

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band:	29 (1938)
Heft:	15
Rubrik:	Kabeltechnik : Diskussionsbeiträge

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 17.02.2026

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

SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

REDAKTION:

Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechn. Vereins und des Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke, Zürich 8, Seefeldstr. 301

ADMINISTRATION:

Zürich, Stauffacherquai 36 ♦ Telephon 51.742
Postcheck-Konto VIII 8481

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

XXIX. Jahrgang

Nº 15

Mittwoch, 20. Juli 1938

Kabeltechnik.

Bericht über die Diskussionsversammlung des SEV vom 27. November 1937
in der Tonhalle von Biel.

Diskussionsbeiträge.

(Die drei Hauptreferate wurden in Nr. 10 d. J. veröffentlicht.)

Der **Vorsitzende**, Herr Dr. h. c. *M. Schiesser*, Präsident des SEV, dankt den Herren Schneeberger, Borel und Foretay herzlich für die sehr interessanten Referate, Herrn Dr. Borel besonders auch für die sinnfälligen Experimente. In kompakter Form haben die Herren uns einen vollständigen Ueberblick über die Kabeltechnik gegeben und alles Wesentliche erörtert. Es wurde uns dabei bewusst, wieviel Wissen und Können die heutige Kabeltechnik repräsentiert. Die Ausnutzung der physikalischen Erkenntnisse führte nicht nur zu hervorragenden Hoch- und Höchstspannungskabeln; sie führte u. a. auch zum Bau des Breitbandkabels, eine wahre Perle der modernen Kabeltechnik. Es wurde auch ein Zukunftsproblem gestreift, das Gleichstrom-Höchstspannungskabel, ein alter Traum, der vielleicht in absehbarer Zeit in Erfüllung geht. — Der Vorsitzende eröffnet die Diskussion, etwa geordnet nach «Kabelanlagen», «Betriebserfahrungen», «Messtechnik» und «Wissenschaft»¹⁾.

1. Bau von Kabelanlagen.

Aus welchen Gründen werden bei den EKZ Hochspannungskabel verlegt?

Herr **W. Leimgruber**, Leitungsbauchef der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ): Nach den sehr lehrreichen Ausführungen des Referenten dürfte es interessant sein, kurz zu vernehmen, wie sich der Kabelleitungsbau bei einem Ueberlandwerk, wie es die Elektrizitätswerke des Kantons Zürich sind, entwickelt hat. Das Nachstehende behandelt nur Hochspannungskabel für eine Betriebsspannung von 10 kV.

Bis vor 20 Jahren wurden die Ortstransformatorenstationen im Versorgungsgebiet der EKZ ausnahmslos durch 8-kV-Freileitungen gespiesen. Infolge vermehrter Anwendung der Elektrizität im Haushalt und Gewerbe mussten die Verteilanlagen verstärkt und vor allem mehr Transformatorenstationen aufgestellt werden. Parallel mit dieser Entwicklung ging auch die Bautätigkeit vor sich. Zuerst wurde nur in und direkt um Ortschaften herum, heute aber, im Zeitalter des «Motors», wird auch weiter von den Ortschaften entfernt gebaut. Ein Beispiel: Beide Ufer des Zürichsees sind von Zürich bis weit hinauf fast durchgehend überbaut.

Da nun die Speisung der Transformatorenstationen mittels Freileitungen in solchen Gebieten unmöglich wurde, musste

¹⁾ Mangels Zeit konnten nicht alle Beiträge vorgetragen werden; die nicht gehaltenen sind jedoch im folgenden auch veröffentlicht, als Nachträge gekennzeichnet. Aus dem gleichen Grunde konnte keine allgemeine, freie Diskussion stattfinden.

zur Verkabelung der Leitungen geschritten werden. Dies trifft auch im besondern für grössere Ortschaften zu, wo im Kern derselben Transformatorenstationen erstellt werden müssen.

Folgende Zahlen zeigen diese Entwicklung bei den EKZ: Länge der verlegten Hochspannungs-Kabelleitungen (10 kV) in km:

1917	1927	1937
0,312	8,634	58,083
47,746 Stranglänge		

Durchleitungsrechte. Man sollte glauben, dass die Erwerbung von Durchleitungsrechten für Kabelleitungen leichter vonstatten gehe als für Freileitungen, da von den Grund-eigentümern allgemein zu hören ist, man sollte doch die Leitungen in den Boden verlegen. Die Durchleitungsrechte für Kabel können ungefähr gleich gut erworben werden wie für Freileitungen, solange es sich um Kulturland, Wiesen, Aecker und Baumgärten handelt. Führt aber die Trasse durch Gärten, Vorgärten und Vorplätze, so ist die Durchleitungs-bewilligung sehr viel schwerer als bei Freileitungen zu erhalten. Man muss auch die Bedingung eingehen, dass die Gärten durch den Hausgärtner wieder instand gestellt werden, was oftmals mit grossen Kosten verbunden ist. Auch ist es nicht möglich, die Arbeit des Gärtners immer genau zu präzisieren, so dass oft noch Arbeiten ausgeführt werden, die mit der Kabelleitung nichts zu tun haben.

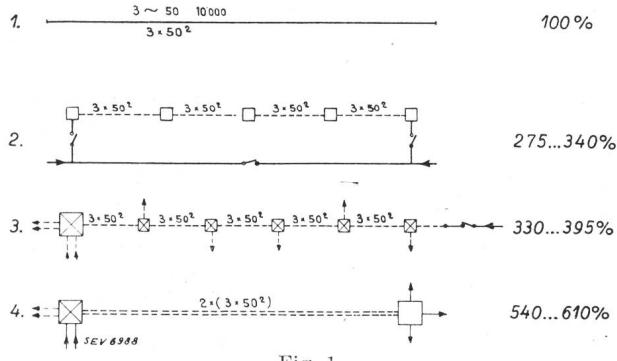
Die Kosten für Kabeldurchleitung betragen in Privat-land pro km rund die Hälfte gegenüber Freileitung; die Entschädigung für Kulturschäden usw. ist jedoch zwei- bis dreimal so hoch.

km Freileitung	km Kabel
Durchleitung	Durchleitung
27×50 = 1400 Fr.	= 500 bis 700 Fr.
Kulturschaden	Kulturschaden
27×11.50 = 310 Fr.	= 600 bis 900 Fr.

Kostenvergleich. Bei dem folgenden Vergleich wurde nicht berücksichtigt, dass das Kabel bei relativ kurzer Uebertragungsstrecke in bezug auf den Spannungsabfall etwas vor-teilhafter ist, dagegen aber nicht so viel Strom und Leistung führen kann wie die Freileitung (Kabel 3×50 mm²: 155 A; Freileitung 3×50 mm²: 200 A, bei 40° C Uebertemperatur, als bis 30 % mehr).

Bei Freileitungen können Fehler sehr rasch aufgefunden und behoben werden, während bei Kabeln schon das Aufsuchen sowie die Reparatur oft viel Zeit erfordern. Es ist daher für betriebsmässige Gleichwertigkeit die Legung eines Reservekabels in Betracht zu ziehen (siehe unter Ziffer 4).

- Die Kosten betragen heute für
- eine Drehstrom-Freileitung, $3 \times 50 \text{ mm}^2$, mit Holzmasten, Regelleitung, für 10 kV Betriebsspannung (Fig. 1.1) 100 %.
 - eine unterirdische Kabelleitung, $3 \times 50 \text{ mm}^2$, mit Kabeldecksteinen aus Beton überdeckt, als Verbindungsleitung zwischen Transformatorenstationen (Fig. 1.2)
 - in Kulturland 275 %,
 - in Strassen, $\frac{1}{2}$ mit Belag, $\frac{1}{2}$ ohne Belag, 340 %.



- eine Kabelleitung als Uebergangsleitung mit etwa alle 2 km aufeinander folgenden Kabelschalt- und Abzweigstationen für 2 ankommende und eine abgehende Kabelleitung (Fig. 1.3)
 - in Kulturland 330 %,
 - in Strassen, $\frac{1}{2}$ mit Belag, $\frac{1}{2}$ ohne Belag, 395 %.
- eine Kabelleitung als Ueberlandleitung wie unter Ziffer 3, jedoch mit Rücksicht auf die Betriebssicherheit mit einem Dreileiter-Reservekabel im gleichen Graben, jedes Kabel unter besondern Decksteinen (Fig. 1.4)
 - in Kulturland 540 %,
 - in Strassen, $\frac{1}{2}$ mit Belag, $\frac{1}{2}$ ohne Belag, 610 %.

Was die *Unterhaltskosten* betrifft, muss für die Freileitung mit ca. 4 % der Erstellungskosten pro Jahr gerechnet werden. Wenn Kabelleitungen sehr gut trassiert worden sind, so dass später keine Verlegungen infolge äusserer Einflüsse nötig werden, und wenn bei der Kabellegung sowie bei der Montage der Verbindungsmuffen und Endverschlüsse recht vorsichtig vorgegangen wird, sind die Unterhaltskosten gleich Null.

Störungen (Fehler) treten, wenn dem Vorhergesagten voll und ganz Rechnung getragen wird, auch selten auf. Kommen sie aber doch vor, so ist deren Behebung mit grössern Kosten und grösserem Zeitaufwand verbunden.

In den Netzen der EKZ waren bis vor einigen Jahren im ganzen 8 Fehler an Freileitungsendverschlüssen und ein Fehler an einem Kabel zu verzeichnen; dieses Kabel wurde durch eine Ramme entzweigeschnitten. Seitdem Freileitungsendverschlüsse mit Schutzauben versehen werden und nachdem man in den letzten Jahren alle Uebergangsendverschlüsse in Blechkabinen montierte, sind bis heute keine Fehler mehr aufgetreten.

Um die Kabelleitungen gegen äussere Gewalt möglichst zu schützen, geben wir dem Staate, den Gemeinden und, wo nötig, auch den Privaten genaue Ausführungspläne ab, woraus die Lage der Kabelleitungen bei Vornahme von Arbeiten in deren Nähe jederzeit festgestellt werden kann.

Das Anwachsen des Erdschlüssestromes infolge Verkabelung.

Herr M. Wettstein, Oberbetriebsleiter der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ): Bei der sukzessiven Verkabelung von Hochspannungsfreileitungssnetzen wird eine Erscheinung sehr oft übersehen, auf die ich aufmerksam machen möchte.

Wie Sie wissen, spielt bei der Erstellung der Schutzmassnahmen für die Verhütung von Unfällen beim Auftreten von Erdschlüssen in Hochspannungssnetzen oder beim Uebertritt von Hochspannung auf Niederspannung die Höhe des Erdschlüssestromes eine ausschlaggebende Rolle. In Freileitungssnetzen, die mit 8...10 kV Spannung betrieben werden, ist

der Erdschlüssestrom in den meisten Fällen noch verhältnismässig niedrig, so dass es im allgemeinen möglich ist, die Schutzerdungen noch mit wirtschaftlich erträglichen Mitteln zu erstellen. Bei sehr ungünstigen Bodenverhältnissen stößt man allerdings trotz der verhältnismässig niedrigen Erdschlüsseströme auch auf Schwierigkeiten.

Wird nun ein Freileitungssnetz sukzessive in Kabel verlegt, so steigt der Erdschlüssestrom mit zunehmender Kabellänge ganz ausserordentlich. In welchem Masse dies der Fall ist, belieben Sie nachstehenden Zahlen zu entnehmen. Für Drehstromnetze von etwa 8 kV Betriebsspannung bedingen

100 km Freileitungen etwa 3 A,
100 km Gürtelkabel etwa 60 A,
100 km Höchstätterkabel etwa 140 A Erdschlüssestrom.

Diese Zahlen zeigen, dass die Verlegung von wenigen km Kabel in einem Freileitungssnetz den Erdschlüssestrom schon derart erhöht, dass die Wirksamkeit der Schutzerdung bereits in Frage gestellt ist.

Ich will noch an Hand eines Beispieles aus dem Betriebe der EKZ zeigen, wie sich die Verhältnisse gestalten können und mit welchen Mitteln die EKZ versuchten, dem Uebelstand zu steuern.

An einem unserer Unterwerke war ursprünglich ein 8-kV-Freileitungssnetz von etwa 125 km Stranglänge und eine Kabelverbindung durch den Zürichsee von 6 km Kabellänge angeschlossen. Dieses Netz wies einen Erdschlüssestrom von etwa 7 A auf. Ein Teil der Freileitung wurde nun sukzessive in Kabel verlegt, so dass das Netz heute aus 76 km Freileitung, 31,5 km Gürtelkabel und 23,3 km Höchstätter-Kabel besteht.

Der Erdschlüssestrom ist nun auf etwa 54 A angestiegen. Er hat also ungefähr einen 8mal grösseren Wert angenommen, obschon noch nicht die Hälfte aller Leitungen verkabelt worden ist.

Für einen derart hohen Erdschlüssestrom reichten die Erdungsanlagen (Schutz- und Nullpunktserdungen) selbstverständlich nicht mehr aus. An eine Verbesserung der Erdungen war der hohen Kosten wegen auch nicht zu denken. Man entschloss sich deshalb, den Erdschlüssestrom mit Hilfe von Löschspulen zu kompensieren. Dabei musste dem Umstand Rechnung getragen werden, dass die Leitungen wahlweise an zwei Sammelschienen angeschlossen und die Schienen elektrisch getrennt betrieben werden können. Dementsprechend sind eine ganze Reihe verschiedener Betriebszustände möglich, die mit ganz verschiedenen hohen Erdschlüsseströmen behaftet sind.

Für die Aufstellung von Löschspulen wurden 2 Varianten näher untersucht, und zwar

- der Anschluss je einer Löschspule an die beiden Sammelschienen;
- die Kompensation der einzelnen Leitungen.

Mit Rücksicht darauf, dass der gesamte Betrieb an die eine oder andere Sammelschiene angeschlossen werden kann, hätte im ersten Fall jede Löschspule für den gesamten Kompensationsstrom gebaut sein müssen. Ferner hätten sie in sehr weiten Grenzen unter Last regulierbar sein müssen, um sie den jeweiligen Betriebszuständen anpassen zu können.

Im zweiten Fall hätten, streng genommen, so viele Spulen als Leitungen vorhanden sind, angeschafft werden müssen.

Da diese zweite Lösung betriebstechnisch die einfachere ist und ausserdem einzelne Leitungen, die in der Hauptsache aus Freileitungen bestehen, noch einen sehr niedrigen Erdschlüssestrom aufweisen und man sich deshalb mit der Kompensation von nur drei Leitungen begnügen konnte, wurde diese Lösung gewählt.

Nach dem Einbau der Spulen zeigte es sich, dass bei einer guten Abstimmung der Löschspulen immer noch ein Reststrom von 10 A auftrat. Diesen Reststrom noch weiter herabzusetzen, ist mit den gegebenen Einrichtungen nicht möglich. Die Schutzerdungen müssen deshalb für diesen Strom dimensioniert werden, was noch gewisse Kosten verursachen wird. Leider ist es mir noch nicht möglich, hierüber eine bestimmte Zahl anzugeben. Dagegen kann ich mitteilen, dass die Kosten der Kompensationsanlage im betreffenden Unterwerk etwa Fr. 16 000.— betragen.

Dieses Beispiel zeigt, dass bei der sukzessiven Verkabelung von Hochspannungsfreileitungssnetzen nicht unerhebliche

Kosten für allfällige Erdschlusskompensationsanlagen und für die Verbesserung der Schutzerdungen in den Netzen entstehen, die bei der Aufstellung von Kostenberechnungen für die Verkabelung von Freileitungsnetzen mitberücksichtigt werden müssen.

Zum Schlusse möchte ich nochmals darauf hinweisen, dass die heute hergestellten zwei Kabelarten, Gürtelkabel und Höchstätterkabel, sich bezüglich der Erdschlussströme ganz verschieden verhalten und man dementsprechend auch mit verschiedenen hohen Kosten für die Kompensierung des Erdschlussstromes rechnen muss. Rechnet man die Kosten der von den EKZ erstellten Kompensationsanlagen entsprechend der erzeugten Kapazitätsströme auf die Einheitslänge der einzelnen Kabeltypen um, so entfallen pro km Kabellänge

auf die Gürtelkabel etwa 185 Fr. und
auf die Höchstätterkabel etwa 435 Fr.

Dazu kommen noch die Kosten für die Verbesserung der Schutzerdungen.

Diese Zahlen zeigen, dass die Vorzüge der Höchstätterkabel durch teurere Schutzeinrichtungen erkauft werden müssen.

Wickelmuffen.

Herr H. Jäcklin, EW Bern: Herr Schneeberger erwähnte in seinem Referat unter andern auch die sogenannten Wickelmuffen mit rekonstruiertem Dielektrikum und wies darauf hin, dass diese neuere Methode für die Erstellung von Kabelverbindungen und Endverschlüssen an Kabeln höherer Betriebsspannung in den letzten Jahren ausschliesslich angewandt wird.

Das Elektrizitätswerk der Stadt Bern verwendet solche Wickelverbindungsmuffen und Endverschlüsse seit bald 10 Jahren in seinen Hoch- und Niederspannungsverteilnetzen in ausgedehntem Masse und es dürften deshalb einige kurze Mitteilungen über die Erstellung derartiger Verbindungen und die damit gemachten Erfahrungen in technischer und wirtschaftlicher Beziehung um so mehr von allgemeinem Interesse sein, als unseres Wissens deren Verwendung besonders in unserem Lande verhältnismässig gering geblieben ist.

Veranlassung zum Einbau von Wickelmuffen gaben die im Jahre 1928 in Angriff genommenen Arbeiten zur Erhöhung der Spannung im Hochspannungsverteilnetz und zur Einführung der Normalspannung in den Niederspannungsverteilnetzen. Die Erhöhung der Hochspannung von 3 auf 6 kV im Hochspannungsverteilnetz und der Uebergang auf Normalspannung führte in vielen Fällen zu umfangreichen Umbauarbeiten in den Transformatoren- und Verteilstationen. Die den neuen Verhältnissen anzupassenden Dispositionen hatten zur Folge, dass die an kommenden und abgehenden Kabel für den Anschluss an die neuen Schalt- und Verteilstellen oft zu kurz waren und verlängert werden mussten. Zu Beginn der Umbauarbeiten wurde dieses Ansetzen von Verlängerungsstücken unter Benützung der handelsüblichen Gussarmaturen bewerkstelligt. Ueberall dort, wo solche Verlängerungen an einer grösseren Zahl von Kabelleitungen nötig waren, machte sich dann aber bald die Anhäufung der zahlreichen Verbindungsmuffen auf verhältnismässig kleinem Raum wegen des grossen Platzbedarfes der Gussarmaturen unangenehm geltend. Es fehlte an Platz, diese in den Stationen selbst unterzubringen und man war mehrfach gezwungen, sie ausserhalb der Anlagen anzutragen, was aus verschiedenen Gründen als unerwünscht bezeichnet werden musste. Auch der Umbau einer grossen Zahl von Niederspannungsverteilkästen von 3 auf 4 Leiter unter Verwendung gusseiserner Endverschlussarmaturen bot Schwierigkeiten, weil der zur Verfügung stehende Platz bei voller Besetzung eine befriedigende Lösung verunmöglichte.

Gezwungenermassen mussten wir uns deshalb mit dem Studium von Lösungen zur Beseitigung der geschilderten Schwierigkeiten befassen, und es kam uns zugute, dass eben in jenem Zeitpunkt in der Fachliteratur die ersten Hinweise auf die Verwendung von Wickelmuffen in Mittel- und Niederspannungsnetzen erschienen. Wir entschlossen uns nach Fühlungnahme mit einem Kabelwerk zur Durchführung von Versuchen in grösserem Umfange, wobei diese Versuche vorerst auf die in der Ausführung etwas einfacheren Verbindungsmuffen beschränkt wurden. Nach den in jeder Beziehung befriedigend ausgefallenen Ergebnissen ging man spä-

ter auch zum Einbau von gewickelten Endverschlüssen in Hoch- und Niederspannungskabeln über, und heute werden Wickelmuffen nicht nur bei Neuverlegungen sozusagen ausschliesslich angewendet, sondern wir benützen auch jede sich bietende Gelegenheit, um die alten massegefüllten Gussmuffen durch Wickelmuffen zu ersetzen.

