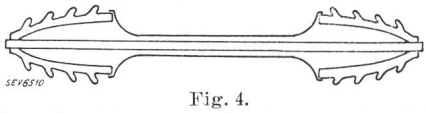

Fig. 4.
Schema einer Vorrichtung zur Bestimmung der dielektrischen Festigkeit des Oeles und des imprägnierten Papiers.

Es seien zu diesem Zweck zwei konzentrische Metallzylinder, von denen der äussere an seinen Enden erweitert und mit Isolatoren ausgerüstet ist, betrachtet. Fig. 4 zeigt die Anordnung. Nun werde unter Beachtung der üblichen Vorsichtsmassregeln sorgfältig entgastes und entwässertes Oel in den

Raum zwischen den Zylindern eingefüllt und hierauf die Durchschlagsspannung des Oeles festgestellt. Um das Beispiel noch anschaulicher zu gestalten, sei angenommen, dass der Halbmesser des inneren Zylinders 10 mm betrage und dass das Verhältnis der beiden Zylinderhalbmesser den Wert von 2,7 aufweise. Unter diesen Umständen ist der maximale Spannungsgradient durch folgende Beziehung gegeben:

$G_{max} = \frac{U}{10}$, wo U die angelegte Spannung bedeutet.

Die dielektrische Festigkeit des Oeles, gemessen zwischen Normalkugeln im Abstande von 1 bis 2 mm, beträgt etwa 20 kV/mm. Wenn dieser Wert in die Gleichung eingesetzt wird, so erhält man die sehr hohe Durchschlagsspannung von 200 kV. Es hat sich aber gezeigt, dass es, im Einklang mit der Erfahrung der auf diesem Gebiete spezialisierten Fachleute, nicht möglich ist, mit diesem Apparat so hohe Durchschlagsspannungen zu erreichen. Diese betragen im Mittel nur etwa ein Drittel des berechneten Wertes und die Einzelwerte streuen innerhalb weiter Grenzen.

Das Oel werde nun durch ölgetränktes Papier ersetzt und der Versuch wiederholt. In dieser Isolation nimmt das Oel ungefähr dasselbe Volumen ein wie die Zellulose. Die Messungen ergeben für dieses Material sehr hohe Durchschlagsspannungen. Die Grössenordnung der Messwerte, die nicht mehr als 10 % voneinander abweichen, beträgt 360 kV. Es sei noch bemerkt, dass diese, einem maximalen Gradienten von 36 kV/mm entsprechende Spannung, dem Durchschlag bei einer Dauerprobe entspricht. Der bei rascher Steigerung der Spannung erfolgende Durchschlag würde noch bedeutend höhere Werte ergeben. Die Kombination Papier-Oel stellt demnach eine äusserst zweckmässige Lösung des Isolationsproblems dar, so dass es sich lohnt, sie etwas eingehender zu untersuchen.

Die imprägnierte Papierisolation kann als aus zwei Baustoffen zusammengesetzt angesehen werden, und zwar einerseits aus dem getränkten Papier, das, obschon aus Zellstoff und Oel bestehend, als ein einziger Stoff betrachtet werden kann, und anderseits aus dem freien Oel, das in der Form von dünnen Häutchen in den Stössen zwischen den einzelnen Papierbändern enthalten ist (Fig. 5).

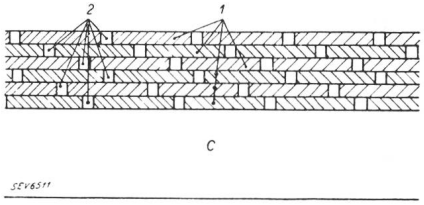

Fig. 5.
Man kann annehmen, dass die Isolation eines Oelkabels aus zwei Baustoffen zusammengesetzt sei, und zwar aus dem imprägnierten Papier (*1*) und dem in den Papierstössen enthaltenen Oel (*2*). *C* Leiter.

Diese beiden Bestandteile werden durch die folgenden Daten in elektrischer Hinsicht gut gekennzeichnet.

	Elektr. Durchschlagsfestigkeit	Dielektrizitätskonstante
Imprägniertes Papier	60 kV/mm	3,6
Oel	20 kV/mm	2,2

Das Oel ist demnach der schwächere Teil der Kabelisolation und es wird überdies infolge seiner kleineren Dielektrizitätskonstante mehr beansprucht als das imprägnierte Papier, mit welchem es in Serie geschaltet ist. Es ist einleuchtend, dass beim Nachgeben eines Bauteiles nach kürzerer oder längerer Zeit die ganze Schicht durchschlagen werden wird. Diese verhält sich wie ein Gebäude, dessen Dach abwechslungsweise von mehr und weniger starken Säulen getragen wird. Das Bauwerk wird einstürzen, falls die Bruchlast der schwächeren Säulen erreicht werden sollte.

Aus dem Vergleich der elektrischen Eigenschaften des imprägnierten Papieres und des Oeles ergeben sich folgende zwei Schlussfolgerungen:

1. Die gemessenen Werte der dielektrischen Durchschlagsfestigkeit des Oeles für dicke Schichten sind in Wirklichkeit bedeutend kleiner als diejenigen, die man durch Extrapolation berechnen kann. Man versuchte diese Erscheinung durch die im Oel enthaltenen Verunreinigungen zu erklären. Gewisse Fremdkörper können, der Richtwirkung des elektrischen Feldes unterliegend, «Brücken» geringeren Widerstandes bilden. Das Vorhandensein dieser Verunreinigungen würde ebenfalls die unregelmässigen Messergebnisse erklären.