Es fällt auf, dass, wie bereits angedeutet, die Wickelmuffen, trotz der unbestreitbaren Vorteile, welche diese im Vergleich zu den massegefüllten Muffen aufweisen, noch verhältnismässig wenig angewendet werden. Es ist dies offensichtlich darauf zurückzuführen, dass in bezug auf deren Betriebssicherheit noch Bedenken bestehen und dass man vielfach der Auffassung ist, solche Wickelmuffen könnten nur von speziell ausgebildetem Personal der Kabelfabriken in einwandfreier Weise erstellt werden. Beide Bedenken müssen nach den bei unserem Werk in einer nun bald 10jährigen Periode gesammelten Erfahrungen als unbegründet bezeichnet werden. Im Verteilnetz des städtischen Elektrizitätswerkes sind gegenwärtig bereits über 3000 Wickelmuffen in Betrieb, wovon etwas über 1000 auf das Hochspannungsnetz und der Rest auf die Niederspannungsnetze entfällt. Es ist für uns erfreulich, feststellen zu können, dass bis heute an keiner einzigen Muffe, weder im Hochspannungsnetz, noch in den Niederspannungsnetzen, irgendein Defekt aufgetreten ist. Demgegenüber zeigt unsere Statistik über Kabelschäden, dass die Muffenfehler einen nicht unbedeutenden Anteil an der Zahl der Gesamtschäden ausmachen. Wenn wir beispielsweise die letzten 10 Jahre, d. h. also diejenige Periode, in welche bereits eine grosse Zahl von massegefüllten Muffen durch die neuere Wickelmuffe ersetzt worden sind, ins Auge fassen, so ergibt sich, dass genau 30 % von den in dieser Periode aufgetretenen Kabelschäden auf Defekte in den Verbindungs- und Endmuffen zurückgeführt werden müssen. Wenn auch auf Grund einer bloss 10jährigen Erfahrungsperiode für die Zuverlässigkeit und Dauerhaftigkeit der Wickelmuffen noch kein abschliessendes Urteil abgegeben werden darf, so deutet bis jetzt doch alles darauf hin, dass sie bezüglich Betriebssicherheit den massegefüllten Muffen gegenüber zum mindesten als gleichwertig beurteilt werden dürfen.

Wie verhält es sich nun mit der Schwierigkeit der Erstellung der Wickelmuffen? In dieser Beziehung darf gesagt werden, dass die Erstellung von Wickelmuffen an die Geschicklichkeit und Zuverlässigkeit des Personals keine grösseren Anforderungen stellt, als dies bei den massegefüllten Muffen der Fall ist. Voraussetzung ist allerdings eine gründliche Instruktion des Personals durch mit solchen Arbeiten vertraute Fachleute. Die vorliegenden guten Resultate mit Wickelmuffen lassen im übrigen vermuten, dass fehlerhafte Ausführungen, wie solche bei massegefüllten Muffen als Folge von Unachtsamkeiten, z. B. unsorgfältiges Ausgiessen, Verwendung überhitzter Ausgussmasse usw. vorkommen können, bei Wickelmuffen weniger zu befürchten sind. An Hand einiger Bilder soll nun im folgenden die Erstellung von Wickelmuffen kurz besprochen werden.

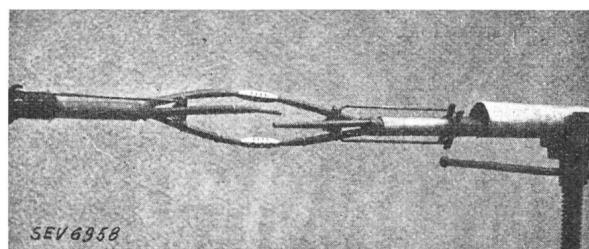


Fig. 1.
Verbindung der Leiter eines 6-kV-Kabels $3 \times 80 \text{ mm}^2$.

Fig. 1 zeigt die Verbindung eines 6-kV-Kabels von $3 \times 80 \text{ mm}^2$ Querschnitt für die Umlaufung der einzelnen Leiter vorbereitet. Genau wie dies beim Einbau einer massegefüllten Verbindung praktiziert werden muss, sind auch in diesem Fall die Bleimäntel auf die erforderlichen Längen zu entfernen und die einzelnen Leiter nach Beseitigung der Gürtelisolation auseinanderzuspreizen. Die Verbindung der Leiter kann wie bei den massegefüllten Muffen durch Schraubhülsen, Löthülsen oder durch Schweißung bewerkstelligt werden.

den. Wir verwenden durchwegs Schraubhülsen, welche zur Erzielung eines bessern Kontaktes verlötet werden. Zur Erleichterung der Wickelarbeit empfiehlt es sich, für eine möglichst weitgehende Distanzierung der einzelnen Leiter zu sorgen. Wir haben zu diesem Zwecke die einfache, im Bilde deutlich sichtbare Vorrichtung konstruiert. Ein Fibertück mit einer der Aderzahl des zu spleissenden Kabels entsprechenden Anzahl Ausschnitte wird an beiden Kabelenden zwischen die einzelnen Leiter gepresst und durch zwei

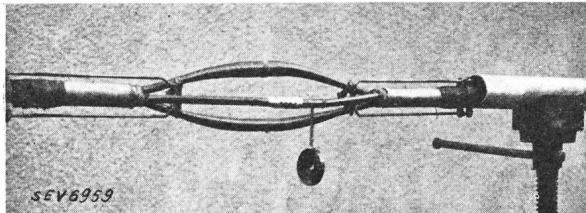


Fig. 2.
Aufwickeln der Aderisolation.

bis auf den Bleimantel zurückreichende, dort durch eine Brücke befestigte Bolzen gegen Herausfallen gesichert. Zu erwähnen ist noch, dass selbstverständlich vor dem Einbau der Verbindungsklemmen das den äussern Abschluss bildende Bleirohr über eines der Kabelenden zu schieben ist.

An dem so vorbereiteten Kabel kann nun die zur Erzielung der elektrischen Isolationsfestigkeit erforderliche Aderisolation aufgewickelt werden, welche die vorher entfernte Gürtelisolation zu ersetzen hat (Fig. 2). Dazu benutzt man in Rollen für diesen Zweck speziell vorbereitetes Oelpapier,

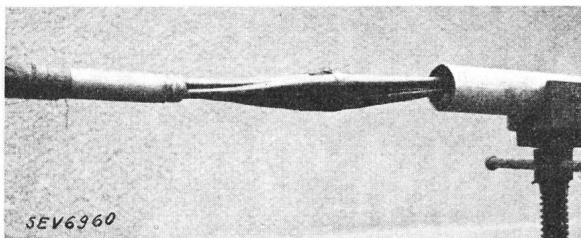


Fig. 3.
Aufbringen der Bandage.

welches die gleichen Eigenschaften aufweisen soll wie das Papier, das bei der Kabelfabrikation zur Verwendung gelangt. Wichtig ist für dieses Papier absolute Trockenheit. Zur Verhinderung von Feuchtigkeitsaufnahme bei längerer Aufbewahrung wird das Papier am besten in Büchsen bezogen, die mit einem dickflüssigen Öl gefüllt sind.

Nach Bewicklung aller Leiter werden diese wieder zusammengepresst und mit einer ebenfalls aus Wickelpapier bestehenden leichten Bandage versehen (Fig. 3). Die Ver-

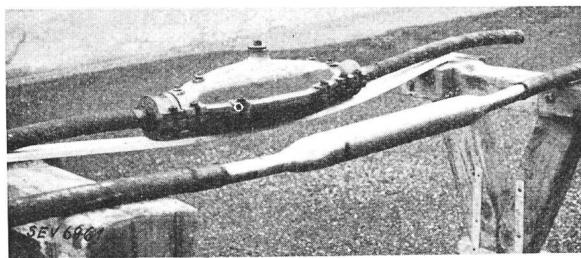


Fig. 4.
Fertige Muffe, oben: Gussmuffe, unten: Wickelmuffe.

bindung ist nun für das Ueberschieben des Muffenrohres bereit. Dieses Bleirohr, von ca. 3 mm Wandstärke, welches die Bleimantel der beiden Kabelenden um einige cm zu überdecken hat, wird an seinen beiden Enden mit Hilfe eines speziellen Werkzeuges im Durchmesser derart verjüngt, dass

es auf dem Kabelbleimantel festsitzt. Hierauf erfolgt die Verlöting der Muffenenden mit sogenanntem Schmierzinn und schliesslich noch das Ausfüllen der verbliebenen Hohlräume mittels einer elastisch bleibenden Vergussmasse. Zum bequemen Einbringen dieser Vergussmasse wird das Muffen-

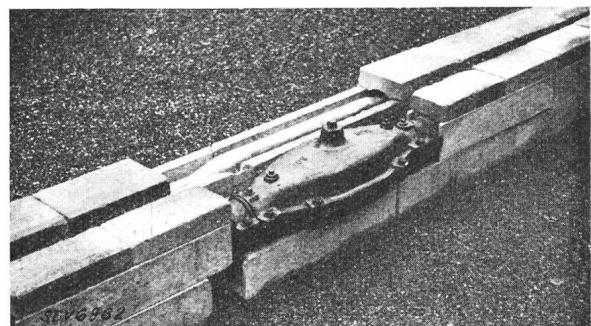


Fig. 5.
Einbau einer Wickelmuffe (oben) und einer Gussmuffe (unten).

rohr an zwei Stellen mit dem Kabelmesser aufgeschlitzt, und zwar so, dass diese schlitzartigen Öffnungen nach dem Ausgießen auf einfache Weise wieder verstemmt und verlöten werden können. Damit ist die Muffe zur Inbetriebnahme fertig; sofern es als nötig erachtet wird, ist einzig noch die äussere Bewehrung entsprechend der Armierung des Kabels in Form von Jute, Stahlband oder Eisendraht anzubringen. Fig. 4 zeigt die fertige Muffe ohne Bewehrung in Gegenüberstellung zu einer massegefüllten Muffe mit einem Kabel von ebenfalls $3 \times 80 \text{ mm}^2$ Querschnitt. Das Gewicht der Wickelmuffe beträgt 24 kg, dasjenige der Gussmuffe 57 kg.

Einleitend wurde erwähnt, dass die grossen Abmessungen der massegefüllten Verbindungsmuffen besonders bei Anhäufungen als nachteilig empfunden werden. Fig. 5 soll den einfachen, zweckmässigen Einbau einer Wickelmuffe im Zuge einer Leitung veranschaulichen, wenn, wie es bei uns üblich ist, zum Schutz gegen mechanische Beschädigungen der Kabel Zementkanäle verwendet werden. Die Schutzkanäle gelangen je nach Bedarf einzeln oder, wie das Beispiel zeigt, in Paketen von 4 oder mehr Kanälen zur Verlegung. Sie sind so konstruiert, dass bei Verlegung mehrerer Lagen die obere Lagen gleichzeitig die Abdeckung für die unterliegenden Kanäle bilden. Die Wickelmuffe findet im Kanal selbst Platz und wird durch die normale Kanalabdeckung in genau gleicher Weise wie das Kabel selbst geschützt. Die Gussmuffe dagegen unterbricht den Schutzkanal, und es müssen, wenn man diese selbst noch schützen will, besondere Vorkehrungen getroffen werden. Liegt die Gussmuffe in der obersten Kanallage, ist dies noch verhältnismässig einfach; komplizierter wird jedoch die Sache, wenn eine Gussmuffe in einer unteren Kanallage einzubauen ist.

In ganz ähnlicher Weise wie die Verbindungsmuffen lassen sich auch die Endverschlüsse ohne Verwendung massegefüllter Armaturen herstellen. Immerhin darf hier, verglichen mit der Verbindungsmuffe, eine zusätzliche Schwierigkeit, nämlich das einwandfreie Abdichten der einzelnen Adern von Mehr-

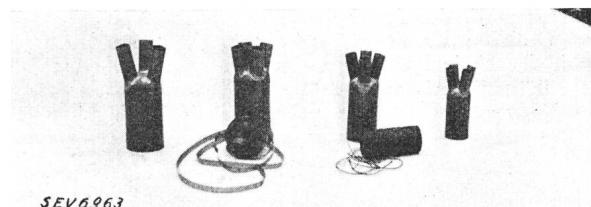


Fig. 6.
Dichtungskappen für Endverschlüsse.

leiterkabeln, nicht übersehen werden. Diese Abdichtung, die bekanntlich ja auch bei Gussmuffen oft Schwierigkeiten bereitet, muss derart beschaffen sein, dass das die Kabel gefährdende Ausfliessen der Tränkmasse, was besonders bei hohen Temperaturen oder bei grossen Höhendifferenzen zwis-

schen Anfang und Ende einer Leitung zu befürchten ist, vermieden wird. Wir verwenden zur Abdichtung von Mehrleiterkabeln die in Fig. 6 für verschiedene Kabelquerschnitte dargestellten, aus Blei bestehenden Dichtungskappen der Firma Siemens-Schuckert. Das Kabelende wird in gleicher Weise vorbereitet wie bei den alten Gussendverschlüssen mit dem Unterschiede, dass vor dem Ueberstülpen der Dichtungs-

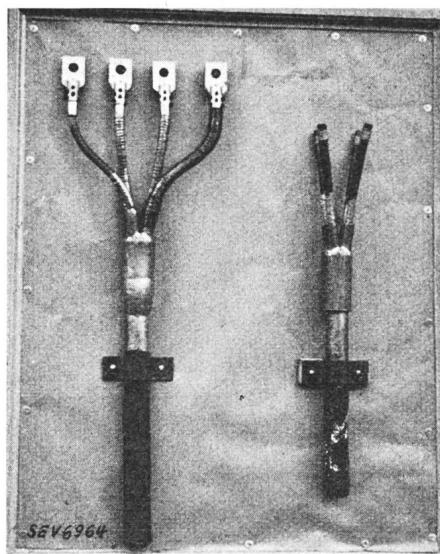


Fig. 7.
Gewickelte Endverschlüsse.

kappe die vorher entfernte Gürtelisolation ersetzt werden muss. Bei Hochspannungskabeln wird wie bei den Verbindungsmuffen Oelpapier verwendet; bei Niederspannungsendverschlüssen genügt ein spezielles, möglichst elastisches Oeltuch. Die in Fig. 7, rechts, deutlich sichtbare Dichtungskappe wird, genau wie bei der Verbindungsmuffe das Bleirohr, am untern Ende so verjüngt, dass sie fest auf dem Kabelbleimantel sitzt, und alsdann verlötet. Für die Ausfüllung der zwischen Kabelisolation und Dichtungskappe verbleibenden geringen Hohlräume wird mit Vorteil das bei der Kabelfabrikation verwendete Oel benutzt. Die fingerförmigen Bleistut-

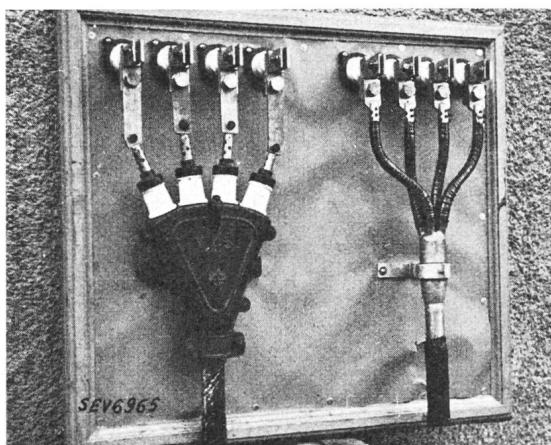


Fig. 8.
Vergleich eines Guss-Endverschlusses (links) und eines gewickelten Endverschlusses (rechts).

zen werden ebenfalls gegen die Leiter verjüngt und gemeinsam mit den Leitern mit Oeltuch umwickelt. Die letzte Oeltuchlage erhält zur Erhöhung der mechanischen Festigkeit mit Vorteil noch eine Schnurbandage. In Fig. 8 ist ein fertiger Wickelendverschluss einem entsprechenden vierleitigen Endverschluss mit Gussarmatur gegenübergestellt.

Die Erstellungskosten stellten sich unmittelbar nach Einführung der Wickelmuffen, verglichen mit den Gussmuffen,

praktisch ungefähr gleich. Mit der Zeit erlangte jedoch das Personal in der verhältnismässig viel Zeit beanspruchenden Wickelarbeit eine derartige Fertigkeit, dass die Kosten einer Wickelmuffe auf ca. 80 % derjenigen einer massegefüllten Muffe reduziert werden konnten. Die für den Einbau einzuräumende Zeit, d. h. also die Frist, während welcher, beispielsweise bei einer Reparatur, mit einem Ausfall des Kabels gerechnet werden muss, ist bei beiden Verbindungsarten gleich. Die Wickelmuffe erfordert wohl einen grösseren Arbeitsaufwand. Dieser wird aber durch den Wegfall der bei Gussarmaturen für das Abkalten der Ausgussmasse einzuräumenden Frist kompensiert.

Nicht in Franken und Rappen ausdrücken lassen sich die ebenfalls auf Seite der Wickelmuffe liegenden Vorteile einer viel einfacheren Lagerhaltung. In Werken mit ausgedehnten Kabelnetzen beanspruchen die auf Reserve zu haltenden schweren Gussarmaturen einen ganz beträchtlichen Lagerraum, während man im Gegensatz dazu für die Lagerung der aus ein paar Bleirohrdimensionen und Dichtungskappen bestehenden Ersatzteile für Wickelmuffen mit einem Minimum an Platz auskommt.

Les installations de câbles dans le réseau des EEF.

M. L. Piller, Ingénieur principal d'Exploitation des Entreprises Electriques Fribourgeoises (EEF): Les EEF ont depuis plus de 30 ans, tant pour la haute que pour la basse tension, des câbles en service dans les principales agglomérations de leur réseau. La tension de distribution est de 8 kV.

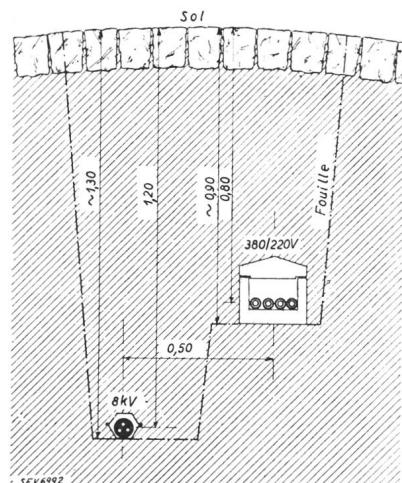


Fig. 1.
Disposition des câbles
à 8 kV et 220/380 V
dans une fouille
commune.

Les câbles utilisés sont du type B sous plomb non armé, et établis pour une tension nominale de 15 kV. Nos câbles sont placés à env. 1.2 m de profondeur pour la haute tension, et à 80 cm pour la basse tension (fig. 1). La distribution à haute tension comporte, à part quelques exceptions pour de très grosses sections, des câbles tripolaires protégés par

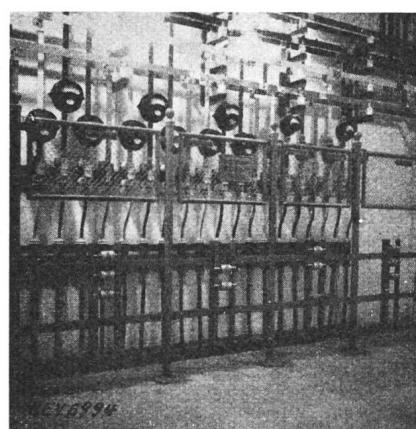


Fig. 2.
Départ de câbles 220/380 V dans une station transformatrice.

des fers Zorès. La distribution basse tension est faite exclusivement à l'aide de câbles unipolaires, disposés dans des caniveaux en ciment. Les fig. 2 et 3 représentent des départs de câbles secondaires à l'une de nos stations transformatrices.