2. Die dielektrische Festigkeit des Oeles wird in bedeutendem Masse gesteigert und gleichmässig gestaltet, wenn man es durch Papiereinlagen lamelliert, d. h. wenn man Trennwände errichtet. Je weitergehend die Oelschicht durch Einfügen von Trennwänden unterteilt wird, desto mehr steigt die dielektrische Festigkeit, und in selbem Masse nehmen auch die Durchschlagserscheinungen einen regelmässigeren Verlauf.

Diese kurzen Bemerkungen gestatten, die Ursache zu erkennen, die das Oelkabel nach Watson, trotz seiner interessanten Grundidee, zum Scheitern verurteilte.

Bei diesem Kabel ist der Oelkanal nämlich zwischen dem Leiter und der Isolation in Form eines ringförmigen Raumes gemäss Fig. 6 vorgesehen. Auf diese Weise wird es möglich, dass eine Oel-

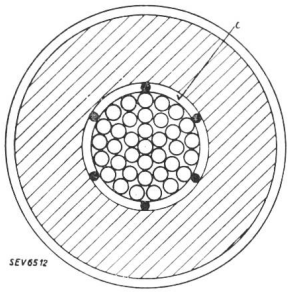

Fig. 6.
Oelkabel nach Watson.
Der Oeldurchfluss wird durch einen ringförmigen Kanal *c* geleitet, der zwischen dem Leiter und der ersten Papierlage vorgesehen ist.

schicht, deren Dicke ein Vielfaches derjenigen der Oeleinschlüsse in den Papierstössen beträgt, in Reihe geschaltet ist mit einem Isolierstoff von höheren Dielektrizitätskonstanten und zudem an einer Stelle, wo die Feldstärke am grössten ist. Das Verhalten einer solchen verfehlten Anordnung ist augenscheinlich: Das Oel wird bei relativ niedriger Spannung durchgeschlagen und der Durchschlag des Kabels lässt nicht lange auf sich warten. Die Erfindung führte denn auch nicht zu Erfolgen.

Da, wie gezeigt wurde, das Oel in der Kabelisolation «lamelliert» sein muss, um hohen Beanspruchungen standzuhalten, so muss der Durchfluss in Kanäle ausserhalb der Isolation verlegt werden. Diese Lösung wurde einige Jahre nach dem kurzen Auftritt des Watsonschen Kabels durch die Firma Pirelli vorgeschlagen und verwirklicht. Der Oel-

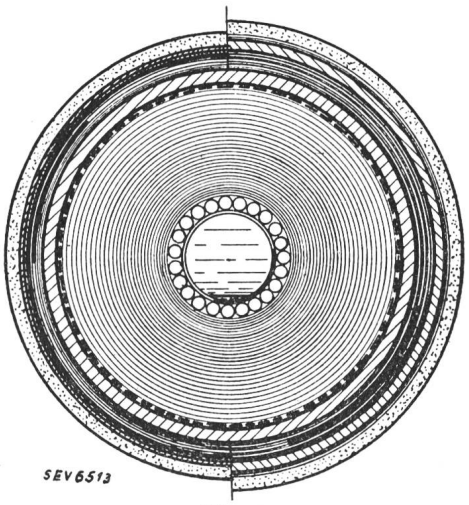

Fig. 7.
Schnitt durch ein Oelkabel nach Pirelli.

kanal ist bei diesen Kabeln in das Zentrum des Leiters verlegt oder, in mehrere Kanäle aufgelöst, in der Wandstärke des Bleimantels angeordnet. Bei verseilten Dreileiterkabeln unter gemeinsamem Bleimantel bilden die Zwickelräume zwischen den isolierten Leitern und der Kabelhülle die Oelkanäle, die ausserhalb des elektrischen Feldes liegen. Unter den verschiedenen Ausführungsvarianten erlangte das Einleiterölkabel mit Hohlleiter aus praktischen Gründen eine Vorrangstellung (Fig. 7).

Wie bekannt sein dürfte, besteht der Hohlleiter nach Pirelli aus einer Spirale aus Metallband oder Metalldraht, über welcher die Kupferdrähte in der üblichen Weise verseilt sind.

Die Oelkabeltechnik wird von dem Problem beherrscht, den durch die Dünnflüssigkeit des Oeles und dessen Wärmeausdehnung auftretenden Schwierigkeiten Herr zu werden. Gemäss dem System Pirelli müssen hierzu folgende Forderungen erfüllt werden:

a) Fabrikation: Tränkung des Kabels nach dem Aufpressen des Bleimantels, Anschluss des Kabels an einen Ausgleichsbehälter umittelbar nach Beendigung des Tränkvorganges.
b) Verlegung und Montage: Notwendigkeit, jeglichen Oelverlust des Kabels durch die Einführung eines gleichgrossen Oelvolumens auszugleichen.
c) Betrieb: Ausgleich der Volumenschwankungen des Oeles. Innehaltung des Oeldruckes auf festgelegten bestimmten Werten.

Um den Rahmen dieser orientierenden Abhandlung nicht zu überschreiten, kann hier nicht auf Einzelheiten eingetreten werden. Es sei lediglich festgestellt, dass in der Praxis diese Forderungen leicht erfüllt werden können.