Depuis quelques années, le raccordement aux lignes aériennes primaires des stations transformatrices placées à l'intérieur de fabriques ou de bâtiments importants se

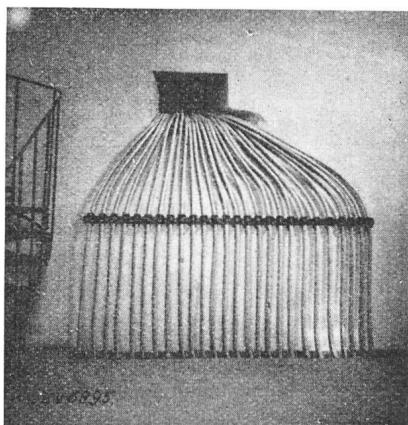


Fig. 3.

Câbles 220/380 V dans une station transformatrice.

fait également par câble. L'arrêt de la ligne aérienne s'effectue sur un Mannesmann auquel est fixée d'autre part la boîte à câble (fig. 4). Nous préférons utiliser actuellement pour cet arrêt un Dip, avec amarrage de la ligne par des isolateurs à chaîne (fig. 5). Entre la ligne et le câble, nous intercalons des selfs rigides, visibles sur la fig. 5. Les longueurs de câble nécessaires pour cette introduction sont déterminées par les conditions locales, c'est-à-dire par l'emplacement de la cabine dans le bâtiment, et par les possibilités d'arriver avec la ligne aérienne à une proximité plus ou moins grande de celui-ci. Ces longueurs varient entre quelques dizaines et quelques centaines de mètres. Nous n'avons jamais eu aucune difficulté avec ce système d'introduction.

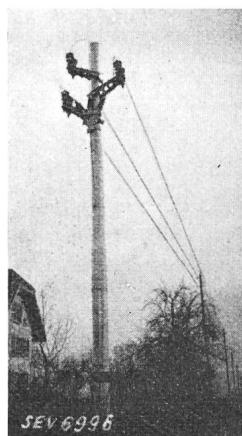


Fig. 4.

Arrêt d'une ligne aérienne avec raccordement de câble 8 kV.

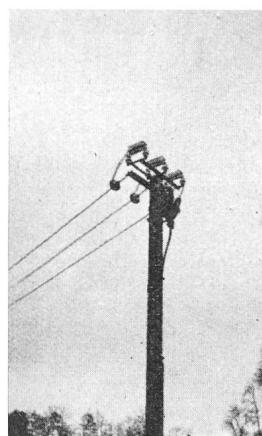


Fig. 5.

Arrêt d'une ligne aérienne avec raccordement de câble 8 kV.

Après plus de 30 ans d'exploitation, nous n'avons connaissance d'aucun dérangement dans notre réseau de câble 8 kV ainsi établi. Nous attribuons ce résultat favorable au fait que, grâce à la profondeur de 1,2 m, le câble est soustrait à la plupart des détériorations mécaniques qui se produisent pendant les travaux de réfection des chaussées et autres. Grâce à cette profondeur également, le câble est aussi, à notre avis, moins soumis aux effets des courants vagabonds. Les fers Zorès dans lesquels il est placé, soigneusement goudronnés avant d'être posés, constituent aussi une protection contre ceux-ci, et nous n'avons pas constaté jusqu'à présent de corrosion électrolytique de ces fers.

Pour des tensions plus élevées, nous avons également à plusieurs endroits des câbles à masse 35 kV, et dans une fabrique un câble triplomb 35 kV, de 40 mètres de longueur env., reliant un réseau aérien à une station transformatrice intérieure 2×1300 kVA, 32 000/300 volts. Les fig. 6 et 7 représentent les extrémités de ce câble. On remarquera l'élegance des 3 têtes de câble et les facilités que présente cette disposition pour écarter les phases à une distance quelconque. Peu après la mise en service du câble triplomb, nous avons eu à déplorer à 2 reprises des claquages d'isolateurs et de

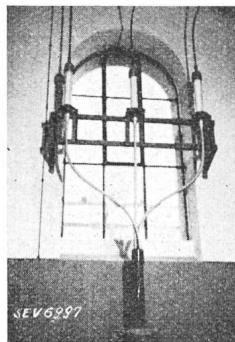


Fig. 6.

Extrémités d'un câble, 32 kV.

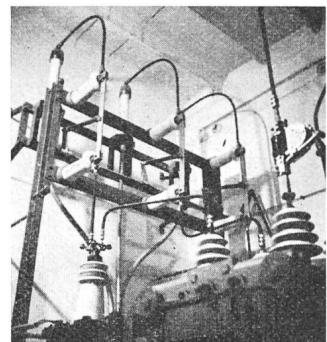


Fig. 7.

triangles de commande dans la station elle-même. Nous avons cru au premier abord qu'il s'agissait d'un phénomène de réflexion d'ondes ou de résonnance. Nous avons dû reconnaître ensuite que ces claquages devaient être attribués à la trop grande humidité du local, mis en service immédiatement après sa construction. Depuis que le local est sec, et il y a près de 3 ans que cette station est en exploitation, nous n'avons plus eu aucun dérangement.

Nous possédons enfin, en exploitation depuis 1934, un câble à huile fluide 95 mm^2 de section, 70 kV nominal, transportant l'énergie entre deux stations en plein air de notre usine de Hauterive, distantes de 150 m l'une de l'autre. L'épaisseur d'isolation de ce câble est de 6 mm, ce qui correspond à une contrainte réelle d'environ 11 kV par mm pour la tension d'exploitation de 65 kV. Sauf erreur, ce câble est le premier de ce genre que la Sté d'Exploitation des Câbles électriques de Cortaillod a livré, non pas pour

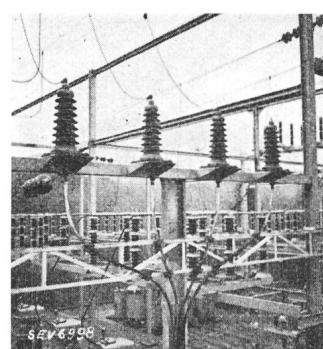


Fig. 8.

Extrémité d'un câble à huile, 70 kV.

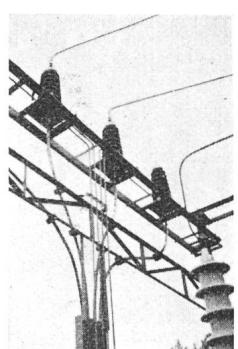


Fig. 9.

des essais, mais directement pour l'exploitation. Par mesure de sécurité, nous avons fait installer 4 câbles unipolaires au lieu de 3, afin d'avoir une réserve en cas de dérangement à l'un d'eux. Nous n'avons jamais eu besoin de faire appel au 4me câble. La fig. 8 représente le départ de notre station 130/65 kV, tandis que la fig. 9 montre l'arrivée à notre station 65 kV. On distingue sur cette vue les tubes amenant l'huile fluide aux têtes de câbles. La vue fig. 10 montre les vannes qui permettent d'éliminer de la distribution d'huile l'un quelconque des câbles. Enfin, la fig. 11 représente le réservoir d'huile fluide, dans lequel celle-ci est maintenue sous pression par un coussin d'azote. A l'aide du

manomètre, visible au-dessus du réservoir, on contrôle régulièrement la pression, deux fois par jour. On note celle-ci, ainsi que la température extérieure et la charge du câble. Dans les mêmes conditions de température extérieure et d'intensité de courant, nous obtenons toujours la même pression. Il n'y a donc eu, jusqu'à présent, ni absorption de l'azote par l'huile, ni perte par défaut d'étanchéité.



Fig. 10.
Vannes de la distribution
d'huile.



Fig. 11.
Réservoir d'huile

Selon nos constatations, les câbles à haute tension, dans les limites que nous avons pratiquement en exploitation, présentent une sécurité presque absolue, s'ils ont été montés et si les boîtes d'extrémité ont été établies avec tout le soin nécessaire. Seuls les prix et les frais d'installation, creusage des fouilles, pose, remblayage et remise en état du terrain, limitent les possibilités d'utilisation.

Dans les câbles basse tension, par contre, les détériorations ne sont pas rares. Elles sont dues, non pas à l'exécution du câble, mais à des causes extérieures, la plupart mécaniques, telles que coups de pioche ou de barre-à-mine. Les dérangements se révèlent généralement quelque temps après l'exécution de travaux dans le voisinage des câbles. Les racines des arbres occasionnent aussi des perturbations. Elles s'introduisent dans les caniveaux, s'y glissent entre les divers câbles, entourent ceux-ci et, en croissant, finissent par abîmer et percer le plomb. Nous devons constater enfin aussi des détériorations par corrosion électrolytique, provenant des courants vagabonds des tramways, les éclissages des rails étant souvent insuffisants ou inexistant.

Presque chaque fois que, pour l'une des causes ci-dessus, une détérioration se produit, nous constatons une série d'autres dérangements à proximité. Les surtensions provoquées par le premier claquage occasionnent à leur tour le claquage des autres points faibles des câbles raccordés.

Pour éviter de trop longues interruptions, il importe de rechercher et de localiser rapidement les défauts. Les méthodes à employer ont déjà été traitées à fond par M. Foretay. Mentionnons cependant que, lors des mesures, il y a lieu de tenir compte du voisinage de tramways ou de lignes de chemin de fer à courant continu, qui peuvent conduire à des résultats erronés. Il faudra éventuellement choisir un moment favorable pour effectuer les mesures et attendre parfois l'arrêt de la circulation des tramways. Des lignes de distribution, présentant des charges dissymétriques et parallèles au câble avarié, peuvent aussi influencer la mesure. Ces lignes devront éventuellement être déclenchées pendant celle-ci.

Pour la recherche des défauts à la terre, nous utilisons la méthode de la boucle (fig. 12). La partie curviligne *A-B* forme deux des éléments du pont, les deux autres éléments étant constitués d'une part par le conducteur *A-C* et le tronçon de câble *C-X* aboutissant au défaut et, d'autre part, par le conducteur *B-F*, un câble ou un conducteur sain *F-E* et le second tronçon de câble *D-X*. Le courant est amené au pont à travers une résistance de protection *R* et au défaut par la terre, ou de préférence par le plomb du câble. En général, une tension de 4 volts suffit pour effectuer la mesure.

La même méthode peut servir pour la recherche d'un défaut d'isolement entre 2 conducteurs dans un câble multipolaire. Un des conducteurs défectueux servira alors, au lieu de la terre ou du plomb, à amener le courant au défaut.

La première mesure terminée, nous intervertissons en *A* et *B* les conducteurs venant de *C* et *F*. La position du pont doit être alors, à peu de chose près, le complément de

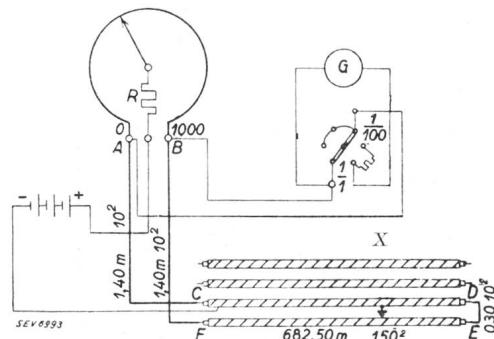


Fig. 12.

Méthode de la boucle pour la recherche des défauts à la terre.

la position précédemment obtenue. Au cours des mesures, on inverse aussi la polarité de la source de courant. Si cette inversion ne change pas les résultats, on peut admettre qu'il n'y a pas d'influence extérieure sur le galvanomètre. Nous obtenons de cette façon une précision très grande et arrivons en général à localiser le défaut avec une exactitude de quelques décimètres.

Pour les ruptures de conducteurs, la localisation se fait par des mesures de capacité faites au commencement et à la fin du câble, entre le conducteur malade et un conducteur sain de la même fouille. Cette méthode n'est applicable toutefois que lorsque le câble ne présente pas simultanément une mise à la terre.

En résumé, la construction des câbles a atteint, à notre avis, un degré de perfectionnement remarquable. Il est très rare de trouver des défauts d'origine interne, la plupart sont d'origine externe et c'est contre ceux-ci que nous devons nous prémunir; contre les causes mécaniques en enfouissant les câbles à des profondeurs suffisantes et en les munissant d'une protection mécanique efficace, contre les courants vagabonds en poussant à un meilleur éclissage des rails de tramways. La solution parfaite consisterait dans la suppression des courants vagabonds par le remplacement des tramways par des trolleybus.

2. Betriebserfahrungen, Störungen, Schutz (siehe auch unter «3. Messungen»).

Korrosionen an Bleikabeln und Ermüdungen an Bleimänteln.

Herr R. Iselin, Bauinspektor des EW Basel: Herr Schneberger hat in seinem sehr interessanten Vortrag im Abschnitt «Der Bleimantel» die drei hauptsächlichsten Angreifer der Bleimäntel erwähnt, nämlich

1. die interkristalline Brüchigkeit,
2. die chemische Zersetzung oder Selbstkorrosion,
3. die durch Fremdströme hervorgerufene Elektrolyse.

Was die beiden erstgenannten «Bleimantelkrankheiten» anbelangt, möchte ich über Erfahrungen, die im EW Basel gemacht wurden, kurz berichten.

1. Ermüdungserscheinungen an Bleikabeln und deren Vermeidung.

Von jehher hatte der Kabelfachmann Bedenken hinsichtlich dem Verhalten von in eisernen Brücken eingelegten Bleikabeln, d. h. bezüglich deren mechanischen Beanspruchungen durch die Dilatation der Brückenkonstruktionen. Bei längeren Brücken wurden die Kabel meistens mit einer Spezialarmierung, der sogenannten Einzugsarmatur, verschen und die beidseitigen Verbindungsmauffen, welche gleichzeitig

zur Arretierung der Zugarmatur dienen, in den Widerlagern verankert. Wenn auch in solchen Anlagen bisher noch keine Veränderungen des Bleies konstatiert worden sind, so kann diese Anordnung doch nicht vollständig befriedigen.

Im Jahre 1931 wurde die eiserne Brücke über die Birs bei Birsfelden (Widerlagerdistanz 38 m) entfernt und durch eine neue ersetzt. Beim Ausbau der anno 1912 in diese Brücke eingelegten eisenbandarmierten 7-kV-Kabel entdeckten wir in den Zoreseisen, in welche die Kabel eingebettet waren, in der Nähe der Widerlager Kabelöl. Die nähere Untersuchung ergab, dass die Bleimäntel stellenweise interkristalline Aenderungen und Querrisse zeigten, durch welche

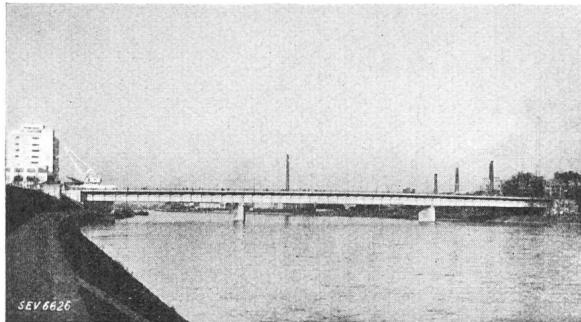


Fig. 1.
Die Dreirosenbrücke in Basel.

Oel der Kabelisolation austrat. Nach Art und Ort konnten diese Strukturveränderungen der Bleimäntel nur auf Dilatationsbewegungen und Erschütterungen der eisernen Brückenkonstruktion zurückgeführt werden. Ueber diese Brücke führte auch die Strassenbahn. Die Ersatzkabelleitung wurde durch ein oberhalb der neuen Brücke in die Flusssohle einbetonierte Zementröhrenbündel gezogen. Diese ideale Lösung kann aber nur in den seltensten Fällen angewendet werden.

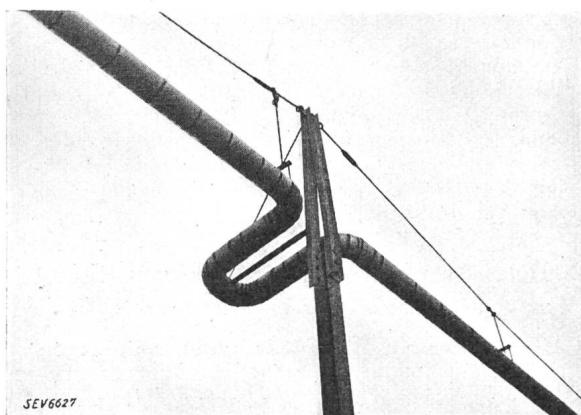


Fig. 2.
Expansionsbogen.

Bei der in den Jahren 1932...1934 erstellten eisernen Dreirosenbrücke (Fig. 1) über den Rhein (Widerlagerdistanz 255 m) wurde nach einem Weg gesucht, um die schädlichen Bleimantelbeanspruchungen zu vermeiden. Die gewählte Lösung lehnt sich an die bekannten Expansionsbogen der Dampfleitungen (Fig. 2) an. In den beiden Widerlagern ist je eine Dilatationskammer (Fig. 3) angeordnet, in welche die auf der Brückenkonstruktion befestigten Stahlröhren frei einmünden. In den Kammern werden die durch die Stahlrohre gezogenen Kabel (mit Einzugarmatur aus galvanisiertem Profileisendraht) mit möglichst grossem Radius um 90° zur Brückenachse abgedreht und unter das Trottoir hinübergeführt. Die frei schwebenden Kabel sind an Vielfachauflösungen befestigt; sie berühren den Boden kurz vor der ins Terrain ausmündenden Durchführung. Diese Anordnung ermöglicht, die Dilatationsbewegungen der Kabelröhren und

der Kabel durch die leichtbewegliche Kabelpartie auszugleichen.

Um sich ein genaues Bild über Art, Grösse und Häufigkeit der Bewegungen zu verschaffen, wurde in der linksrheinischen Brückenkopfkammer eine Registriervorrichtung (Fig. 4) eingebaut. Durch wahlweise Kupplung von Kabel oder Kabelrohr mit dem Instrument werden die Bewegungen in Naturgrösse registriert. Aus dem Diagramm ist als Mittelwert der Jahreskurve der saisonmässige Verlauf zu ersehen. Beachtet man die Einzelheiten des Diagramms, so ist festzustellen, dass die Bewegungen sehr häufig und verhältnismässig gross sind (sie erreichen an einzelnen Tagen Werte

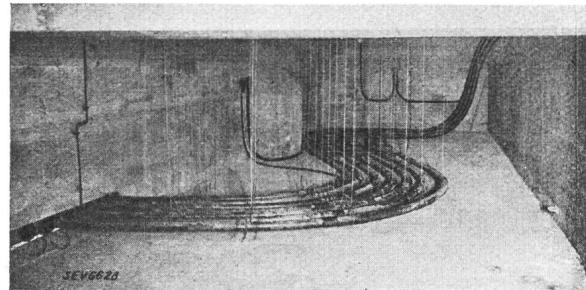


Fig. 3.
Innenansicht der Kabelkammer.

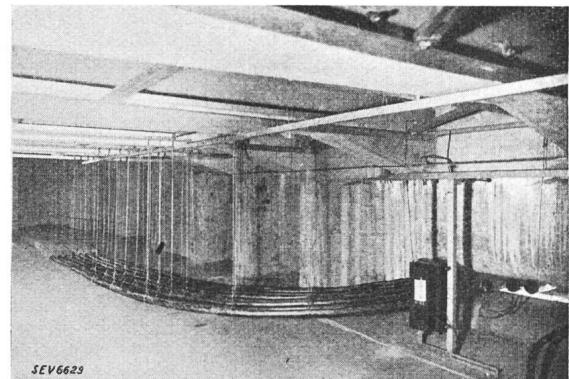


Fig. 4.
Vorrichtung zum Registrieren der Bewegungen der Kabel oder der Kabelrohre.