Die zahlreichen Kabelanlagen, die nach dem System Pirelli ausgeführt wurden (ungefähr 2000 km Kabellänge), die anstandslos bis zu Betriebsspannungen von 220 kV arbeiten, legen hierfür ein beredtes Zeugnis ab. Zahlreiche Abhandlungen und Berichte wurden veröffentlicht, die in eingehender Weise die Technik der Oelkabel behandeln. An dieser Stelle seien lediglich deren hervorstechendste Merkmale zusammengefasst.

Die Tränkung der Kabel nach der Bleimantelumpressung, die für Oelkabel infolge der grossen Dünnflüssigkeit des Oeles unumgänglich ist, muss als ein grosser Vorteil gegenüber der üblichen, vor dem Pressvorgang in besonderen Tränkkesseln vorgenommenen Imprägnierung gewertet werden. Dieser Vorteil ist einerseits bedingt durch das bedeutend kleinere zu evakuierende Gasvolumen und anderseits durch die Möglichkeit, den so wichtigen Tränkvorgang in allen seinen Phasen überwachen zu können.

Die elektrischen Eigenschaften der Oele können unter gewissen Umständen durch das Vorhandensein von aufgelösten Gasen vermindert werden. Aus diesem Grunde muss das Oel nicht nur vor dem Tränkvorgang entgast, sondern es muss auch dafür gesorgt werden, dass im Laufe des Betriebes der Kabelanlage vom Oel keine Gase absorbiert werden können. Die in den Expansionsgefässen befindlichen Oelmengen müssen deshalb in wirksamer Weise den Einflüssen des Ausgleichsgases entzogen werden. Eine sinnreiche Lösung dieses Problems wurde von Pirelli gefunden. In den Ausgleichsbehältern ist das Oel in einer grösseren Zahl deformierbaren, metallenen Zellen aufgespeichert, die in ihrem Aufbau den Metalldosen von Aneroidbarometern ähn-

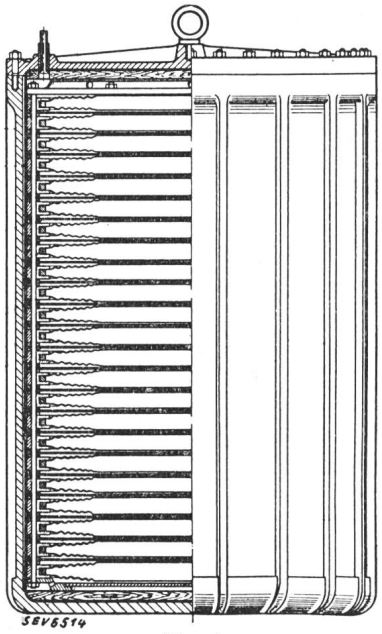

Fig. 8.
Ausgleichsbehälter nach Pirelli.

lich sind (Fig. 8). Diese unter sich durch einen Sammelkanal verbundenen Zellen dehnen sich bei Druckanstieg im Innern aus oder ziehen sich bei einer äusseren Druckeinwirkung zusammen. Diese Bauart gestattet, Behälter herzustellen, die in jeder beliebigen Lage betriebsfähig sind. Die an den Ka-

beltrommeln montierten Behälter, die während der Fabrikation und des Transportes für den Ausgleich des Oeldruckes zu sorgen haben, müssen dieser Anforderung jederzeit genügen.

Ein wichtiger Arbeitsvorgang, der ebenfalls eine interessante Lösung gefunden hat, ist die Verbindung der Leiter zweier Kabellängen. Eine Löt- oder Schweissverbindung erwies sich aus verschiedenen Gründen als unzweckmässig. Besonders die Möglichkeit eines Oelabflusses schien nicht leicht verhindert werden zu können. Es wurde deshalb für die einfachen Verbindungsmuffen ein rasch ausführbares Kaltpressverfahren entwickelt. Unter Anwendung eines sehr hohen, durch eine handbediente, kleine hydraulische Presse erzeugten Drukkes wird eine Kupferhülse über den in seinem Innern gegen Zusammenstauchen verstärkten Hohlleiter aufgepresst. In den Sperrmuffen wird der Kontakt der Leiter durch eine Federvorrichtung gewährleistet. Diese Massnahme gestattet, die Muffe zum grössten Teil schon im Werk fertigzustellen, wodurch die Montagezeit erheblich verkürzt und gleichzeitig die Möglichkeit eines Oelverlustes vermindert wird.

Da das zur Verwendung gelangende Oel zu dünnflüssig ist, um vom Papier zurückgehalten zu werden, übt es auf alle den Abfluss hindernde

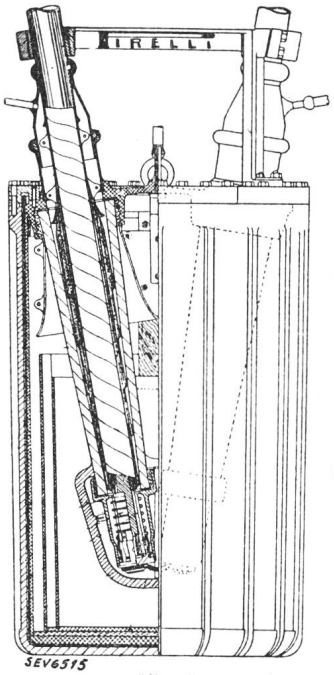

Fig. 9.
Sperrmuffe nach Pirelli.

Schranken einen Druck aus, der, abgesehen vom Gasdruck im Ausgleichbehälter, von den Höhenunterschieden der Leitung und der Dichte des Oeles abhängt. Ein Höhenunterschied von 100 m würde somit einen Druck von 9 kg/cm² verursachen. Da es nicht ratsam wäre, derartig hohe Beanspruchungen zuzulassen, müssen die Druckwerte durch den Einbau von Sperrmuffen in gewissen Grenzen, etwa 3 kg/cm², gehalten werden. Solche Muffen sind im Prinzip aus zwei vorzugsweise horizontal gelagerten und gegeneinander gerichteten Endverschlüssen aufgebaut, in welchen der Oelkanal unterbrochen ist (Fig. 9).

Die Schwere ist nicht die einzige Ursache, die zu hohen Ueberdrucken in Oelkabeln führen kann. Es möge beispielsweise eine mehrere Kilometer lange, horizontal verlaufende Kabelleitung betrachtet werden, die nur an ihren Enden mit Ausgleichsbehältern ausgerüstet sei. Wenn das Kabel ausser Betrieb ist, wird der Oeldruck überall der gleiche sein; er möge z. B. 2 kg/cm² über Atmosphärendruck liegen (Fig. 10). Ein Strom von etwa 0,5

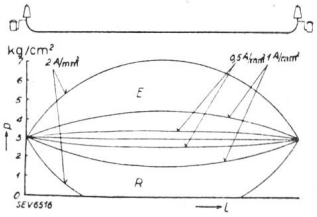

Fig. 10.
Aenderung des Druckes p während der Erwärmung und Abkühlung eines langen Oelkabels, das nur an seinen Enden an Ausgleichsbehälter angeschlossen ist. Verlauf der Druckkurven für verschiedene Belastungen.

A/mm² werde durch das Kabel geleitet. Dieses erwärmt sich und es setzt ein Oelrückfluss in die Ausgleichsbehälter ein. Dadurch entsteht ein Ueberdruck, der in der Mitte der Leitung seinen grössten Wert erreicht. Der Ueberdruck verschwindet mit dem Abklingen des Oelstromes nach den Behältern. Nach einer gewissen Zeit, einer Stunde ungefähr, wird sich ein neuer Gleichgewichtszustand ausgebildet haben, wobei der Enddruck etwas über dem Anfangsdrucke liegt. Wenn der Strom ausgeschaltet wird, spielen sich die Vorgänge in umgekehrter Richtung ab: Das Kabel erkaltet, Oel fliesst aus den Behältern in das Kabel zurück, es besteht ein Unterdruck, der allmählich verschwindet und sich ganz ausgeglichen hat, wenn die Temperatur des Kabels derjenigen der Umgebung wieder entspricht. Falls der Versuch mit immer grösseren Stromstärken wiederholt wird, so ergeben sich schliesslich Ueberdruckwerte, die für die Kabelhülle gefährlich werden, und Unterdruckwerte, die das dielektrische Verhalten des Oeles unheilvoll beeinflussen. Durch die Anordnung einer weiteren Anzahl Ausgleichsgefässe längs der Leitung können diese Gefahren gebannt werden. Diese Massnahme wird aber, und zwar auch im Falle einer idealen, vollständig horizontalen Kabelleitung, nur dann von vollem Nutzen sein, wenn diese durch den Einbau von Sperrmuffen in Teilstrecken unterteilt wird. Jeder Ausgleichsbehälter, dessen Druck nicht notwendigerweise demjenigen der anderen Behälter entsprechen muss, speist einen bestimmten Kabelabschnitt, dessen Länge so gewählt wird, dass die Druckschwankungen innerhalb zulässiger Grenzen bleiben.

Die Technik der im Werk imprägnierten Oelkabel nach System Pirelli bildet ein in allen Teilen wohlerwogenes und ausgefeiltes Verfahren, das seinem Hauptbegründer, Emanueli, zu hoher Ehre gereicht.

Ein anderes Oelkabelsystem wurde in der Schweiz, und zwar in Cortaillod, entwickelt. Den im Jahre 1925 aufgenommenen Laboratoriumsversu-

chen lag folgendes Problem zugrunde: Wäre es, in Anbetracht der dargelegten unzweifelhaften Vorteile, die die Tränkung der Kabel nach der Bleimantelumpressung bietet und welche bisher im Werk bei Temperaturen von 80 bis 100° vorgenommen werden musste, nicht auch möglich, diesen Vorgang bei gewöhnlicher Temperatur auszuführen? Wenn ja, würden nicht gewisse technische Vorteile für die Ausführung des Tränkvorganges nach der Verlegung der Kabel sprechen?

Die Untersuchungen, die für die Lösung dieses Problems ausgeführt wurden, betrafen hauptsächlich folgende Forschungsgebiete:

Absorptionsvermögen der Zellstoffasern für verschiedene Gase in Abhängigkeit des Druckes und der Temperatur.

Einfluss der chemischen Eigenschaften und der dielektrischen Verluste der Oele auf deren Verhalten im elektrischen Feld.

Löslichkeit von Gasen im Oel, in quantitativer Hinsicht und in Funktion der Zeit.

Erhebungen über die mechanischen Eigenschaften der Bleimäntel und die Möglichkeit, dieselben durch Druckbewehrungen zu verstärken.

Es würde zu weit führen, auch nur auszugsweise auf die Resultate dieser Untersuchungen einzugehen. Es seien deshalb einzig die beiden Hauptergebnisse [1]) zusammengefasst:

1. Es ist möglich, bei gewöhnlicher Temperatur im Innern eines ausgetrockneten Kabels ohne Schwierigkeiten ein hinreichendes Vakuum zu erzeugen, um eine einwandfreie Tränkung des Kabels zu gewährleisten. Die auf diese Weise behandelten Kabel sind den im Werk in warmem Zustand imprägnierten ebenbürtig.
2. Das in den Ausgleichsgefässen enthaltene Oel kann durch Zwischenlagerung eines Kolbens den Einflüssen des Druckgases entzogen werden.