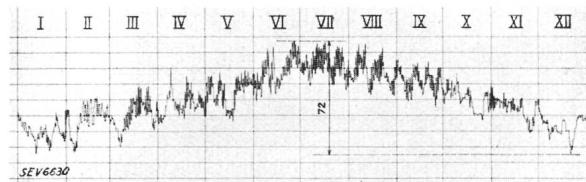


Fig. 5.
Diagramm der Kabelbewegungen während eines Jahres.

bis ca. 20 mm). Die maximale Differenz im Jahre 1935 beträgt 72 mm. Die im Diagramm (Fig. 5) aufgezeichneten Bewegungen müssten sich bei der bisher üblichen Verlegungsart in der Nähe des Widerlagers auswirken. Dass durch die stetigen Bewegungen, ohne Anwendung einer Dilatationsvorrichtung, außerordentlich schwere mechanische Beanspruchungen an den Kabeln auftreten müssten, ist einleuchtend, ebenso, dass diese früher oder später unfehlbar zu Ermüdungen der Bleimäntel führen müssten.

Die vom EW Basel getroffene Anordnung, welche u. W. andernorts noch nie angewendet wurde, beseitigt diesen Uebelstand sicher. Wo die räumlichen Verhältnisse die 90°ige Richtungsänderung in der Horizontalebene nicht gestatten, kann die Kabelumlenkung auch in die Vertikalebene verlegt werden, eine Anordnung, die für die im Umbau begriffene Wettsteinbrücke vorgesehen wurde.

2. Korrosionen an Bleikabelleitungen.

Bis vor etwa 10 Jahren wurden alle Korrosionen an Kabelbleimänteln, sofern nicht direkte Säureangriffe (in verseuchtem Auffüllerain oder in chemischen Fabriken) festgestellt werden konnten, mit dem Sammelbegriff «Elektrolyse» erklärt.

Im EW Basel wurde im Jahre 1928 ein Hochspannungskabel mit durchkorrodiertem Bleimantel gefunden, wobei einwandfrei festgestellt wurde, dass die Zerstörung weder von Erdströmen noch von schädlichen Beimengungen im Erdkörper herrührten konnte. Somit musste die Ursache der Zerstörung in der Imprägnierung der Jute gesucht werden. In dieser Annahme wurden wir bestärkt durch einen Artikel von O. Haehnel, Elektr. Nachrichtentechnik Bd. 5, S. 171 (siehe auch diesbezüglichen Hinweis in ETZ 1928, Heft 48, S. 1750). Dort wird festgestellt, dass Anfressungen an Bleikabeln auf die Einwirkungen der im Teer enthaltenen Phenole und Kresole usw. zurückgeführt werden mussten.

Der erwähnte Fall, welcher sich mit den Feststellungen von Haehnel deckt und der Umstand, dass an über 25 Jahre im Erdkörper liegenden, mit Asphaltbitumen oder Petroleumpech imprägnierten Kabeln ausländischer Provenienz noch nie solche Schäden entdeckt wurden, veranlassten uns, künftig die Teerimprägnierung zu vermeiden. Dementsprechend schrieben wir unseren Kabellieferanten zu Anfang des Jahres 1929 vor, künftig für die Imprägnierung der Bleimäntel, des Jutepolsters zwischen Bleimantel und Eisenbändern, der Eisenbänder sowie für die äussere Jutebewicklung keine teerhaltigen oder sonstwie die Bleimäntel schädigenden Substanzen zu verwenden.

Gewisse Widerstände gegen das Teerverbot hatten die Kabelfabriken bei den bisherigen Teelieferanten zu überwinden; aber auch dort musste man sich damit abfinden. Eines der grössten schweizerischen Gaswerke mit modernen Einrichtungen teilte uns damals wörtlich mit:

„Leider ist es nun' aber heute noch nicht möglich, die so wohl im Steinkohlenteer als auch im Steinkohlenteerpech enthaltenen hochsiedenden Phenole auf wirtschaftliche Weise zu entfernen.«

Für eine einwandfreie äussere Kabelimprägnierung kommen u. E. nur Asphalte (vollständig neutrales und chemisch reines Bitumen) sowie entsprechende Produkte der Erdölraffinerie in Betracht.

Nach diesen einleitenden Bemerkungen möchte ich über besonders schwerwiegende Korrosionsschäden an der unterirdischen Kraftübertragungsanlage Augst-Basel berichten. Für diese Anlage seien einige Daten genannt:

Stromart und Betriebsspannung: Drehstrom 7 kV.

Streckenlänge: 8,2 km.

I. Ausbau 1912: 3 verseilte Drehstromkabel, Kupferquerschnitt $3 \times 100 \text{ mm}^2$, mit 3 mm dickem, einfachem Bleimantel, doppelter Eisenbandarmatur,

2 Signalkabel $8 \times 1,5 \text{ mm}^2$, ebenfalls eisenbandarmiert.

II. Ausbau 1914: 2 Drehstromkabel wie oben.

Art der Verlegung: Grabentiefe ca. 1,10 m, Einbettung in Sand, Abdeckung mit Betonpanzern (Fig. 6).

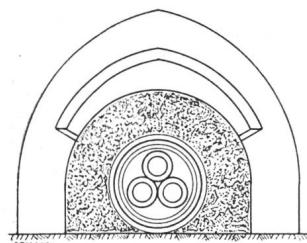


Fig. 6.

Kabelpanzer Augst-Basel.

Das Kabeltrasse folgt auf der ganzen Länge der nördlichen Seite der Kantonsstrasse Augst-Basel. Als im Jahre 1933 durch die Korrektion dieser Staatsstrasse umfangreiche Umlegungen der Kabelleitungen ins Auge gefasst werden mussten, wurde, vorgängig der Verlegungsarbeiten von den damals 22 Jahre im Betrieb stehenden Leitungen, ein Kabelstück von 40 m Länge ausgegraben, um es in der Kabelfabrik einer eingehenden Prüfung zu unterziehen. Die Prüfung hatte hinsichtlich der elektrischen Eigenschaften sehr gute

Resultate ergeben; dagegen wies der Bleimantel an einzelnen Stellen starke Korrosionen auf. Um zu erfahren, ob sich die Korrosion über die ganze Leitung hinziehe, wurden an allen 5 Kabeln, in Abständen von ca. 300 m, Bleimantel sondierungen vorgenommen. Das Resultat der Sondierungen war damals sehr überraschend. Stellenweise wurden vollständig gesunde Bleimäntel gefunden; andernorts waren aber einzelne Bleimäntel mehr oder weniger angefressen.

Die hierauf vom Generalsekretariat des SEV und VSE (Kontrollstelle der Korrosionskommission) vorgenommenen Untersuchungen an der Leitung ergaben vagabundierende Ströme, welche auf die Strassenbahnen Basel-Birsfelden zurückzuführen sind. Die Austrittstromdichte ist bei der grossen Gesamtoberfläche eines Bleimantels (1378 m^2) verschwindend klein, so dass hier keine wesentliche elektrolytische Mitwirkung bestehen konnte. Die Bleimäntel sind in den Verbindungsmaßen fortlaufend metallisch verbunden.

Die Untersuchung des Zersetzungspfades durch den Kantonschemiker von Baselstadt ergab folgende Zusammensetzung:

Bleikarbonat	88,3 %
Bleioxyd	7,1 %
Metallisches Blei (Einschlüsse)	2,2 %
Teerbestandteile und Asphalt	1,2 %
Feuchtigkeit	1,0 %
spez. Gewicht:	5,3.

Da somit das Zersetzungspfad in der Hauptsache basisches Bleikarbonat darstellt und in der teerimprägnierten Jute Phenole festgestellt worden sind, ergibt sich folgende Erklärung: Die Phenole verbinden sich mit dem Blei zu Bleiphenolat, welches sich bei Anwesenheit von Kohlensäure und Wasser (Erdfeuchtigkeit) in basisches Bleikarbonat verwandelt. Die Phenole werden dabei wieder frei und können sich von neuem mit Blei verbinden; dieser Vorgang kann also bis zum vollständigen Auflösen des Bleies forschreiten.

In den Jahren 1934...1936 wurden, anlässlich der etappenweisen Strassenkorrektion, die Kabel auf 4 Teilstrecken von zusammen 4,5 km freigelegt. Mit Rücksicht auf das schon bei den Sondierungen konstatierte unregelmässige Auftreten der Schäden mussten wir uns entschliessen, sämtliche Kabel bis auf den Bleimantel zu schälen, eine mühsame, zeitraubende Handarbeit. Es wurden dabei folgende Feststellungen gemacht:

Kein einziges Kabelstück (Fabrikationslängen ca. 300 m) war völlig korrosionsfrei. Eine Gesetzmässigkeit in der Reihenfolge oder in der gegenseitigen Lage der Schäden besteht nicht; auch ist die Tiefe der Korrosionsstellen sehr verschieden; sie variiert von leichten Ansätzen bis zur völligen Perforation.

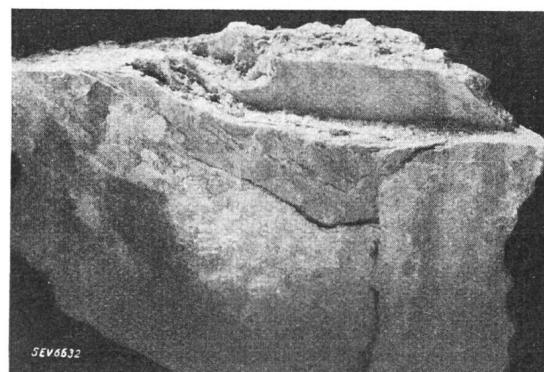


Fig. 7.
Kruste im Schnitt.

Wie aus der Fig. 7 zu erkennen ist, stellt das Zersetzungspfad ein schichtenartiges Gebilde dar. Je eine Schicht entspricht einer Feuchtigkeitsperiode, in welcher sich die für den Zerstörungsprozess erforderliche Kohlensäure bilden konnte.

Fig. 8 zeigt die typische Kavität, der dunkle Punkt die Bleimantelperforation mit etwas Kabelöl. Ferner ist noch darauf hinzuweisen, dass die Korrosionen sehr oft den spiralförmig verlaufenden Zwischenräumen des inneren Eisen-

bandes folgen (Fig. 9). Diese Feststellung ist sehr wesentlich; sie erklärt sich folgendermassen: Bei der satten Aufwicklung des inneren Eisenbandes entsteht eine Pressung des Jutepolsters; dadurch wird die noch flüssige Imprägnierungsmasse in die losen Juteschichten der Zwischenräume verdrängt. Dies hat eine Anreicherung der aggressiven Bestandteile an jenen Stellen zur Folge.



Fig. 8.
Kavität mit Punkt.

Wenn ich vorher sagte, dass an dieser Kabelleitung seit Jahren viele solcher Perforationen bestehen — auf der noch nicht regenerierten Hälfte noch heute —, so stellt sich die Frage, weshalb diese Bleimantellöcher bisher noch nicht zu Isolationsfehlern und Durchschlägen geführt haben. Die Erklärung hiefür ist folgende: Das Zersetzungprodukt besitzt das dreifache Volumen des Bleies. Die Kruste kann wegen der Umspannung durch die Eisenbänder nur nach innen wachsen, wodurch ein starker Druck auf den Bleimantel entsteht; diese Pressung führt zu Einbuchtungen des Bleimantels (Fig. 10). Durch den äussern Druck der Kruste werden aber auch die Löcher im Bleimantel, bis zu einem gewissen Fortschritt der Korrosion, automatisch abgedichtet, d. h. Feuchtigkeitseintritt zur Isolation wird verhindert.

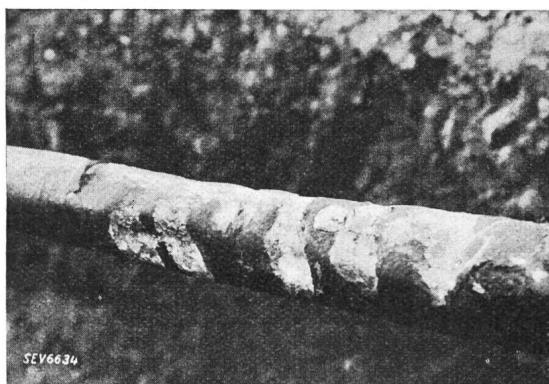


Fig. 9.
Spirale.

Schon bei den an den ersten freigelegten Kabellängen gemachten Beobachtungen hatten wir uns entschlossen, sämtliche Kabel nach der Schälung sowie einer an Ort und Stelle vorgenommenen genauen Kontrolle in die Fabrik zur Regeneration zu senden. Die Regeneration besteht aus folgenden Manipulationen: 1. Entfernung des Bleimantels, 2. genaue Prüfung und eventuelle Instandstellung der Isolation, 3. Austrocknung und Neuimprägnierung im Vakuumkessel, 4. Aufbringung des neuen Bleimantels, der äusseren Isolierung und Bewehrung. Die Kosten dieser Prozedur betragen ca. 45 % eines neuen Kabels; die so regenerierten Kabel dürfen aber Anspruch auf Neuwertigkeit erheben.

Zur Beruhigung darf zum Schluss noch erwähnt werden, dass nicht bei allen mit Teerimprägnierung versehenen Kabelleitungen diese Art Korrosionsgefahr besteht. Die Gefahr-

dung hängt ab vom Grad der Extrahierung der schädlichen Substanzen aus dem verwendeten Steinkohlenteer. In den Kriegs- und Nachkriegsjahren wurde die Extrahierung der damals schwer erhältlichen und dementsprechend wertvollen Nebenprodukte (Phenol, Kresol, Ammoniak usw.) speziell in den hiefür eingerichteten grossen Gaswerken sehr weitgehend betrieben. Daher sind die Kabel aus jenem Zeitabschnitt weniger gefährdet.

Es kommt aber auch sehr auf die Konsistenz der Isoliermasse an; dickflüssige zähe Massen schliessen die Phenole ein und entziehen sie der Verbindung mit dem Blei. Andauernd stark belastete Kabel sind dagegen wegen der bei hohen Temperaturen leichter verflüchtigenden Oele mehr gefährdet. Anderseits wurde auch konstatiert, dass bei unarmierten Kabeln die Gefahr der Bleimantelkarbonatbildung geringer ist, weil sich dort die Phenole leichter nach aussen verflüchtigen können.

Die im EW Basel gemachten Erfahrungen und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen decken sich mit einer uns von einem ausländischen Kabelwerk gemachten Schilderung über Korrosionsschäden an einer sehr langen Dreimantel-Kabelstrecke mit Teerimprägnierung.

Den Werken mit unterirdischen Kabelnetzen möchte ich neben der Ueberwachung der vagabundierenden Ströme emp-

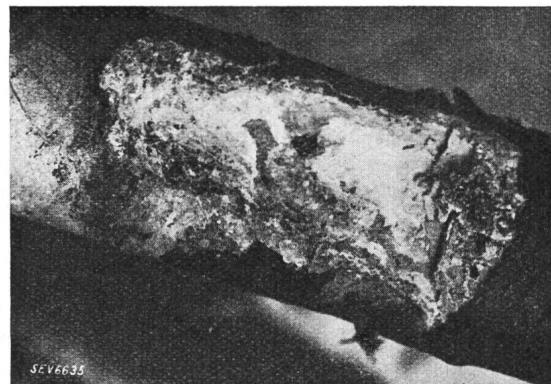


Fig. 10.
Einbuchtung.

fehlen, die Kabelbleimantel bei jeder sich bietenden Gelegenheit (Umlegungen, Einbau von unterirdischen Verteilkästen und Muffen usw.) einer genauen Untersuchung zu unterziehen. Die Kabelverlegungsprotokolle, aus welchen das Lieferjahr und die Kabelrollennummer zu ersehen sind, werden dabei gute Dienste leisten.

Unterlassen Sie aber keinesfalls, künftig in Ihren Pflichtenheften für die Kabellieferungen für die äussere Kabelimprägnierung neutrales, chemisch reines Bitumen hoher Konsistenz vorzuschreiben. Es rechtfertigt sich ausserdem, durch Stichproben die Reinheit der Jutetränkmasse von neu gelieferten Kabeln zeitweise durch den Chemiker überprüfen zu lassen; es stehen hier sehr grosse Werte auf dem Spiel.

Korrosionen an Bleikabeln¹⁾.

Herr H. Bourquin, Leiter der Kontrollstelle der Korrosionskommission, Zürich: Zu den interessanten Ausführungen von Herrn Inspektor Iselin, Basel, möchte ich folgendes beifügen: Die schädliche Wirkung des Phenols auf das Blei ist seit Jahren bekannt. Die Pflichtenhefte für die Lieferung von Bleikabeln enthalten deshalb meistens eine Bestimmung über die phenolfreie Zusammensetzung der Imprägnierungsmittel von Kabel-Schutzhüllen. Die seriösen Kabelfabriken haben aber nicht auf diese Pflichtenhefte gewartet, um von sich aus gefährliche Teerprodukte zu beseitigen. So verwenden unsere Schweizer Firmen schon lange ausschliesslich chemisch neutrales Bitumen, was leider nicht von allen ausländischen Kabelfabriken gesagt werden kann.

Zum Korrosionsfall an der Kabelstrecke Augst-Basel darf ich wohl als derjenige, der die von Herrn Iselin erwähnte Untersuchung des Jahres 1934 durchgeführt hat, etwas rich-

¹⁾ Dieser Beitrag wurde nachträglich schriftlich eingereicht.

tigstellen: die dort zwischen Bleimantel und Papierisolation gesammelten Zersetzungprodukte wurden nicht nur durch den Kantonschemiker von Baselstadt, sondern auch — in unserem Auftrage — durch die Eidg. Materialprüfungsanstalt an der ETH untersucht, welche im grossen und ganzen zu demselben Resultat kam, nämlich dass es sich vorwiegend um basisches Bleikarbonat handelte. Sie ging aber weiter und untersuchte die Isoliermaterialien (geteertes Papier und Jute) selbst, wobei «*Phenole nur in Spuren nachgewiesen werden konnten*». Wenn die Bleikarbonatbildung auf die von Herrn Iselin beschriebene Art, durch die Wirkung der Phenole entstanden wäre, so hätte man gewiss nicht nur Spuren dieser Substanz festgestellt, nachdem die Phenole sich ununterbrochen «bis zum vollständigen Auflösen des Bleies» regenerieren. Ich bin vielmehr der Meinung, dass im vorliegenden Falle neben einer allfälligen, jedenfalls aber eher schwachen Wirkung von Phenolen in erster Linie die hohe Temperatur des Kabelstranges, im Zusammenhang mit wechselnder Feuchtigkeit des Erdmediums, ferner bis zu einem gewissen Grade auch die *vagabundierenden Ströme*, die Hauptrolle gespielt haben.

Zunächst sei festgestellt, dass die Bildung von basischem Bleikarbonat nicht nur bei der Einwirkung von Phenolen und ähnlichen organischen Substanzen (Tearsäuren), sondern auch bei der blossen *Einwirkung von Wasser* (immer etwas kohlensäurehaltig) beobachtet wird. Anderseits weiss man, dass die Temperatur einen grossen Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit chemischer Prozesse ausübt, indem z. B. eine *Temperaturerhöhung* um 10 Grad die pro Zeiteinheit umgesetzte Stoffmenge durchschnittlich verdoppelt. Diese Tatsache ist nun in Beziehung zu bringen mit der Beobachtung, wonach die 6-kV-Kabel Augst-Basel, infolge ihrer konstanten, starken Belastung (ca. 170 bis 190 Amp. pro 100 mm²) normalerweise einer solchen Temperatur ausgesetzt sind, dass — nach Angaben des EW. Basel selbst — das Tracé der fünf Kabelstränge auf die Hauptstrasse Basel-Schweizerhalle-Augst im Winter durch sofortiges Schneeschmelzen und bei Regen durch rasches Trocknen des Asphaltbelages deutlich verfolgt werden kann.