Das erste, bedeutungsvollere Ergebnis bildet die Grundlage einer neuen Oelkabeltechnik. Nachdem das Kabel getrocknet und mit dem Bleimantel versehen worden ist, wird es einer strengen Druckprobe mit einem trockenen Gas unterworfen, die erst kurz vor Beginn der Tränkung abgebrochen wird, also erst nach der Verlegung der Kabel und der Montage der Verbindungsmuffen und Endverschlüsse. Eine derartige Dichtigkeitsprüfung muss ohne Zweifel als eine wertvolle Qualitätsprüfung einer Oelkabelanlage gewertet werden, denn wenn es heute keine Schwierigkeiten bietet, über die einwandfreien dielektrischen Eigenschaften der Kabelisolation Aufschluss zu erhalten, so muss doch zugegeben werden, dass die Qualität des Bleimantels nicht zuletzt infolge Zwischenfällen während der Verlegung beeinträchtigt sein kann und nicht die erforderliche Sicherheit bietet.

So paradox es auch klingen mag, sind es weniger die dielektrischen Eigenschaften der Isolation, die den Hersteller von Höchstspannungsölkabeln beim heutigen Stand der Entwicklung am meisten beschäftigen, sondern die mechanischen Eigenschaften der metallischen Kabelhülle und ihr Verhalten nach der Verlegung der Kabel im Erdboden.

[1]) Bull. SEV 1935, Nr. 16, S. 446, und 1936, Nr. 8, S. 211.

Die Evakuierung des Gases und die Tränkung des Kabels nach der Verlegung erfolgt mittels transportfähiger Apparategruppen, bestehend aus dem Antriebsmotor der Vakuumpumpe, der Entgasungsvorrichtung und einer Zahnradpumpe, die zur Förderung des Oeles unter Vakuum aus dem Entgasungsbehälter in das Kabel dient.

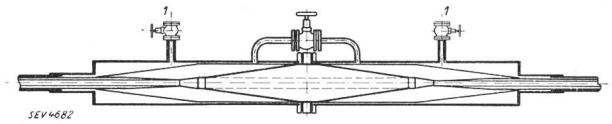

Fig. 11.
Sperrmuffe Bauart Cortaillod gebildet mittels eines Durchführungisolators. *1* Anschlüsse an die Ausgleichsbehälter.

Der Umstand, dass die Zubehörteile an die noch ungetränkten Kabel montiert werden können, hat deren Aufbau günstig beeinflusst und zu einfachen Konstruktionen geführt. In Fig. 11 ist eine Muffe mit gesperrtem Oeldurchfluss (Sperrmuffe) wiedergegeben.

Das zweite Ergebnis führte zum Bau von einfachen und widerstandsfähigen Ausgleichsbehältern, in denen der Kontakt von Oel und Gas mittels eines Kolbens verhindert wird und der den Schwankungen des Oelstandes folgt (siehe Fig. 12). Durch direkte Ablesung oder mittels elektrischer Fernübertragung kann die Kolbenstellung und damit der Oelstand genau ermittelt und überwacht werden.

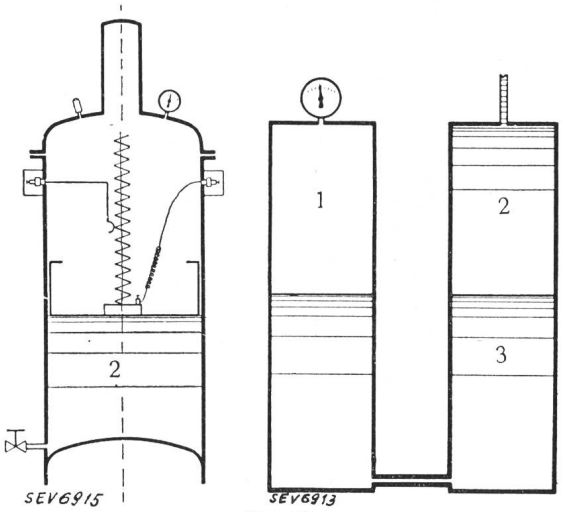

Fig. 12.
Ausgleichsgefäss «Cortaillod» mit festem Kolben und elektrischer Fernmeldevorrichtung des Oelspiegels und Ausgleichsbehälters mit einer als Kolben wirkenden Trennflüssigkeit. 1 Stickstoff, 2 Oel, 3 Flüssigkeitskolben.

Weiter sei erwähnt, dass der von Cortaillod benutzte Hohlleiter aus verseilten Lamellen besteht, die gemäss der in Fig. 13 wiedergegebenen Art ineinandergreifen. Der Aufbau dieses Leiters ist in mehr als einer Hinsicht bemerkenswert; er besitzt hervorragende mechanische Eigenschaften. Seine glatte Oberfläche ist in elektrischer Hinsicht günstiger als diejenige eines aus verseilten Drähten gebildeten Leiters und ausserdem besitzt er für einen gegebenen Aussendurchmesser und Querschnitt einen Oelkanal von grösster lichter Weite, wodurch günstige Verhältnisse für die Oelströmung erreicht werden.