Eine solche Wärmeentwicklung weist unbestreitbar auf eine aussergewöhnlich hohe Temperatur der Kabeloberfläche hin, die natürlich — Feuchtigkeit vorausgesetzt, was im Erdhoden mehr oder weniger immer zutrifft — eine *Beschleunigung des chemischen oder auch des elektrolytischen Korrosionsvorganges* zur Folge haben muss. Es kann aber kommen, dass die Wärmeentwicklung an der Kabeloberfläche ein Austrocknen der umliegenden Erde, bzw. des umgebenden Sandes bewirkt und somit die Korrosionsprozesse «bremst», wenn nicht ganz unterbricht, denn letztere sind ohne Feuchtigkeit überhaupt nicht möglich. Dies erklärt offenbar, warum die Kabel streckenweise absolut intakt waren, indem die gesunden Abschnitte an besonders trockenen Stellen lagen. Die lokale *Feuchtigkeitsverteilung* hat also hier, meines Erachtens, eine ausschlaggebende Rolle gespielt, indem die «trockenen» Kabelteile durch die Wärme geschützt wurden, während die «feuchten» Teile, d. h. solche, bei welchen der Wasserzufluss (z. B. bei Regen) durch die ausgestrahlte Kabelwärme nicht hintangehalten werden konnte, infolge der Temperaturerhöhung tiefgreifendere Korrosionen erlitten haben.

Was eine allfällige Wirkung vagabundierender Ströme betrifft, so ist zu sagen, dass die theoretische, *mittlere* Ausstromdichte tatsächlich gering, die effektive, *lokale* Stromdichte dagegen stellenweise sehr wohl gefährliche Werte erreichen konnte. Es ist nicht zulässig, den gesamten austretenden Strom mit der Gesamtoberfläche des Bleimantels in Beziehung zu bringen, denn die Erfahrung lehrt immer wieder, dass der Strom *höchst unregelmässig* die Metalloberfläche verlässt und dabei mehr oder weniger «punktformige», dagegen nie «flächenartige» Anfressungen bewirkt. Anderseits zeigen wiederholte Versuche unserer Kontrollstelle, dass beim elektrolytischen Vorgang die effektiv verlorengegangene Metallmenge im allgemeinen sehr gut mit dem theoretischen, nach dem Faradayschen Gesetz bestimmten Gewichtsverlust übereinstimmt. Im vorliegenden Falle haben wir z. B. eine mittlere austretende Stromstärke von ca. 125 mA bei Kabel I und eine solche von ca. 200 mA bei Kabel V gemessen. Nimmt man eine Betriebszeit der Strassenbahn Basel, bei normaler Belastung, von nur 12 Stunden an (was unter der wirklichen Dauer liegt), so bekommt man im Jahr einen theo-

retischen Bleiverlust von 1,06 oder 2,12 kg bei Kabel I und einen solchen von 1,7 oder 3,4 kg bei Kabel V, je nachdem die Zersetzung des Metallcs über vier- oder zweiwertige Bleiverbindungen erfolgt. Da unsere Versuche gezeigt haben, dass die effektiven Werte immer zwischen den theoretischen Pb⁺⁺ und Pb⁺⁺⁺-Werten liegen, hätte man hier auf alle Fälle mit einem durchschnittlichen jährlichen Verlust an Blei von mindestens 2 kg pro Kabel zu rechnen. Die Korrosionen der 6-kV-Kabel Augst-Basel sind bestimmt nicht mehrheitlich elektrolytischer Natur, aber es ist nicht zu leugnen, dass die *vagabundierenden Ströme* auch eine gewisse Rolle gespielt haben. (Die Tatsache, dass Streuströme der in bezug auf den Geleiseunterhalt tadellosen Strassenbahn Basel, bis Augst, d. h. in 8 km Entfernung der nächsten Tramalagen, noch spürbar sind, erklärt sich offenbar durch die besonders hohe Leitfähigkeit der tiefen Erdschichten in diesem salzhaltigen Gebiete der Schweizer Salinen.)

Es ist übrigens klar, dass das oben Besagte über den beschleunigenden Einfluss der hohen Temperatur allgemein für jeden chemischen bzw. elektrochemischen Prozess gilt, d. h. auch dann, wenn die Bleikarbonatbildung in der Hauptsache auf Phenole zurückzuführen wäre.

Ich möchte ferner noch beifügen, dass die von Herrn Iselin erwähnte schraubenförmige Lokalisierung der Korrosionsherde an der Kabeloberfläche einer häufigen Beobachtung entspricht. Sie lässt sich ganz allgemein durch höheren Feuchtigkeitsgehalt längs des Verlaufes der Jutefaser, an der Berührungsfläche mit dem Bleimantel, erklären; bei Anwesenheit einer Eisenbandarmatur gelangt zudem die Feuchtigkeit natürlich durch den spiralförmigen Zwischenraum, über die Jutepolsterung in erster Linie zu der darunterliegenden Bleioberfläche; daher die Korrosionsdichte, auch ohne eine besondere Anreicherung aggressiver Bestandteile an diesen Stellen.

Zum Schlusse glaube ich zur Beruhigung der Elektrizitätswerke mit ausgedehnten Kabelnetzen noch sagen zu dürfen, dass wir bei unserer langjährigen Tätigkeit als Kontrollstelle der Korrosionskommission selten schwere Korrosionsfälle an Starkstromkabeln beobachtet haben. Dies ist einerseits auf die äusserst *sorgfältige Fabrikation* dieser Kabel in unserem Lande (z. B. ausschliessliche Verwendung von Bitumen als Imprägnierungsmaterial), anderseits auf die ganz *zuverlässige Verlegungsart* (Wahl des Tracés, Schutzkanäle usw.), aber auch — was die Elektrolyse anbetrifft — auf den im allgemeinen sehr guten *Unterhalt unserer Strassenbahnen* (geschweisste Schienenstöße, daher geringe Streuung vagabundierender Ströme) zurückzuführen.

Ueberlastungsschutz.

Herr F. Grieb, A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden, berichtete über ein Hauptstrom-Relais, das ein thermisches Abbild der zu schützenden Kabelanlage enthält. Das thermische Abbild erwärmt und kühlst sich mit der Belastung genau wie das Kabel, so dass die Kabelanlage mit Sicherheit dann abgeschaltet wird, wenn die Temperatur die zulässige Grenze überschreitet. Das Thermorelais wurde inzwischen im Bull. SEV 1938, Nr. 12, S. 290, beschrieben; es sei hier auf jene Veröffentlichung verwiesen.

Expériences générales faites à Lausanne.

M. P. Meystre, ingénieur, chef du Service de l'électricité de la ville de Lausanne: Je n'ai pas l'intention, en prenant la parole, de compléter les savants exposés que vous venez d'entendre. Nos différents conférenciers, tous spécialistes dans la construction des câbles, font partie, les uns et les autres, de firmes dont la réputation n'est plus à faire.

Je désire, ici, faire part des expériences que nous avons faites dans le réseau de la Ville de Lausanne, non point que j'ait la prétention que nous puissions être pris comme exemple, mais dans l'espoir que les points que je vais traiter susciteront une discussion et des critiques nourries. Cela nous permettra d'en tirer des améliorations pour notre exploitation. C'est donc du simple point de vue de l'exploitant que je me place.

Afin de situer les remarques qui vont suivre, relevons d'abord quelques statistiques. A fin 1936, nous avions en service:

câbles triphasés *armés*, armature recouverte de jute goudronné, 3000/6000 volts: 116 km;
câbles triphasés asphaltés, basse tension: 257 km.

Ces longueurs sont celles des canalisations, y compris pour les câbles BT les dérivations partant du réseau pour alimenter les bâtiments. Nous posons les câbles HT directement dans la fouille, à 90 cm de profondeur (fig. 1). Les câbles BT qui sont simplement asphaltés, sont posés à une

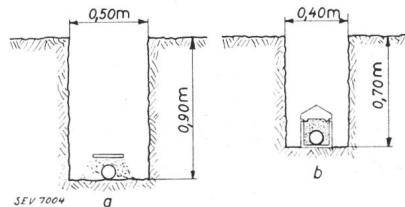


Fig. 1.
Pose des câbles
à Lausanne.
a Câbles HT,
b Câbles BT.

profondeur moindre, à 70 cm du niveau du sol, dans un caniveau. Ceci sont les méthodes générales adoptées pour la pose dans les rues, normalement dans le trottoir.

Défauts.

Le Tableau I donne les résultats de notre statistique des défauts. Il vaut la peine d'en tirer quelques remarques. Nous avons essayé de classer les défauts constatés depuis quelques années par catégories, afin, si possible, d'en tirer des déductions et des améliorations ensuite. Nous avons les défauts:

Statistique des défauts sur les câbles souterrains.

Câbles B.T.: plomb asphalté.

» H.T.: 3 et 6000 V armé. Tableau I.

Désignation de l'avarie	Année 1935		Année 1936		Année 1937 au 31 X 37	
	H.T.	B.T.	H.T.	B.T.	H.T.	B.T.
Nombre de défauts de fabrication . . .	—	—	1	—	—	—
Nombre de défauts dans des boîtes de connexion	—	1	1	—	—	4
Nombre de défauts causés p. coups de pioche	réparés immédiat.	1	4	—	3	—
	remblayés et révélés plus tard	—	9	—	3	—
Nombre de défauts causés par affaissem. de terrain, électrolyse ou divers .	1	11	—	6	—	9
Total des défauts . . .	2	25	2	12	—	23
km de câble en service à la fin de l'année . . .	112	249	116	257	—	—

Observations: Certains défauts provoqués par coups de pioche, puis remblayés, ne se sont révélés qu'après les nombres d'années: 1—4—4—5—8—9; pour ce dernier cas, 2 mois après le passage de 220 V à 380 V.

1^o de fabrication.

2^o dans boîtes de connexion.

3^o par coups de pioche

- a) réparés immédiatement;
- b) apparus plus tard.

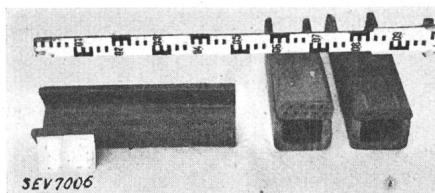


Fig. 3a.

Accessoires de câbles, en terre cuite.
Différents caniveaux pour câbles BT.

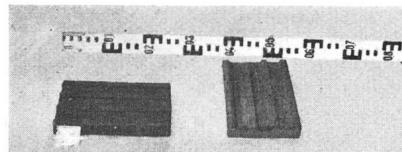


Fig. 3b.

Accessoires de câbles, en terre cuite.
Planeilles de protection de câbles HT

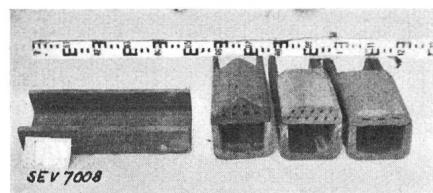


Fig. 3c.

Accessoires de câbles, en terre cuite.
Différents caniveaux pour câbles BT.

4^o autres défauts: affaissement de terrain, électrolyse, courants vagabonds etc.

1^o Nous pouvons rapidement laisser de côté la 1^{re} catégorie, celle des *défauts de fabrication*; comme vous le voyez dans le tableau, un seul cas s'est présenté dans les 3 dernières années.

2^o Les *défauts dans des boîtes de connexion* ne sont déjà pas négligeables, puisqu'ils représentent 6 cas sur un total de 64 durant les 3 années considérées. Nous aurons l'occasion d'y revenir.

3^o Les défauts par *coups de pioche* sont de loin les plus importants, puisqu'ils sont au nombre de 30 sur 64, soit pratiquement le 50 % des cas.

4^o Enfin, la 4^{re} catégorie, contenant tous les autres cas, vaudra elle aussi la peine qu'on s'y arrête un peu plus.

Défauts dans les boîtes.

Causes: Ces défauts se sont présentés exactement de la même façon que lorsqu'ils se trouvent sur le câble lui-même, et sur des boîtes placées à des époques très différentes (fig. 2). La masse isolante ne l'était plus du tout et s'était transformée en une sorte de «gélée» pourrie. Cette transformation se produit lorsque de l'humidité a pu pénétrer dans la boîte. Il y a donc lieu de veiller soigneusement à l'étanchéité entre les deux demi-boîtes et aux points d'entrée et de sortie du câble. Il ne faut en effet pas perdre de vue que les variations de température vont jouer un rôle très important. Faut-il encore relever la nécessité de posséder une matière présentant toutes garanties? Encore faut-il que cette masse soit coulée à la température voulue et qu'elle ait été chauffée de façon convenable. Nous la liquéfions en la chauffant avec une grosse lampe à pétrole (genre lampe de soudeur) et le contrôle de la température est laissé à l'appréciation du monteur. Nous estimons que ce

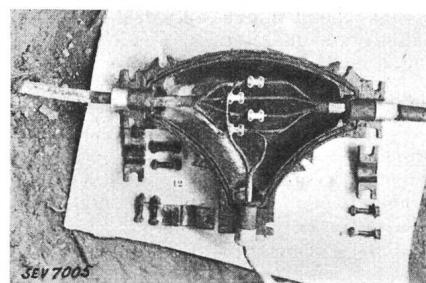


Fig. 2.
Boîte de dérivation.
Joint extérieur en plomb.
Joint intérieur en matière assurant l'étanchéité.

mode de faire présente des aléas et peut entraîner la brûlure de la matière. Nous serions heureux de connaître quelles méthodes sont employées ailleurs et les résultats obtenus.

Défauts par coups de pioche.

On constate que la plupart des accidents par coups de pioche sont dans les câbles à BT. Cela provient du fait que, placés moins profond, ils sont plus facilement atteints (souvent après enlèvement du couvercle) par les nombreux travaux que l'évolution constante de la Ville provoque.

La planelle en brique rouge qui recouvre les câbles HT (fig. 1) est davantage faite pour signaler le câble que pour le protéger. Il en est autrement pour les câbles BT. Le premier mode de faire comportait des caniveaux et cou-

vercles de brique rouge (fig. 3). Plus près du sol, il est nécessaire que le couvercle constitue une protection. Or, un coup de pioche malencontreux pouvait casser le couvercle et détériorer le câble. Le couvercle a été renforcé; mais ce fut insuffisant. On changea alors sa forme, de façon que les coups de pioche soient si possible déviés. L'amélioration était nette, mais la brique fut remplacée, après des essais de résistance effectués par le Laboratoire d'essai des matériaux de l'Ecole d'Ingénieurs de Lausanne, par du béton de ciment (fig. 4).

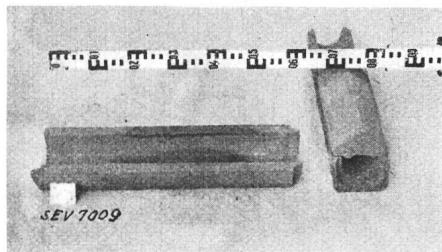


Fig. 4.
Caniveaux en béton pour câbles BT.

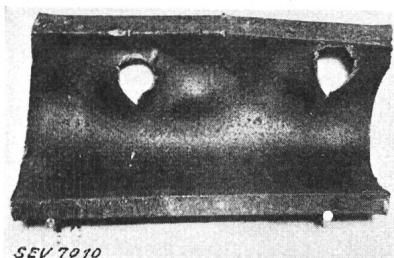


Fig. 5.
Enveloppe de câble BT placé dans zorès et détériorée par deux coups de pioche.

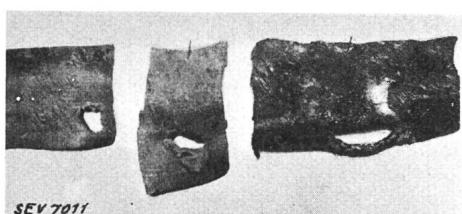


Fig. 6.
Enveloppes de câbles placés dans des zorès et détériorés par des coups extérieurs.



Fig. 7.
Résultats d'un coup de pioche après 4 ans.

On pourrait se demander pourquoi nous n'employons pas le zorès? Question de prix d'abord, de pratique ensuite: difficultés dans les courbes, changement de niveau etc. (couper fer aux dérivations pas autorisé). Le zorès n'est pas non plus une protection absolue (fig. 5 et 6). La fig. 7 montre la grave avarie provenant d'un coup de pioche également, mais qui ne s'est décelée qu'après 4 ans (armature fondu).

Le câble supérieur de la fig. 8 a été détérioré par l'affaissement d'un mur, érassement; celui de dessous est une suite du défaut supérieur. Ce câble était protégé par un zorès; celui-ci fut mis à une phase par le défaut supérieur, ce qui provoqua le percement représenté en-dessous, à l'autre extrémité du zorès.

Le cas de la fig. 9 se rapporte à l'un de nos anciens câbles qui possédaient deux armatures concentriques en plomb. Vous voyez qu'il fut littéralement criblé de coups lors d'une réparation à un immeuble.

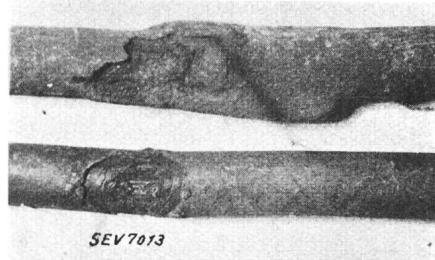


Fig. 8.
Câbles protégés par zorès et ayant subi un érassement.

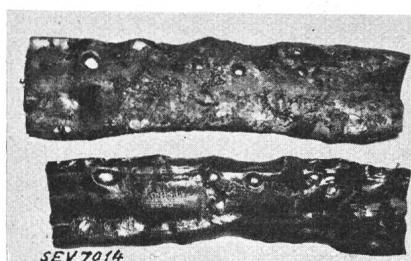


Fig. 9.
Les coups de pioche ne se comptent plus...

Autres défauts.

Fig. 10: Un coup de pioche provoque après un certain temps la mise à la terre d'une phase. Le retour à la station se fait par le plomb, mais dans ce secteur les boîtes de jonction ne sont pas spécialement mises à la terre. Fig. 11: Comme il est facile de le constater, les manchons d'étan-

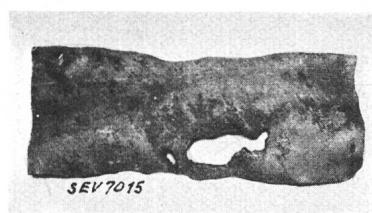


Fig. 10.
Effet prolongé d'un coup de pioche.

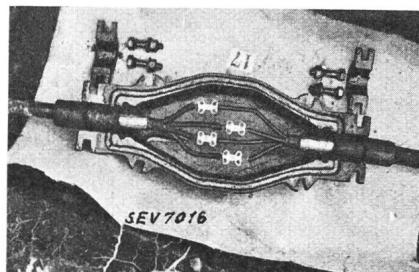


Fig. 11.
Boîte de jonction sans dispositif spécial de mise à la terre du plomb.

chéité constituent un arrêt dans la conductibilité du plomb. Le courant doit cependant passer. Résultat: dans toutes les boîtes de jonction situées entre le défaut et la station, le courant a passé en détériorant le plomb sous la bague d'étanchéité (fig. 12). Nous verrons plus loin comment nous met-



Fig. 12.

Défauts de mise à la terre dans les boîtes: le courant passe en détériorant l'armature en plomb.

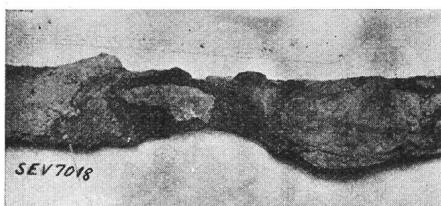


Fig. 13.

Corrosion dans du terrain rapporté.

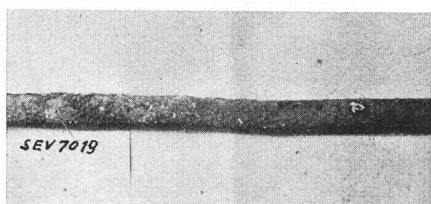


Fig. 14.

Corrosion par mauvais terrain.

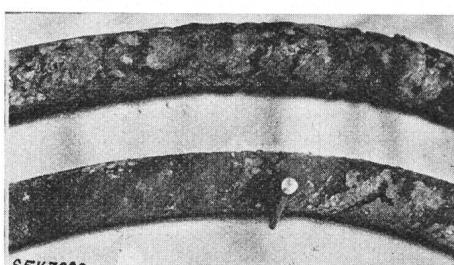


Fig. 15.

Corrosion par mauvais terrain.

tons actuellement le plomb à la terre, dans les boîtes, pour éviter la répétition de tels défauts.

Nous n'oubliions pas les corrosions, que ce soit par courant électrique ou par action du terrain, qui dans certains cas ont des effets désastreux.

Je laisse à des personnes plus qualifiées que moi le soin d'expliquer l'influence du «PH» du terrain dans de tels phénomènes. Les fig. 13, 14 et 15 en montrent quelques cas typiques.

Mise à la terre des boîtes.

Nous avons cité un cas, où un manque de mise à la terre des boîtes a entraîné des détériorations graves. L'ancien procédé d'assurer l'étanchéité, anneaux isolants très serrés sur le câble, nous a paru à conserver, mais il y avait lieu de le compléter par une mise à la terre. Différents procédés ont

été étudiés par nous. Nous nous sommes arrêtés à celui consistant en des anneaux de plomb, serrés entre l'armature du câble et les bagues de la boîte. L'étanchéité est assurée comme précédemment, et la mise à la terre est satisfaisante (fig. 16, 2, 11).

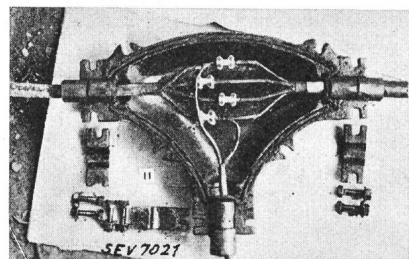


Fig. 16.

Boîte de dérivation. L'anneau intérieur assure l'étanchéité, l'anneau extérieur la mise à la terre du plomb.

Pose de câbles.

Je voudrais maintenant aborder un sujet tout à fait différent de celui traité jusqu'à maintenant: la question de la pose de câbles.

Cette pose s'effectue de deux manières:

- 1^o par déroulement de câble,
- 2^o par tirage de câble.

La première méthode est beaucoup plus avantageuse au point de vue temps employé, sitôt que l'on possède un dispositif convenable et que les circonstances le permettent. Malheureusement, il faut constater que dans les villes il est extrêmement rare que cette méthode puisse être utilisée, tout au moins d'après les constatations que nous avons pu faire sur notre réseau. En effet, les câbles se posent dans les rues et les fouilles sont constamment traversées par des obstacles de tous genres: canalisations d'eau, de gaz, câbles téléphoniques etc., pénétrant dans les immeubles et empêchant ainsi de poser le câble par déroulement, comme cela serait fait en rase campagne. Nous ne faisons donc que signaler ce premier mode de faire en relevant combien il est difficile de l'utiliser.

Notre façon générale de procéder est donc de poser la câblerie par tirage du câble. En ce qui concerne cette méthode, nous avons fait un certain nombre de constatations, et nous aimerions connaître, dans le même ordre d'idées, les expériences faites ailleurs, tout d'abord au point de vue des longueurs maximales des tronçons posés en une seule fois.

De façon générale, tout récemment encore, pour des câbles de grosses sections, câbles HT 3×95 mm², câbles 6000 V armés, poids par 100 m 1000 kg, nous ne posons que des longueurs oscillant autour de 250 m au maximum. Depuis un certain temps, nous nous sommes efforcés d'augmenter la longueur maximale des tronçons, ceci pour diminuer le nombre des boîtes de jonction et des inconvénients qui en résultent. Nous sommes arrivés ainsi jusqu'à 500 m pour de tels câbles. Pour cela, nous utilisons un nombre d'hommes suffisant pour que le tronçon à tirer par homme n'atteigne pas des valeurs trop élevées. Nous avons oscillé autour de 4 et 6 m. Nous avons alors pu constater que sitôt que le tronçon par homme dépassait 5 m, les temps de pose augmentaient par m de câble posé. Nous sommes ainsi arrivés jusqu'à 35 minutes de manœuvre par m de câble posé. Dans d'autres cas, nous sommes descendus à 18 minutes et 9 minutes de manœuvre par m de câble posé (tableau II).

En résumé, il nous paraît donc qu'il y a intérêt à ne pas excéder la longueur de 5 m par homme.

Pour les grands tronçons, nous avons employé des dispositifs d'amplification et des haut-parleurs, de façon que les ordres de tirage du chef de la pose soient bien entendus sur tout le tronçon considéré.

Nous pensons que des progrès doivent être faits de ce côté et qu'on doit arriver, en particulier, à des temps de pose encore plus réduits.

Tableau II.

Pose de câblerie partagée						
Dates 1937	4 novembre	5 novembre	8 novembre	11 novembre	16 novembre	19 novembre
Genre de câble . . .	$3 \times 95 \text{ mm}^2$ 6 kV					
Longueur . . . m	380	3×275	380	2×232	230 + 80	500 (350)
Nombre d'hommes pour pose	64	57	38	47	49	101
Nombre d'heures de manœuvre	225	280	99	$70\frac{1}{2}$	94	202
Durée de la pose . . .	4 h	8 h	3 h	$1\frac{1}{2}$ h	2 h	2 h
Nombre de mètres tirés par 1 homme . . .	5,9	4,8	4,5	4,9	4,7	5 (3,5)
Nombre d'heures de manœuvre par 1 m de câble	0,595	0,33	0,195	0,152	0,3	0,405

3. Messtechnisches.

Expériences faites à Genève et description d'une station d'essai transportable à haute tension.

M. R. Leroy, Ingénieur principal du Service de l'Électricité de Genève¹⁾: Le Service de l'Électricité de Genève possède deux réseaux primaires souterrains, l'un ancien à 3000/4250 volts biphasé à phases séparées, datant de l'époque de la construction de l'usine de Chèvres, soit de 1897, l'autre, plus récent, à 10 000/17 500 volts triphasé destiné à remplacer progressivement le premier.

Les câbles du réseau 3000 volts sont du type à deux conducteurs, avec un manteau de plomb entourant l'isolation du conducteur central et deux manteaux de plomb entourant l'isolation du conducteur extérieur. Le conducteur extérieur est à la terre à l'usine génératrice.

Ces câbles ont présenté entre 1925 et 1930, soit 30 ans après pose, un grand nombre de défauts. Ces points faibles éliminés, peu de défauts se sont produits par la suite, mais il fallut pour quelques lignes limiter la tension d'essai à 6000 volts pour les conducteurs centraux (actifs) et à 3000 volts pour les conducteurs extérieurs (à la terre à l'usine).

Ces défauts ont été de nature diverse:

En plusieurs points, il s'est produit un glissement entre les deux conducteurs, généralement en des lieux où le terrain est peu stable et où le câble subit de fortes pentes; il en résulte dans les manchons de jonction un contact des pièces raccordées entre elles et court-circuit. En d'autres points c'est le conducteur extérieur qui a glissé dans les plombs extérieurs, mettant dans les jonctions le plomb en contact avec la corde extérieure; il en résulte un passage de courant dans le plomb et des points de fusion du plomb dans les brides d'entrée des manchons et enfin pénétration d'humidité dans le câble et le manchon.

En maints endroits, des défauts ont été dus à la qualité trop résineuse de la matière d'imprégnation. Le papier a été trouvé très sec et cassant et il a suffi de quelque mouvement de terrain pour provoquer une fissure dans l'isolation et un court-circuit ne laissant aucune trace à l'extérieur des câbles.

D'autres défauts ont été dus à des attaques du premier plomb extérieur par certaines eaux ou par des impuretés de l'asphalte imprégnant le jute, se produisant simultanément avec des fissures longitudinales du deuxième plomb, d'où pénétration d'eau dans le câble. Sur plusieurs tronçons, des longueurs de 50 m complètement imprégnées d'eau et dont les plombs extérieurs se détachaient en véritables rubans, ont été remplacées.

Parmi les câbles du réseau 17 500 V triphasé, certains sont d'un type à 4 conducteurs avec 6 mm d'isolation au papier imprégné et ceinture de 6 mm de papier. Ces

câbles ont été posés vers 1908 pour un réseau 10 000/15 000 volts biphasé, mais utilisés peu après pour la tension 10 000/17 500 triphasé.

Dans l'un de ces câbles un manchon défectueux laissa pénétrer l'humidité dans le câble, d'où un court-circuit entre phases qui provoqua la destruction complète de 3 cordes sur une longueur de 1 m. La localisation ne put se faire que par mesure de capacité, la 4^{me} corde étant restée incomplètement détruite. Un autre défaut sur un câble 18 000 V posé vers 1920 a été dû à une attaque du fer et du plomb par des agents contenus dans le terrain. Dans le voisinage du cratère provoqué par le court-circuit plusieurs points d'attaque étaient visibles et recouverts d'un dépôt blanc dont la nature n'a pas été déterminée.

Un autre défaut sur câble de la même époque a été dû à des fissures longitudinales du plomb laissant pénétrer l'humidité.

Les défauts dans les boîtes d'extrémité sont très rares.

Ceux des manchons de jonction sont plus fréquents; certains ont été dus à la porosité du corps de fonte, d'autres au bris du couvercle. Souvent le court-circuit se produit aux endroits où la corde est trop fortement pliée, d'où cassure de l'isolation et allumage d'arcs contre le plomb ou le déflecteur placé sur le plomb. De tels défauts ne se produisent cependant que dans les manchons où a pénétré de l'humidité ou présentant des poches d'air. La pose de manchons plus longs permet d'éviter les pliages excessifs des cordes.

Des défauts se sont produits dans des manchons au droit de la soudure des cordes, au travers du filage manuel reconstituant l'isolation. Ce filage avait été mal serré et peu soigné, de sorte que le courant trouvait des passages directs jusqu'aux anneaux de maintien des cordes.

Des difficultés de pose se sont présentées au tirage de câbles type Hochstädt 18 000 V, $3 \times 120 \text{ mm}^2$ par coupes de 300 m. Un personnel de rencontre, insuffisamment stylé, n'assurait pas une traction assez énergique en tête au moyen du bas et de la corde; de la sorte, les hommes placés aux galets poussant le câble de l'arrière, il s'ensuivait une rotation et une torsion du câble telle, que l'armure se décollait par places. Le câble n'en subit cependant aucun dommage.

Des poses de câbles de même type ont été faites dans d'excellentes conditions en coupes de 600 m, également par tirage, mais en assurant la simultanéité de l'effort des hommes en disposant plusieurs haut-parleurs le long de la fouille.

En ce qui concerne les essais de câble il fallut dès 1930 renoncer aux mesures d'isolation au moyen du galvanomètre ballistique, la méthode ne permettant pas de déceler des défauts partiellement résolus après un court-circuit et qui perçaient à nouveau à l'essai sous tension.

Le Service de l'électricité a fait l'acquisition d'un transformateur réglable sous charge. Cet appareil permet d'obtenir

¹⁾ Dieser Beitrag wurde nachträglich schriftlich eingereicht.

des tensions de 0 à 10 000 V, 0 à 20 000 V et 0 à 40 000 V et autorise les essais en courant alternatif des câbles en grandes longueurs, puisque sa puissance est de 1350 kVA, 3×30 min.

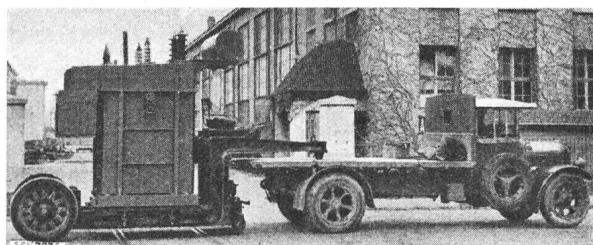


Fig. 1.
Transformateur d'essai en courant alternatif,
monté sur un chariot surbaissé.

Ce transformateur est utilisé pour forcer les défauts résolés résistant à l'essai en courant continu. Il se transporte au moyen d'un chariot surbaissé, derrière camion comme le montre la fig. 1.

Pour les essais en courant continu haute tension, il a été fait l'acquisition d'une installation Siemens de 50 000 V, 250 mA, à 2 kénotrons pour redressement des 2 ondes du courant alternatif. Une remorque a été construite, dans laquelle cet appareillage 50 kV a été placé à demeure.

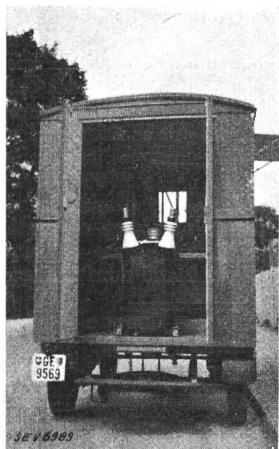


Fig. 2.
Installation d'essai
en courant continu, montée
sur une remorque.

porte un système d'attelage avec frein automatique, fonctionnant en cas de freinage du camion ou en cas de rupture d'attelage.

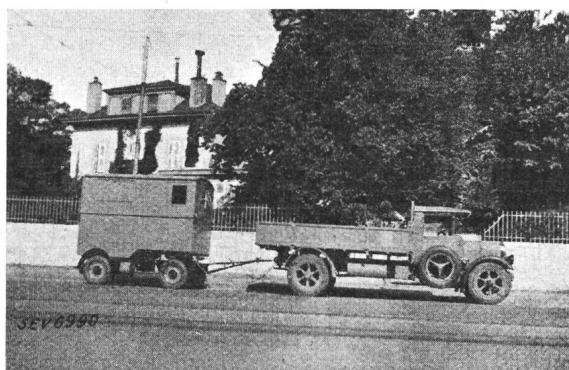


Fig. 3.
La station d'essai au transport.

L'équipement comporte des sièges rabattables et un escalier d'accès, ainsi qu'une armoire dans laquelle sont entreposés en permanence tous les instruments nécessaires aux localisations de défauts, tels que pont BT, piles, galvanomètres, megger 1000 V et 2500 V.

Cette installation très mobile permet, en outre, les essais de grandes longueurs de câbles jusqu'à 50 kV, les localisations de défauts très résistants par brûlage simultané avec la mesure, au pont HT. La précision des localisations en HT de défauts résistants est la même qu'avec un pont ordinaire en BT employé sur défaut franc. Il est possible de localiser sans détruire le point défectueux du câble et dès lors de faire toutes constatations sur la nature et l'origine du défaut.

Le prix de l'appareillage était de fr. 12 800.— et la remorque a coûté fr. 4500. La sensibilité est de 3×10^{-6} A ou 75×10^{-6} V par division de l'échelle. L'appareillage peut s'utiliser pour mesurer la résistance d'isolement au moyen du kilomètre et du milliampèremètre, mais cela donne un

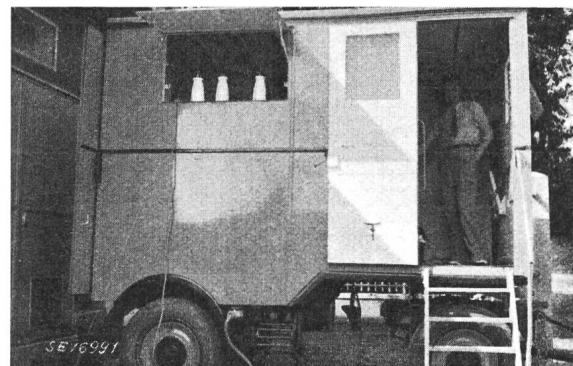


Fig. 4.
La station d'essai prête à fonctionner.

simple ordre de grandeur. Le temps nécessaire pour le transport à 6 km du point de départ, l'installation, la recherche et retour au garage, est de 3 heures, dès avertissement.

Des localisations sur câbles basse tension de défauts très résistants 100 kΩ à 400 kΩ ont été effectuées au moyen d'un pont basse tension en utilisant le galvanomètre ballistique à la place du petit galvanomètre fixé dans le pont et des piles jusqu'à 400 V. Un essai de localisation très concluant a été fait en utilisant en lieu et place de piles, une magnéto megger 2500 V sur un pont BT ordinaire. L'opérateur doit évidemment prendre de sérieuses précautions.

Des difficultés surgissent souvent au cours des recherches à cause des courants de retour des tramways. La différence entre le potentiel du terrain au lieu du défaut et le potentiel au lieu où est prise la terre du pont de mesure étant très variable, il s'ensuit que le zéro de la mesure se déplace continuellement. L'emploi d'un pont avec téléphone et courant à fréquence audible serait indiqué dans ces cas.

La gêne due aux courants induits sur un câble à 2 conducteurs concentriques peut être éliminée en mettant le conducteur extérieur à la terre. L'induction disparaît et la localisation est facile, mais il faut disposer d'un conducteur supplémentaire.

Depuis quelques années le point neutre du réseau 18 kV est mis à la terre par une bobine d'extinction, réglée au voisinage du courant de charge total des lignes. Pour la tension de phase la bobine est accordée pour 180 A; or, pour des terres franches, l'ampèremètre du neutre a indiqué 160 à 170 A.

Ce dispositif a signalé récemment 2 défauts de câble et évité la destruction des défauts en éteignant l'arc; il évite par conséquent l'extension des défauts, les courts-circuits entre phases et les déclenchements inutiles. La bobine peut rester 24 h en service jusqu'à ce que la ligne puisse être déclenchée sans gêne.

Messungen an verlegten 50-kV-Kabeln.

Herr P. Müller, Materialprüfanstalt (MP) des SEV, Zürich¹⁾: Die MP des SEV hat vor 9 Jahren mit der Durchführung dielektrischer Verlustmessungen an verlegten Hochspannungskabeln begonnen. Die Messungen erfolgten bei den ersten Versuchen auf Erdseite, bei den späteren durchweg

¹⁾ Nachträglich schriftlich eingereicht.

im Faraday-Käfig. Beide Methoden geben, wie Vergleichsresultate belegen, eine gute Uebereinstimmung der Ergebnisse.

Es liegt in der Natur der Sache, dass eine Messung der dielektrischen Verluste nur ein Bild über den mittleren Zustand des Kabeldielektrikums geben kann. Die Aufdeckung einer einzelnen Fehlerstelle ist bei Kabellängen von einigen hundert Meter nicht möglich. An diese Tatsache wurden wir im Laufe der Untersuchungen mehrmals erinnert; das eine

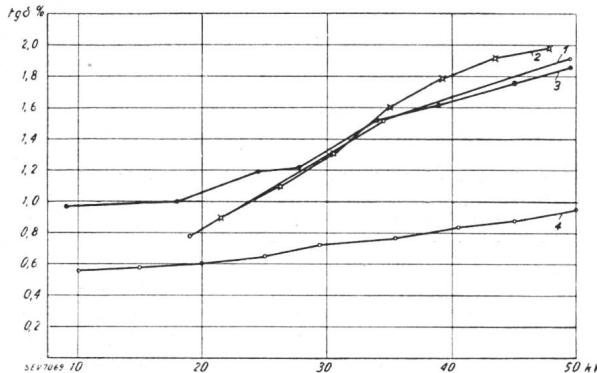


Fig. 1.