Es stehen gegenwärtig sechs Oelkabelanlagen System «Cortaillod» im Betrieb, wovon fünf in der Schweiz und eine in Holland. In der folgenden Ta-

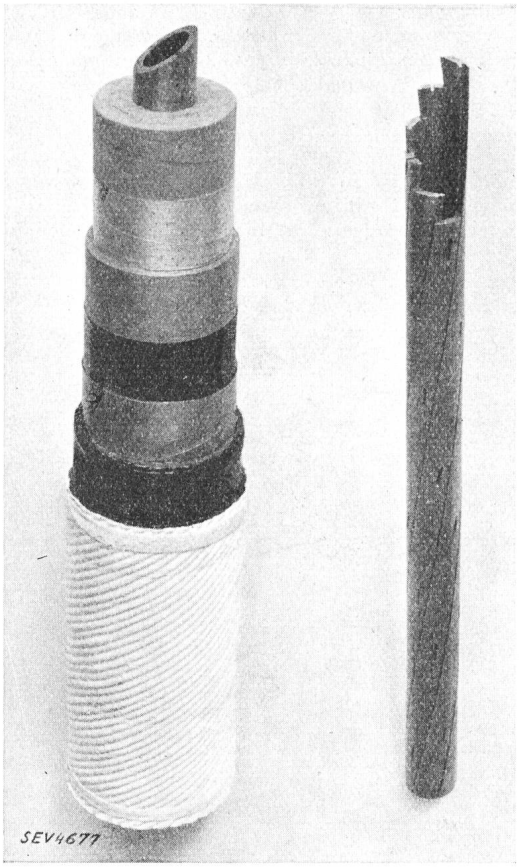

Fig. 13.
Oelkabel «Cortaillod» und dessen Hohlleiter.

belle seien die hauptsächlichsten Daten zusammengefasst:

Tabelle III.

Ort	Spannung kV	Max. Spann.-gradient kV/mm	Jahr der Inbetrieb-setzung
Basel	50	7,55	1932
Hauterive (Freiburg) .	70	9,2	1934
Vernayaz	132	10,3	1934
Bottmingen	150	10,6	1934
Mühleberg	150	10,5	1935
Wettbewerb in Arnheim	150[1])	17,0	1936

[1]) zwischen Leiter und Bleimantel.

Um die Eigenschaften der nach der Verlegung imprägnierten Oelkabel besser zu veranschaulichen, sei eine kurze Darstellung über das Verhalten einer dieser Anlagen im Betrieb gegeben, und abschliessend soll noch kurz über die im Wettbewerb in Arnheim erzielten, interessanten Resultate berichtet werden.

Die beiden Versuchskabel in *Vernayaz* sind als Einführung der Ueberlandleitung Vernayaz-Rupperswil in das Kraftwerk geschaltet. Sie sind imstande, infolge ihrer Kapazität die über die Freileitung eintretenden Ueberspannungen zu dämpfen [2]).

[2]) Siehe Vortrag von Herrn Schneeberger.

Die täglichen Ablesungen des Oelstandes ergaben eine Kurve, die in der graphischen Darstellung Fig. 14 wiedergegeben ist. Die Veränderungen des Oelvolumens entsprechen, wie ersichtlich, den Temperaturschwankungen des Erdbodens. Die Aufzeichnungen lassen deutlich erkennen, dass der Sommer 1936 weniger warm war als sein Vorgänger. Die maximale Volumenänderung beträgt ca. 8,2 Liter. Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass ein unter denselben Verhältnissen verlegtes Massekabel im Winter ein Gesamtvolumen von Vakuolen enthalten würde, das um 8200 cm³ grösser wäre als das im Sommer bestehende Volumen. Diese einfache Ueberlegung kennzeichnet in klarer Weise den Unterschied zwischen Masse- und Oelkabel. Trotz der Belastungsschwankungen, die bedeutend sein können, erreichten die Ueber- und Unterdrücke, die in einer Entfernung von 1,4 km vom Ausgleichsbehälter gemessen wurden, nur unbedeutende Werte, in der Grössenordnung einer Zehntelsatmosphäre. Die gute Durchflussmöglichkeit im Hohlleiter der Cortaillodkabel findet dadurch ihre Bestätigung.

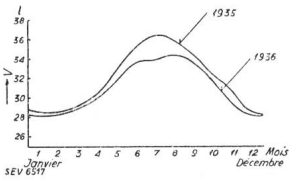

Fig. 14.
Veränderung des Oelvolumens V im Ausgleichsbehälter der 132 kV-Oelkabelanlage in Vernayaz im Laufe der Jahre 1935 und 1936.

Die Kabel haben sich im Betrieb anstandslos bewährt und ihre Rolle als Ueberspannungsschutz den Erwartungen entsprechend erfüllt.

Wettbewerb von Arnheim. Die Prüfanstalt für elektrotechnisches Material in Arnheim (KEMA) führte, um ein geeignetes 150-kV-Kabelsystem zur Verbindung zweier Städte zu wählen, einen beschränkten Wettbewerb durch, zu welchem fünf Firmen eingeladen worden waren. Dieser Wettbewerb wurde in der Folge erweitert und in eine Prüfung umgewandelt, an welcher auch weitere Unternehmen zugelassen wurden, allerdings nur ausser Konkurrenz. An dieser Prüfung nahm Cortaillod mit einem Versuchskabel teil [3]). Die zu erfüllenden Versuchsbedingungen waren, zusammengefasst, folgende: Das mit zwei Endverschlüssen und zwei Verbindungsmuffen ausgerüstete Kabel sollte die Spannung von 150 kV zwischen Leiter und Blei während 200 Erwärmungszyklen aushalten. Jeder Zyklus war von 24stündiger Dauer, wovon 10 Stunden auf die Erwärmung durch einen Strom von 485 A und 14 Stunden auf die Abkühlung entfielen. Die Montage der Versuchsleitung musste so ausgeführt sein, dass nicht nur die dielektrischen Verluste der ganzen Anlage, sondern auch diejenigen der Endverschlüsse und Muffen einzeln ermittelt werden konnten. Das nach der Verlegung imprägnierte Cortaillodkabel hat diese strenge Prüfung mit Erfolg bestanden. Die graphische Darstellung Fig. 15 gibt darüber näheren Aufschluss. Es scheint daraus sogar hervorzugehen, dass durch die Beanspruchung die dielektrischen Verluste sich in leichtem Masse verringert haben. Es darf mit voller Si-

cherheit behauptet werden, dass das Oelkabelsystem Cortaillod die nötigen Eigenschaften besitzt, um die Anforderungen, die der Betrieb von Hoch- und Höchstspannungsnetzen stellt, in jeder Hinsicht zu erfüllen.

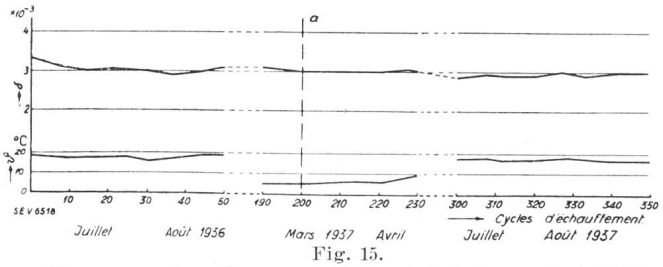

Fig. 15.
Messungen der «Kema» am Versuchskabel von Cortaillod.
a) Ende des offiziellen Versuches nach 200 Erwärmungszyklen.
δ Verlustwinkel. ϑ Temperatur.

Zum Schlusse sei noch der Vollständigkeit halber erwähnt, dass in Amerika ein Oelkabeltyp vorgeschlagen wurde, der in mancher Beziehung dem von Brooks im Jahre 1875 erfundenen Kabel gleicht: Die ohne Bleimantel ausgerüsteten Kabel sollen in eine Eisenrohrleitung eingezogen und hierauf mit dünnflüssigem Oel imprägniert werden.

Expériences effectuées au cours de la conférence.

La conférence de M. J. Borel fut illustrée non seulement par des clichés, mais aussi par des expériences dont voici la description.

L'isolant des câbles est respectivement constitué par 3 ou 2 éléments suivant qu'ils font partie du premier groupe ou du deuxième groupe, à savoir: cellulose, matière imprégnante et gaz d'une part et cellulose et huile ou matière imprégnante d'autre part. Or, étant donné que la valeur électrique d'un isolant composé est déterminée par la valeur du composant le plus faible, c'est la valeur électrique du gaz qui détermine la valeur d'un câble du premier groupe et celle de l'huile ou de la matière imprégnante qui détermine la valeur d'un câble du deuxième groupe.

Les lois qui expriment les propriétés électriques des gaz sont relativement simples. Parmi ces lois celle qui rend compte de la relation entre la rigidité et la pression est très importante pour les câbles du premier groupe. Cette loi est représentée graphiquement par la fig. 1. La rigidité, pour une forme et une distance données des électrodes, diminue lorsque la pression diminue, passe par un minimum puis augmente rapidement.

Dès qu'on dépasse une certaine tension critique, le gaz contenu dans les vacuoles s'ionise. Il en résulte des décharges qui peu à peu carbonisent la matière et la cellulose jusqu'à ce que la disruption s'ensuive. Les phénomènes qui se passent dans les vacuoles peuvent être expérimentalement reproduits en agrandissement. En effet, selon la loi de Paschen, le potentiel explosif d'un espace gazeux dépend du produit $p \cdot l$, de la pression p du gaz par la distance l des électrodes. Ainsi ce qui se passe dans une vacuole, dont l'épaisseur est de 0,12 mm et dont la pression est de 10 mm, est semblable, en principe du moins, aux phénomènes qui se passeront dans un tube à décharge de 120 mm de longueur et dans lequel régnera une pression de 0,01 mm. On peut encore agrandir ces phénomènes, tout en conservant leurs caractères, par le choix d'une tension convenable. C'est ce qui a été réalisé dans le tube à décharge monté sur la tribune. Ce tube a 1 mètre de long, et une tension de 2000 V est appliquée à ses électrodes. L'air qu'il contient est peu à peu évacué à l'aide d'une pompe à vide. Dès que la pression atteint une certaine valeur, l'étincelle apparaît sous forme d'une lueur continue. La pression continuant à baisser, l'aspect de l'étincelle change; des espaces lumineux striés apparaissent (lueur négative, colonne positive), puis la pression baissant encore, l'intensité de ces espaces diminue, puis tout phénomène lumineux cesse. Les mêmes phénomènes se reproduisent en sens inverse lorsqu'on rétablit la pression.

Ce sont donc des phénomènes de décharges électriques analogues à ceux produits dans le tube à décharge qui peu à peu altèrent l'isolant des câbles à matière soumis à une tension provoquant l'ionisation des vacuoles. Ces phénomènes carbonisent papier et matière ainsi que le montrent les figures 16 et 17.