50-kV-Massekabel ohne H-Schutz, Fabrikation 1926, Querschnitt 150 mm², Belastung bis 250 A.

- 1 Messung 1928 bei 11° C
- 2 » 1929 » 10° C
- 3 » 1931 » 12° C
- 4 » 1936 » 16° C
- 1 bis 3 ohne Erholungszeit
- 4 Erholungszeit 18 h.

Mal schlug ein Kabelendverschluss wenige Stunden nach der Messung infolge eingedrungener Feuchtigkeit durch, ein anderes Mal erfolgte kaum 24 h nach der Messung ein Kabeldurchschlag infolge Bleimantelbeschädigung. Ein weiteres Mal schlug ein Endverschluss während der Messung durch, ohne dass wir rechtzeitig das zu messende Kabel ausser Spannung setzen konnten.

Trotz dieser Einschränkung halten wir die dielektrische Verlustmessung als sehr aufschlussreich zur Beurteilung verlegter Kabel. Vereinzelte Fehler oder schwache Stellen, die durch die Messung nicht aufgedeckt werden, lassen sich sozusagen in allen Fällen mit geringen Kosten reparieren und erfordern nie Auswechselung von ganzen Längen.

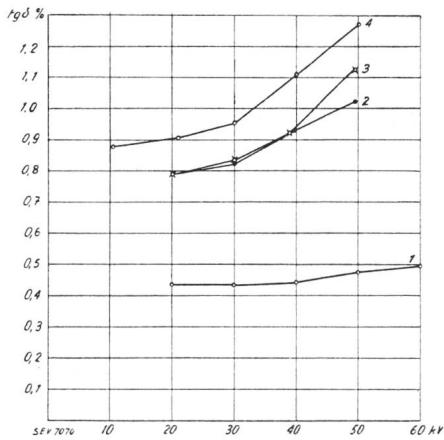


Fig. 2.

50-kV-Massekabel, Fabrikation 1928, Querschnitt 180 mm², Belastung bis 250 A, gute Kühlung.

- 1 Messung 1928 bei 20° C
- 2 » 1932 » 10° C
- 3 » 1934 » 10° C
- 4 » 1937 » 8° C

Die Diagramme 1 bis 5 zeigen einige charakteristische Verlustfaktorkurven von Einleiter-Kabeln aus verschiedenen Fabrikationsperioden.

Bei Vergleich verschiedener Kabel darf nicht übersehen werden, dass die dielektrischen Verluste ausser von der Tem-

peratur auch, und dies besonders bei stärker ionisierenden Kabeln, von der Dauer der Ausserbetriebnahme der Kabel bis zur Vornahme der Verlustmessung abhängig sind; diese beiden Einflüsse sind im Diagramm 6 deutlich zu erkennen.

Bei Kabeln, die weniger entfeuchtet sind, kann der Ioniisationsanstieg verschleiert sein. Vielleicht ist auch der im Diagramm 5 festgestellte geringe Rückgang des Verlustwinkels an einem Oelkabel durch Feuchtigkeit bedingt.

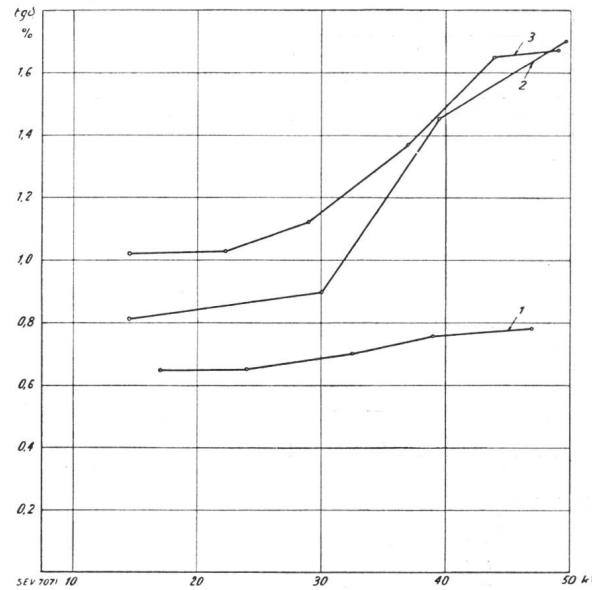


Fig. 3.

50-kV-Massekabel, Fabrikation 1928, Querschnitt 240 mm², Belastung bis 350 A, schlechtere Kühlung.

- 1 Messung 1929 bei 11° C Neuzustand
- 2 » 1933 » 10° C
- 3 » 1934 » 2° C

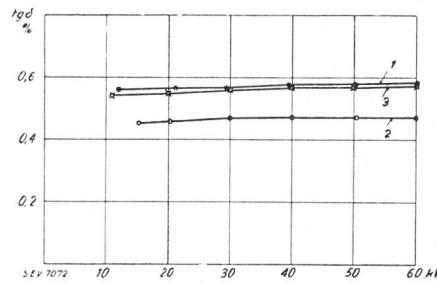


Fig. 4.

50-kV-Massekabel, Fabrikation 1932, Querschnitt 210 mm², Belastung 50...100 A.

- 1 Messung 1932 bei 10° C
- 2 » 1935 » 16° C
- 3 » 1936 » 11,5° C

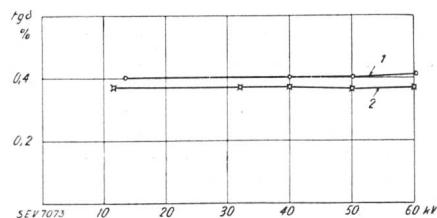


Fig. 5.

50-kV-Oelkabel, Fabrikation 1932, Querschnitt 95 mm².

- 1 Messung 1933 bei 13° C
- 2 » 1936 » 13° C

Als Resultat unserer Messungen kann folgendes festgestellt werden:

1. Die heute fabrizierten 50-kV-Massekabel sind einer nur geringen Alterung unterworfen, wenn die betriebsmässige Erwärmung klein, d. h. in der Grössenordnung von 10 bis 15° bleibt.

2. Auch stärker ionisierende Kabel brauchen nicht unbedingt dem Tode geweiht zu sein, sondern können bei mässiger Querschnittbelastung jahrelang stabil bleiben.

3. Die Verlustmessung hat eine besondere Bedeutung für Oelkabel, die mit wesentlich grösseren Spannungsgradienten arbeiten als die Massekabel. Oelkabel sollen frei sein von Verschlechterung des Dielektrikums.

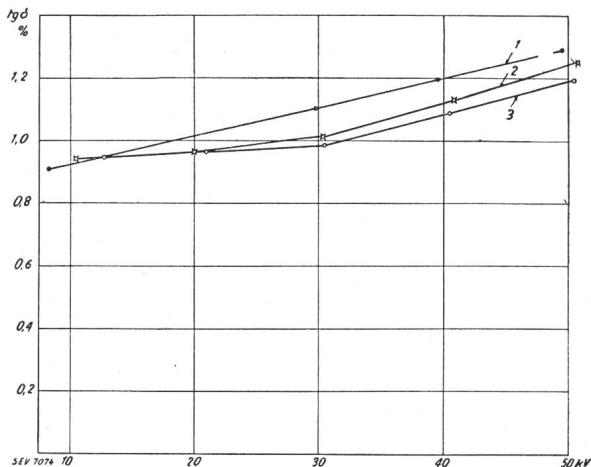


Fig. 6.

50-kV-Massekabel, Fabrikation 1928, Messung 1937.
Verlustfaktor und Erholungszeit.

Das Kabel stand vor den Versuchen während ca. 26 h unbelastet unter Spannung, Kabeltemperatur 9° C.

- 1 Messung 6 min nach Abschalten
2 » 5 h » »
3 » 17 h » »

Abschliessend noch eine Bemerkung zum Referat von Herrn Foretay: Herr Foretay legt nach unserer Ansicht ein zu grosses Gewicht auf die Messung des Isolationswiderstandes. Man wird als Kontrolle der Trocknung und Imprägnierung in der Fabrik diese Messung immer durchführen, und es wäre unverständlich, bei der Gleichspannungsprobe am verlegten Kabel das Milliampermeter, das den Ableitungsstrom misst, wegzulassen. Aber es darf nicht ausser acht gelassen werden, dass der Isolationswiderstand des Kabels stark temperaturabhängig ist und dass der Ableitwiderstand der Endverschlüsse besonders bei kurzen Strecken in gleicher Grössenordnung wie der Isolationswiderstand des Kabels selbst liegt.

Aus diesen Ueberlegungen haben auch die internationalen Vorschriften keine Messung des Isolationswiderstandes mehr vorgesehen.

4. Theoretisches.

Herr F. Beldi, A.G. Brown, Boveri & Cie., Baden: Es dürfte die Herren aus den Betrieben wie auch aus der Industrie interessieren, einmal einige Worte über die Hochspannungsleitung elektrischer Maschinen im Vergleich mit der Kabelisolation zu hören. Ich glaube damit nicht über den Rahmen des Themas dieser Diskussionsversammlung hinauszugehen; denn grundsätzlich ist beiden Problemen der Zweck, Strom durch einen geerdeten Konstruktionsteil zu führen, gemein, und es ist wohl zunächst jedem mit der Isolation elektrischer Maschinen beschäftigten Ingenieur der Gedanke gekommen, einfach ein Kabel an Stelle der Wicklung in den Eisenkörper zu legen. Damit hat er sich die grossen Fortschritte der Kabeltechnik in den letzten Jahren zu Nutze ziehen wollen, wobei ich hauptsächlich an die geringe Isolationsstärke, bzw. an die hohen Feldstärken denke. Ausser bei Hochspannungsventilröhren und im Kondensatorenbau sind diese hohen elektrischen Feldstärken meines Wissens in der Elektroindustrie sonst nicht zur Anwendung gekommen. Die Bedeutung hoher Feldstärken in der Isolation elektrischer Maschinen ist ganz offensichtlich, indem z. B. eine Verringerung der Isolationsdicke in der Nut bei einer 7000-V-Maschine um 1 mm eine Leistungssteigerung des Typs um 20 % bewirkt.

Welches sind nun die Gründe, die bis heute diese hohen Feldstärken in den Hochspannungsleitungen der elektri-

schen Maschinen nicht zulassen? Welche Schwierigkeiten treten im Bau von Hochspannungskabeln auf, und sind dies auch die Schwierigkeiten bei Hochspannungsmaschinen? Den Referaten der Herren Schneeberger und Borel ist zu entnehmen, dass die Kabeltechnik in der Hauptsache mit den Vorgängen beim Dauerbetrieb zu kämpfen hatte. Das heisst nicht etwa, dass die für Kabel verlangten hohen Prüfspannungen, auch nicht die gegensätzliche Eigenschaft der meisten Isolierstoffe — nämlich dass hochwertige Isolatoren kleine mechanische Festigkeit aufweisen —, diese erhebliche Forschungstätigkeit verlangten. Die ursächlichen Schwierigkeiten für Massekabel waren: Hohlraumbildung bei Temperaturschwankungen und damit Zerstörung der Isolation durch Ionisation bei hohen Feldstärken. Beim wohl interessantesten Kabel, dem Oelkabel, setzt die Tatsache, dass einerseits das Isoliermittel mit der kleineren Dielektrizitätskonstante — also das Oel — auch kleinere dielektrische Durchschlagsfestigkeit aufweist und dass es anderseits durch starke Felder verdrängt wird, die Grenze für die Höhe der angewandten Feldstärke. Und da, wie Herr Schneeberger erwähnte, auch bei der sorgfältigsten Evakuierung und Imprägnierung immer noch ein Lüftrest in der Isolation verbleibt, wird letzten Endes bei beiden Kabeltypen der Hohlraum, bzw. der Gasgehalt, ein Mass für die Güte des Kabels. Nach dieser Feststellung möchte ich nun zu der Isolation im Elektromaschinenbau übergehen. Hier muss nebst einer guten elektrischen Isolation der stromführenden Wicklung gegen den geerdeten Metallkörper sowie auch zwischen einzelnen Wicklungsteilen grosse mechanische Festigkeit und Wärmebeständigkeit verlangt werden. Wäre es möglich, den Leiter als Kabel in den Eisenkörper zu legen, so wäre das Problem der Isolation der Wicklungen ausserhalb des Eisens, also an den Spulenköpfen gelöst, und wir könnten, wie in der Kabeltechnik, mit einem Endverschluss am Anfang und Ende der Wicklung auskommen.

Betrachten wir die Isolierung im Eisenkörper, also die Isolation, die in bezug auf das Kabel am meisten interessiert.

Um der aus wirtschaftlichen Gründen geforderten hohen Wärmebeständigkeit gerecht zu werden, wird für die Nutisolierung Glimmer verarbeitet. Dabei wurde früher Schellack als Klebemittel der Glimmerschicht verwendet. Die Schwächen des Schellacks sind bekannt. Er quillt bei relativ niederen Temperaturen auf und wird deshalb aus der Nutisolierung in axialer Richtung ausgestossen. Die Folge sind Hohlräume, ähnlich wie beim Massekabel. Ausserdem waren die Verluste dieser Isolation so hoch, dass sie die eigentliche Grenze der zulässigen Spannung infolge Wärmedurchschlag des Dielektrikums bestimmten. Immerhin genügte die Isolation bei kleineren und mittleren Spannungen vollauf.

Aus dem Bedürfnis, infolge der stets zunehmenden Energiekonzentration hohe Erzeugerspannungen herzustellen, wurde vor Jahren das Isolierproblem der Hochspannungsmaschinen einer gründlichen Neubearbeitung unterzogen. Das in der Folge entwickelte neue Isoliermaterial brachte grössere Wärmebeständigkeit, höhere mechanische Festigkeit und geringere dielektrische Verluste.

Bei den heute üblichen Wicklungstemperaturen könnten mit diesem Material, in bezug auf den Wärmedurchschlag, der weitgehend unabhängig von der Dicke der Isolierschicht ist, Generatorspannungen erreicht werden, die mit 50 kV und mehr weit über den Spannungen der heutigen Höchstspannungsgeneratoren liegen.

Die Durchschlagsfestigkeit des heute üblichen Isoliermaterials erreicht etwa 400 kV/cm. Sie genügt ohne weiteres den heute geforderten Prüfspannungen der Höchstspannungsgeneratoren und ist infolgedessen auch den auftretenden Spannungen bei nicht stationären Zuständen gewachsen.

Ich möchte noch kurz auf die Entladungen in Luftein schlüssen bei hohen Feldstärken eingehen. Wir haben gesehen, dass beim Kabel gerade auf diese besonders Rücksicht genommen werden muss. Ich darf ruhig behaupten, dass bei Höchstspannungsgeneratoren mit der heute verwendeten Isolation diesbezüglich keine Schwierigkeiten auftreten. Die Gründe sind folgende, das Aufquellen der neuen Isolation ist ganz gering. Glimmen in eventuell vorhandenen Luftschichten ist, wie aus den über ein Jahrzehnt alten Erfahrungen an Maschinen mit 16 000 V gegen Eisen hervorgeht, ohne Bedeutung. Die Amerikaner sind ebenfalls zu

gleichen Schlüssen gelangt, dass die geringen Hohlräume, die etwa noch auftreten können, nicht gefährlich sind und dass sie wohl mehr gefühlsmässig als unerwünscht betrachtet werden. Ich möchte noch ganz besonders hervorheben, dass die Glimmerschichten durch solche etwaige Entladungen überhaupt nicht angegriffen werden, währenddem die in der Kabelindustrie verwendeten Isolierstoffe durch Glimmen binnen kurzer Zeit ihre Isolierfähigkeit verlieren.

Noch etwas über den Endverschluss, um mit den Worten der Kabelleute zu sprechen. Der Eisenaustritt stellt die am schwersten zu lösende Aufgabe dar. Für Maschinen bis 36 kV konnte eine verbesserte Anordnung der sogenannten Glimmschutzmanschette mit gleichzeitiger Verwendung eines halbleitenden Lackanstriches den Forderungen in jeder Hinsicht genügen. Um die Schwierigkeiten zu zeigen, möchte ich nur erwähnen, dass einerseits die Abmessungen des Schutzes am Nutaustritt aus räumlichen Gründen möglichst klein werden müssen. Anderseits muss bei Maschinen grosser Leistung, bzw. Maschinen mit langem Eisenkörper, wegen der Längsausdehnung infolge Erwärmung des Kupferleiters ein, man könnte sagen flexiblem «Endverschluss» konstruiert werden.

Vergleichen wir nun zusammenfassend die Isolation des Höchstspannungskabels mit der Nutisolierung des Höchstspannungsgenerators von heute. Wir haben den Referaten der Herren Schneeberger und Borel entnehmen können, dass für Höchstspannungskabel von 150 kV die Durchschlagsfestigkeit bei 50 Hz und kurzzeitige Beanspruchung etwa 40...45 kV/mm, bei Beanspruchung über mehrere Stunden etwa 35...40 kV/mm ist, dass die höchste Betriebsfeldstärke fast $\frac{1}{3}$ des letztgenannten Wertes beträgt und zu etwa 11 kV/mm gewählt wird. Bei der vorerwähnten Generatorspannung von 36 kV sind die analogen Werte etwa 40 kV/mm bei kurzzeitiger Beanspruchung, 12 kV/mm bei Beanspruchung über mehrere Stunden in betriebswarmem Zustand und etwa 3,7 kV/mm im Normalbetrieb.

Das Verhältnis der Beanspruchung im Normalbetrieb zu der Durchschlagsfeldstärke bei Beanspruchung während mehreren Stunden ist, wie beim Höchstspannungskabel, also auch ca. ein Drittel. Beim Höchstspannungskabel liegt bei 50 Hz, also bei Betriebsfrequenz, die Durchschlagsfeldstärke bei kurzdauernder Beanspruchung kaum 14% über derjenigen bei Beanspruchungszeiten von mehreren Stunden, beim Höchstspannungsgenerator dagegen etwa 300%. Mit andern Worten: in bezug auf die Durchschlagsicherheit bei kurzzeitiger Beanspruchung ist die Generatornutisolierung bei den praktisch angewendeten Isolationsdicken der Kabelisolierung überlegen.

Und nun kann ich noch auf die anfänglich gestellten Fragen zurückkommen. Der Grund, dass die hohen in der Kabeltechnik erreichten Feldstärken nicht erreicht werden, liegt zum Teil bei den dielektrischen Verlusten des Materials. Nicht der Hauptbestandteil, Glimmer, ist die Ursache — er hat noch kleinere Verluste als das in der Kabeltechnik verwendete Papier. Der massgebende Teil ist das Bindemittel, das aus Gründen der hohen Klebfähigkeit gewählt werden musste. Die grössere Schwierigkeit bietet aber, wie schon erwähnt, der Nutaustritt, also der Endverschluss, weil demselben zu wenig Raum zur Verfügung steht, um das Problem mit einfachen Mitteln lösen zu können. Das Ideal wäre deshalb das in das Eisen gebettete Kabel. Die anzustrebende Lösung aber bleibt vorläufig weitgehende Potentialsteuerung am Nutaustritt.

Ich möchte noch einige Fragen an die Herren der Kabelindustrie richten, Fragen, die sich hauptsächlich aus den Überlegungen der Referate ergeben. Ist es bei den heutigen Oelkabeln möglich und wird davon Gebrauch gemacht, die Vergleichsmässigung der Feldstärke durch Papiere verschiedener Dielektrizitätskonstanten zu erreichen? Oder ist infolge der Durchdringung des Imprägniermittels durch alle Schichten kein nennenswerter Unterschied mehr vorhanden?