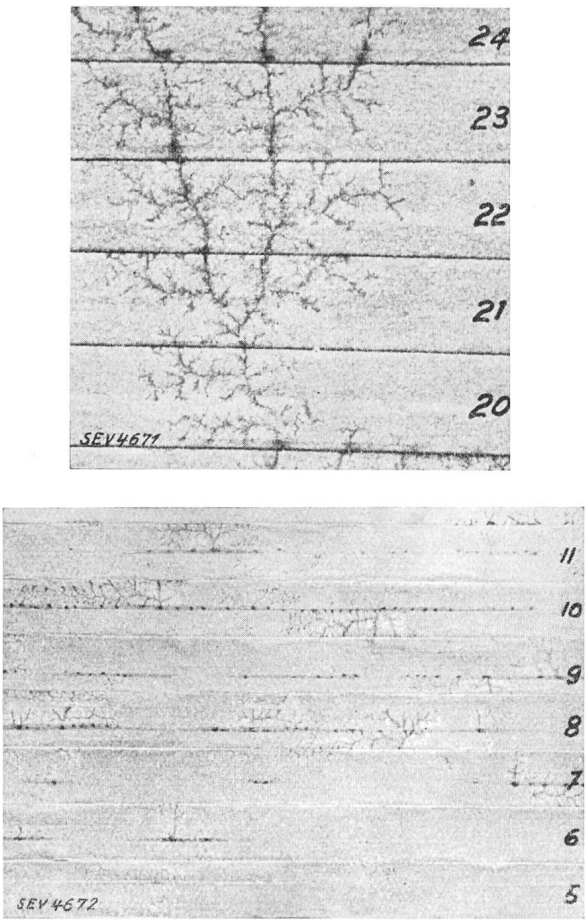

Fig. 16 et 17.
Papiers prélevés sur un câble ayant subi un essai de tension qui a déterminé une forte ionisation des vacuoles. Les décharges ont par places fortement carbonisé l'isolant.

Pour augmenter la valeur de l'isolant d'un câble à matière, il faut augmenter la valeur électrique des vacuoles ce qui peut se faire pratiquement en augmentant la pression des gaz qu'elles renferment.

La valeur des câbles du 2e groupe dépend de celle de l'huile ou de la matière imprégnante. Il faut par conséquent chercher à placer l'huile ou la matière dans les meilleures conditions pour qu'elles possèdent d'une part une rigidité élevée et que d'autre part elles soient stables. Pour montrer quelles conditions de principe il est indiqué de réaliser, au mieux des possibilités, les deux expériences suivantes ont été faites.

La première est représentée schématiquement par la fig. 18. Pour un écartement des sphères de 0,5 mm, le potentiel explosif fut respectivement de 5 kV, 10 kV et 13 kV pour l'huile, l'huile cloisonnée par un papier de 0,11 et l'huile cloisonnée par deux papiers de 0,05 mm. Cette expérience

---

[3]) Daten des Kabels:
Hohlleiter, Querschnitt 185 mm²,
Aussendurchmesser 18,3 mm,
Innendurchmesser 10,0 mm,
Isolationsdicke 14,7 mm.

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

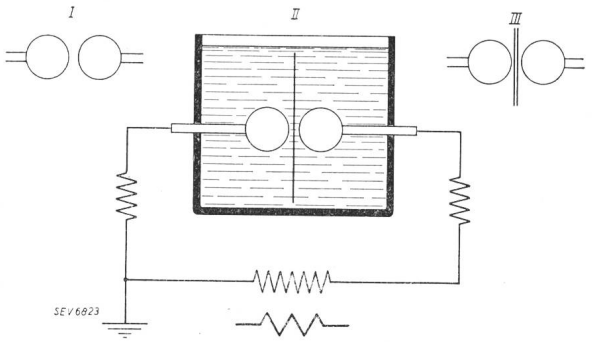

Fig. 18.
Schéma de l'expérience montrant l'influence du cloisonnement sur la rigidité diélectrique de l'huile. Ecartement des sphères 0,5 mm.

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.

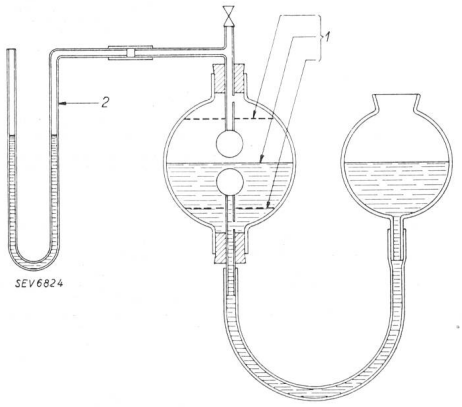

Fig. 19.
Schéma de l'expérience montrant la décomposition en gaz, de l'huile placée dans un champ électrique en série avec un gaz.
1 Niveau de l'huile. *2* Manomètre.

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.

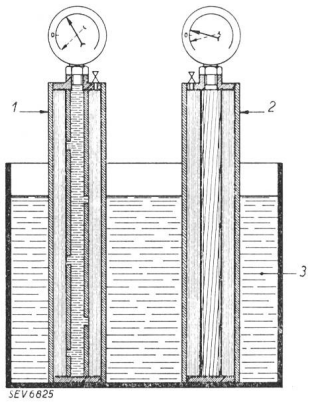

Fig. 20.
Schéma de l'expérience montrant la différence de remplissage entre un câble à huile (*1*) et un câble à matière (*2*).
3 Eau chaude, puis froide.

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-