Die zweite Frage: es wurde erwähnt, dass die Betriebsfeldstärke der Oelkabel bei Wechselspannung zu etwa 11 kV/mm gewählt wird. Dagegen ist bekannt, dass bei Gleichspannung die dauernd zulässige Spannung bei gleicher Sicherheit etwa 35 kV/mm beträgt. Ist dieser Unterschied auf Oelverdrängung am Leiter bei Wechselspannung hoher Feldstärke zurückzuführen, oder sind die Verhältnisse bei Gleichspannung infolge Raumladung in Luft- oder Gasresten günstiger? Und die letzte Frage:

Bei Massekabeln wurde schon mehrmals sogenannte X-Wachsbildung konstatiert, die, wie behauptet wurde, auf Hohlräume bzw. Glimmen in denselben zurückzuführen ist. Dagegen wird oft eine Wachsbildung bei Oelkabeln bestritten. Wie aus Untersuchungen hervorgeht, ist X-Wachsbildung auch ohne Glimmen im Oel möglich, indem bei den hohen Feldstärken Polymerisationszentren entstehen. Sind nun die genannten Feldstärken von etwa 11 kV/mm beim Oelkabel auch im Hinblick auf diese Wachsbildung gewählt worden?

Herr A. van Gastel, A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden¹⁾: Herr Schneeberger gibt in seinem Hauptreferat an, dass in letzter Zeit Kabelanlagen als Ueberspannungsschutz sehr an Bedeutung gewonnen haben. Zu diesem Punkt ist nun folgendes zu bemerken:

Wird von einer Rechteckwelle als Ueberspannungswelle ausgegangen, dann baut sich die Welle nach dem Kabel stufenweise auf. Die Höhe und die Länge (Dauer) jeder Stufe können auf einfache Weise bestimmt werden. Bezeichnet u die Amplitude der Stosswelle, z_1 die Wellenimpedanz der Anlage vor, z_2 diejenige nach dem Kabel und z_k diejenige des Kabels selbst, dann dringt im Kabel eine Teilwelle ein mit der Amplitude

$$u \frac{2 z_k}{z_1 + z_k} \quad (1)$$

Am Ende des Kabels wird sie reflektiert und dabei steigt die Spannung auf den Wert

$$u \frac{2 z_k}{z_1 + z_k} \frac{2 z_2}{z_2 + z_k} \quad (2)$$

Es ist dies die Amplitude der ersten Stufe der Welle nach dem Kabel. Die Reflexion führt weiter zu einer im Kabel zurücklaufenden Welle mit Amplitude

$$u \frac{2 z_k}{z_1 + z_k} \frac{z_2 - z_k}{z_2 + z_k} \frac{z_1 - z_k}{z_1 + z_k} \quad (3)$$

Diese Teilwelle wird am Anfang des Kabels reflektiert und die nunmehr vorwärts laufende Welle hat die Amplitude

$$u \frac{2 z_k}{z_1 + z_k} \frac{z_2 - z_k}{z_2 + z_k} \frac{z_1 - z_k}{z_1 + z_k} \quad (4)$$

Ist diese Teilwelle am Ende des Kabels angelangt, so entsteht bei der Reflexion die zweite Stufe der austretenden Welle in der Grösse

$$u \frac{2 z_k}{z_1 + z_k} \frac{z_2 - z_k}{z_2 + z_k} \frac{z_1 - z_k}{z_1 + z_k} \frac{2 z_2}{z_2 + z_k} \quad (5)$$

Das Spiel geht in gleicher Weise weiter, und die nächste Stufe hat die Höhe

$$u \frac{2 z_k}{z_1 + z_k} \frac{2 z_2}{z_2 + z_k} \left(\frac{z_2 - z_k}{z_2 + z_k} \frac{z_1 - z_k}{z_1 + z_k} \right)^2 \quad (6)$$

Die Dauer aller Stufen ist dieselbe und entspricht der Zeit, die nötig ist zum Hin- und Herlaufen der Teilwellen über die Kabelstrecke, d. h. über die doppelte Streckenlänge. Wenn die Kabellänge mit l und die Wanderwellengeschwindigkeit im Kabel mit v bezeichnet wird, ist die Länge der Stufen $\frac{2l}{v}$. Damit lässt sich die Welle nach dem Kabel darstellen durch die Reihe

$$u \frac{2 z_k}{z_1 + z_k} \frac{2 z_2}{z_2 + z_k} \left\{ \begin{array}{l} 1 + \frac{z_2 - z_k}{z_2 + z_k} \frac{z_1 - z_k}{z_1 + z_k} + \\ t = 0 \dots \frac{2l}{v} \quad t = \frac{2l}{v} \dots \frac{4l}{v} \\ \left(\frac{z_2 - z_k}{z_2 + z_k} \frac{z_1 - z_k}{z_1 + z_k} \right)^2 + \dots \end{array} \right\} \quad (7)$$

$$t = \frac{4l}{v} \dots \frac{6l}{v}$$

Die Reihe konvergiert; die Stufen nehmen allmähhlich an Höhe ab. Am Schluss, nach genügend langer Zeit, er-

¹⁾ Dieser Beitrag wurde nachträglich schriftlich eingereicht.

reicht die Welle eine konstante Amplitude, deren Grösse gleich der Summe aller Stufen ist. Weil die Summe der Glieder der vorstehenden Reihe gleich u ist, besteht der Schutzwert des Kabels nur aus einer Umbildung — Abflachung — der Wellenfront (Fig. 1).

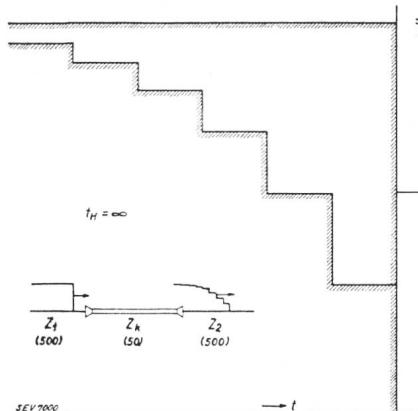


Fig. 1.

Die Verhältnisse ändern sich aber, wenn nicht von der Rechteckform für die Wanderwelle, sondern von einer der Wirklichkeit besser entsprechenden Form, der exponentiell abklingenden, ausgegangen wird. Obgleich sich auch jetzt die Welle nach dem Kabel stufenförmig aufbaut, besteht doch ein Unterschied, bedingt durch das Abklingen der einzelnen Stufen während der Laufzeit der Teilwellen im Kabel. Die am Ende des Kabels austretende Welle nimmt die Form nach Fig. 2 an. Sie kennzeichnet sich gegenüber der Wellenform nach Fig. 1 durch

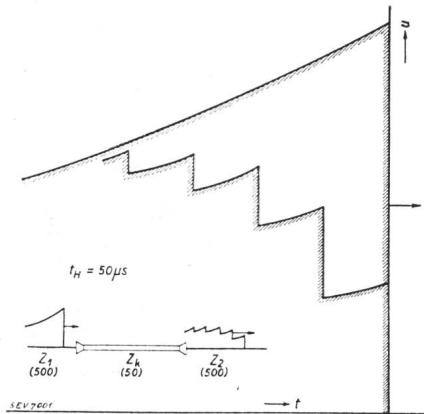


Fig. 2.

- a) eine grössere Abflachung der Wellenfront,
- b) eine kleinere Amplitude.

Der Schutzwert des Kabels ist also für die in Wirklichkeit auftretenden Wellen mit exponentiell abklingendem Rücken grösser als für theoretische Wellen rechteckiger Form. Er nimmt mit zunehmender Länge der Kabelstrecke zu, wie aus den Kurven der Fig. 3 hervorgeht. Ferner ist die Schutzwirkung kurzen Wellen ($t_H = 5 \mu s$) gegenüber erheblich grösser als für längere Wellen ($t_H = 50 \mu s$). Von Bedeutung sind noch zwei Punkte: Erstens kann die Amplitude der ankommenden Welle nicht unter einen bestimmten Betrag herabgesetzt werden. Dieser Betrag ist gegeben durch die Amplitude der ersten Stufe, somit bestimmt durch die Verhältnisse der Wellenwiderstände. Sind die Wellenwiderstände in der Reihenfolge Leitung-Kabel-Anlage $z_1 - z_k - z_2$ und ist die Amplitude der ankommenden Welle u , so ist dieser Grenzwert nach der Formel (2)

$$u = \frac{2 z_k}{z_1 + z_k} \frac{2 z_2}{z_2 + z_k}$$

Mit den Werten $z_1 = z_2 = 500 \text{ Ohm}$
 $z_k = 50 \text{ Ohm}$
ergibt sich als Grenze $0,33 u$.

Der zweite Punkt, welcher für die Beurteilung der Schutzwirkung des Kabels interessant ist, ist die Feststellung, dass die Front der ersten Teilwelle, die nach der Reflexion am Ende des Kabels die Amplitude $0,33 u$ besitzt, beim Durchlaufen der Kabelstrecke nicht geändert wird, sofern von der

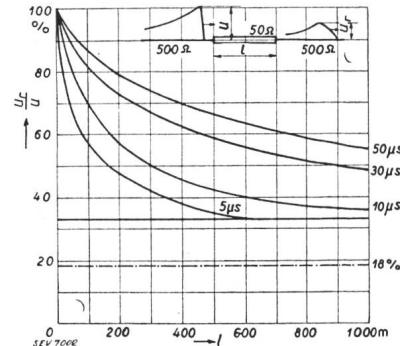


Fig. 3.

dämpfenden Wirkung durch die Verluste im Dielektrikum und im Bleimantel abgesehen wird.

Die Auffassung, die schützende Wirkung eines Kabels dürfe derjenigen eines Ableiters moderner Konstruktion gleichgestellt werden, ist nicht ganz richtig. Vor allem ist die Wirksamkeit des Ableiters wesentlich grösser, indem, fast unabhängig von der Höhe und Form der einlaufenden Wellen, die Restspannung sehr niedrig gehalten wird. So kann z. B. bei einer ankommenden Welle mit einer Amplitude

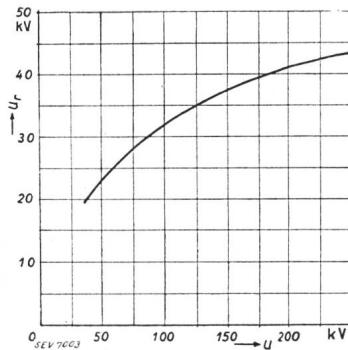


Fig. 4.

von etwa 200 kV mit einer Reduktion der Welle bis auf ca. 40 kV gerechnet werden, wenn zum Schutze der Anlage 11-kV-Resorbit-Ableiter eingebaut werden, und zudem bleibt bei Wellen und Amplituden über 200 kV die Restspannung praktisch konstant (Fig. 4). Solche Absenkungen sind mit Kabel überhaupt nicht erreichbar.

Schlussworte.

Herr P. E. Schneeberger, Hauptreferent: Zu den von Herrn Beldi gestellten Fragen ist folgendes zu bemerken:

Die Anwendung von Papieren verschiedener Dielektrizitätskonstanten ist besonders bei Massekabeln üblich. Dadurch ist eine etwas günstigere Spannungsverteilung im Dielektrikum möglich in dem Sinne, dass die innersten Lagen etwas entlastet werden. In diesem Zusammenhange wäre noch zu bemerken, dass bei Durchschlagsversuchen häufig eine Ansammlung von Glimmstellen in einem Abstand von ca. 2 mm vom Leiter konstatiert wird. Dies ist beim normalen Wärmedurchschlag auf die grössere Wärmeableitung des Leiters zurückzuführen, beim reinen Ionisationsdurchschlag bei sehr kurzen Beanspruchungszeiten aber spielen noch andere Faktoren eine Rolle. Bei der Oelkabelfabrikation verzichtet man auf eine Abstufung der Isolation. Es sind hier in erster Linie die absolute Metallsalzfreiheit sowie die Oeldurchlässigkeit der Papiere von wesentlicher Bedeutung.

Zur Frage der Beanspruchung von Gleichspannungskabeln mag erwähnt werden, dass die Durchschlagsfestigkeit der

Kabelisolation für Gleichspannung ungefähr derjenigen für Stoßbeanspruchungen entspricht, d. h. ca. 80 bis 100 kV/mm. Deswegen wird, mit gleicher Sicherheit wie bei normalen Wechselstromkabeln, eine Gleichspannungsbeanspruchung von zwei- bis dreifacher Höhe erlaubt werden können. Es darf aber nicht unterlassen werden, darauf hinzuweisen, dass die Spannungsverteilung bei Gleichspannung eine wesentlich andere ist. Die im Hinblick auf die Probleme der Höchstspannungs-Gleichstrom-Uebertragungen in Fluss gekommenen Versuche werden in nächster Zeit auch hier wertvolle Aklärung bringen.

Die Wachsbildung in Hochspannungs-Massekabeln ist tatsächlich, wie Herr Beldi richtig bemerkt hat, eine noch nicht abgeklärte Angelegenheit. Diese Erscheinung wurde in erster Linie in den Vereinigten Staaten konstatiert, wo aber die Kabel allgemein mit ganz wesentlich höhern Betriebstemperaturen betrieben werden. In der Schweiz sind diese Wachsbildungen sehr selten aufgetreten. Selbst an den 66-kV-Kabeln am Gotthard, die vor bald 20 Jahren verlegt wurden und die, an den heutigen Fabrikaten gemessen, sehr hohe dielektrische Verluste aufwiesen, waren Wachsbildungen kaum bemerkbar. Auf jeden Fall ist die Zusammensetzung der Tränkmassen und die Qualität der verwendeten Oele und Harze von Bedeutung. Bei den nach dem Pirelli-System fabrizierten Oelkabeln wurden bisher keine Wachsbildungen konstatiert. Die Kontrolle umfasst für diesen Kabeltyp ungefähr 2000 km bei Betriebsspannungen bis 220 kV.

Herr A. von Gastel befasst sich in seinen Ausführungen speziell mit dem Kabel als Ueberspannungsschutz. Seinen theoretischen Ueberlegungen möchte ich keineswegs entgegentreten, aber ich glaube doch, dass meine Auffassung der schützenden Wirkung der Kabel richtig ist. Ich bin mir bewusst, dass die Entwicklung der Ableiter in letzter Zeit ganz wesentliche Fortschritte gemacht hat und es jetzt zuverlässige Typen gibt. Aber wesentlich ist doch eine Absenkung der Wanderwelle auf einen für die zu schützende Anlage unschädlichen Wert, ohne irgendwelches Risiko. Einer 11-kV-Anlage wird bei vorgeschalteter Kabelkapazität von nur 0,05 μ F sicher nichts mehr passieren. Auf jeden Fall haben wir bis heute keinen einzigen konstatierten Wanderwellen-Ueberschlag an Anlagen, welche durch richtig angepasste Kabel geschützt waren. Es würde zu weit führen, hier noch eingehend auf die hohe Betriebssicherheit der Kabel gegen Ueberspannungen sowie die sonstigen Vorteile der Kabeleinführungen bei Werken und Unterstationen einzutreten.

M. J. Borel, Conférencier principal: Il m'est facile de répondre aux trois questions posées par M. Beldi aux fabricants de câbles, en me basant pour deux d'entre elles sur mon exposé dont je ferai même une citation textuelle:

1. «On peut considérer que l'isolant d'un câble à huile est constitué par deux éléments: le papier imprégné et l'huile contenue dans les déjoints du papier (voir fig. 5). Les propriétés électriques de ces deux éléments peuvent être caractérisées sommairement de la façon suivante:

	rigidité	constante
	dielektrique	dielektrique
Papier imprégné	60 kV/mm	3,6
Huile	20 kV/mm	2,2

L'huile est donc l'élément le plus faible de l'isolant du câble et, par surcroît, celui qui, par sa plus faible constante diélectrique, est le plus contraint puisqu'il est placé en série avec du papier imprégné possédant une constante diélectrique plus élevée ...»

Si donc, en vue d'améliorer la valeur de l'isolant d'un câble à huile (ou d'un câble à matière) on augmente la constante du papier, on diminue la contrainte électrique du papier imprégné pour augmenter celle de l'huile. Autrement dit, on soulage celui des deux éléments qui est le plus fort et l'on augmente la charge du plus faible, ce qui va à fin contraire du but envisagé.

2. La raison de l'amélioration de la tenue du papier imprégné d'huile soumis à une tension continue par rapport à sa tenue en courant alternatif est dûe surtout, si non uniquement, à la constitution même des molécules de l'huile et non à la présence de gaz résiduels, ceci du moins pour les câbles à huile confectionnés avec le soin voulu.

3. Dans un câble à huile fabriqué, posé et monté avec le soin voulu il ne se forme pas de cire. Qu'il me suffise d'en donner pour preuve les seuls résultats officiels que je puisse citer du concours d'Arnhem, à savoir les résultats relatifs au câble à huile imprégné après pose de Cortaillod. Ce câble a fonctionné pendant plus d'une année à une tension de 150 kV entre cuivre et plomb, ce qui correspond à un gradient maximum de 17,3 kV/mm. Après cet essai qui fut doublé d'un sévère essai d'échauffement, le câble, tant au point de vue de l'essai significatif de la mesure des pertes diélectriques qu'à celui de l'examen de l'état des papiers imprégnés, était pratiquement identique au câble vierge. Aucune altération de l'huile ne s'était produite.

Der Vorsitzende dankt allen Diskussionsrednern für ihre wertvollen Beiträge und schliesst die Versammlung um 17 Uhr 30.

Blindleistung und Magnetisierungsarbeit.

Von F. J. Rutgers, Kairo.

621.3.013 : 621.3.016.25

Es werden einige Ueberlegungen über das Wesen der Blindleistung gemacht und es wird gezeigt, dass die zur Erzeugung eines sinusförmigen Magnetfeldes erforderliche Blindleistung gleich ist dem Produkte aus der Magnetisierungsarbeit, welche zur einmaligen Erzeugung des Flusses von 0 auf Φ_{\max} erforderlich ist, und der Kreisfrequenz $2\pi f$. Diese einfache Beziehung wird auf folgende Beispiele angewendet: Ringspule ohne und mit Eisen und Transistor, wobei eine Kontrolle durch Messung die Brauchbarkeit der Rechnungsmethode ergibt.

I. Einleitung.

Oft wird die Frage gestellt: Was ist eigentlich Blindleistung?

Als Produkt eines Stromes und einer Spannung hat Blindleistung die physikalische «Dimension» einer wirklichen Leistung. Bei einer wirklichen Leistung sind aber Strom (Wirkkomponente) und Spannung, die miteinander multipliziert werden, in Phase. Bei der Blindleistung stehen Strom (Blindkomponente) und Spannung aufeinander senkrecht, und man frägt sich, ob man sich unter

L'auteur apporte quelques considérations sur la nature de la puissance réactive et montre que la puissance réactive nécessaire pour engendrer un champ magnétique sinusoïdal est égale au produit du travail de magnétisation nécessaire pour amener une fois le flux de 0 à Φ_{\max} par la pulsation $2\pi f$. Il applique ensuite, à titre d'exemple, cette relation simple à la bobine en tore avec et sans fer, ainsi qu'au transformateur. Les mesures effectuées confirment la justesse de cette méthode de calcul.

diesem Produkt etwas vorstellen kann. Zunächst wohl kaum. Wir haben aber immerhin etwas Ähnliches in der Mechanik. Das Produkt einer Kraft mit der Länge des Weges in der Richtung der Kraft ist eine wirkliche Arbeit (Dimension: $l m t^{-2} \cdot l = l^2 m t^{-2}$). Das Produkt einer Kraft mit einer Länge senkrecht zur Kraft ist ein Drehmoment und hat formal die gleiche Dimension wie eine Arbeit. Arbeit dividiert durch Zeit gibt Leistung ($l^2 m t^{-2} \cdot t^{-1} = l^2 m t^{-3}$) und Drehmoment multipliziert mit Winkelgeschwindigkeit (Dimension: t^{-1}) gibt ebenfalls Leistung!