

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 29 (1938)
Heft: 10

Artikel: Allgemeine Kabeltechnik
Autor: Schneeberger, P.E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059376>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 28.04.2025

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 ♦ Telefon 51.742
Postcheck-Konto VIII 8481

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

XXIX. Jahrgang

N^o 10

Mittwoch, 11. Mai 1938

Kabeltechnik.

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

621.315.2

Die Bieler Diskussionsversammlung, an der das ganze Gebiet der Kabeltechnik zur Sprache kam, war von etwa 150 Mitgliedern und Gästen besucht. Sie stand unter dem Vorsitz des Präsidenten des SEV, Herrn Dr. h. c. M. Schiesser, Delegierter des Verwaltungsrates der A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden. Im folgenden veröffentlichen wir die drei Hauptreferate, nämlich:

a) *Allgemeine Kabeltechnik, von P. E. Schneeberger, Kabelwerke Brugg A.-G.;*

b) *Hoch- und Höchstspannungskabel, von J. Borel, Dr ès sc., Sté d'exploitation des Câbles électriques système Berthoud-Borel, Cortaillod;*

c) *Kabelmesstechnik, von E. Foretay, Câbleries et Tréfileries de Cossonay.*

Die weiteren Beiträge und die Diskussionsvoten veröffentlichen wir später.

Allgemeine Kabeltechnik.

Von P. E. Schneeberger, Brugg.

Es werden die Grundfragen des Baues, der Verlegung und des Betriebes der Starkstromkabel dargelegt. Dabei werden auch die Gleichstromkabel und die Hochfrequenzkabel gestreift.

L'auteur expose les questions fondamentales de la construction, de la pose et de l'exploitation des câbles électriques à courant fort. Il dit également quelques mots des câbles à courant continu et des câbles à haute fréquence.

Wenn versucht werden soll, ein allgemeines Bild über den heutigen Stand der Kabeltechnik zu geben, so ist zu bedenken, dass in der Kabelindustrie neben der allgemeinen Elektro- und Maschinentechnik ebenso Physik und Chemie vertreten sind. Neben den mannigfachen Spezialgebieten der Starkstromtechnik findet man die gesamte Schwachstromwissenschaft sowohl im gewöhnlichen Telephonkabel, als auch im modernsten Hochfrequenzkabel angewandt. Im Gebiete der Kabelmesstechnik kommt vom einfachsten bis zum kompliziertesten ausserordentlich vieles zur Anwendung, von der Weathstonschen Brücke bis zum Kathodenstrahloszillographen und vom Trockenelement bis zum Höchstspannungstransformator und der Stossanlage. Diese kurze Einführung mag erklären, dass es nur in geringem Masse möglich ist, in der zur Verfügung stehenden Zeit alle Fragen der Kabeltechnik auch nur auszugsweise darzustellen oder zu streifen.

Von diesen Betrachtungen seien überdies von vornherein ausgeschlossen die sämtlichen Fragen der submarinen und transatlantischen Kabel, soweit wenigstens, als es sich dabei nicht um Bleikabel zur Unterwasserverlegung handelt. Die erste grosse und ausgedehnte Kategorie weist nämlich insofern einen von allen übrigen Kabeltypen prinzipiell abweichenden Aufbau auf, als diese Unter-

seekabel keinen Bleimantel zum Schutze der Isoliermaterialien gegen Feuchtigkeit haben. Die aus Guttapercha bestehende Isolation dieser Telegraphenkabel ist an und für sich schon feuchtigkeitsicher und erhält so, lediglich zur Verhütung von mechanischen Verletzungen und zur Aufnahme der Zugbeanspruchungen im Kabel, eine oder mehrere metallische Bewehrungen, die aber nicht wasserdicht zu sein brauchen. Ebenso fallen hier die sämtlichen isolierten Drähte und Kabel für Inneninstallationen und ähnliche Verwendungszwecke, welche ebenfalls nicht mit Bleimantel versehen sind, ausser Betracht. Im Rahmen der heutigen Tagung soll auch das Telephonkabel nicht behandelt werden, umso weniger, als Prof. Dr. Forrer an der Diskussionsversammlung vom 23. November 1935 in Olten eingehend darauf eingetreten ist¹⁾.

Es handelt sich danach also ausschliesslich um alle übrigen elektrischen Kabel mit Bleimantel, welche zur unterirdischen Verlegung, sei es direkt im Erdboden, in Kanälen und dergleichen, oder auch unter Wasser, geeignet sind.

Die Bleipresse.

Die Grundlage zur Konstruktion der Bleikabel und zur ganzen weiteren Entwicklung der Kabel-

¹⁾ Bull. SEV 1936, Nr. 20, S. 557.

technik war erst gegeben durch die Erfindung der Bleipresse, mit welcher es möglich ist, die isolierten Leitungen in beliebigen Längen mit einem vollständig dichten Bleimantel zu umschliessen.

Wohl waren schon vorher verschiedene Versuche gemacht worden, isolierte Drähte und Kabel vor Feuchtigkeit zu schützen, z. B. durch Einziehen in Bleirohre von grösserem lichten Durchmesser, welche dann erst nachträglich durch Kaliber auf die den isolierten Leitern entsprechenden Durchmesser heruntergezogen wurden, doch kam dieses sehr unvollkommene Verfahren begreiflicherweise nie zu ausschlaggebender praktischer Bedeutung. Der Erfolg trat erst ein, als es gelang, auf die isolierten Drähte und Kabel mittelst einer Bleirohrpresse in der noch heute üblichen Weise einen dicht anschliessenden Bleimantel direkt aufzuziehen. Und wie dies in der Technik zuweilen vorkommt, falls sich das Bedürfnis zur Lösung eines Problems in den Interessentenkreisen immer mehr geltend macht, wurde die entsprechende Lösung auch im vorliegenden Falle von zwei verschiedenen Erfindern, wohl auch ganz unabhängig voneinander, an zwei getrennten Orten in kurzen Zeitabständen gefunden. So wurden, nach den ersten, aus den Jahren 1877 und 1878 stammenden Ideen von François Borel und Werner von Siemens im Jahre 1879 die ersten Bleikabelpressen gebaut. Diese waren einzylindrig und das Kabel ging in vertikaler Richtung, sei es von oben nach unten oder von unten nach oben, durch die Presse. Bleipressen in dieser Anordnung werden heute nicht mehr ausgeführt.

Bereits im Jahre 1881 folgte dann die zuerst in Wien erstellte Bleikabelpresse von Huber in der von Krupp weiter entwickelten Ausführung. Es ist dies eine liegende Presse mit zwei seitlich angeordneten Presszylindern. Das Kabel geht horizontal durch diese Presse.

Bald erlangten aber, neben dieser Bleipresse von liegender Bauart, auch die stehenden Pressen, und zwar in viel grösseren Typen als früher, wieder vermehrte Bedeutung. Im Gegensatz zu den ersten Borelschen und Siemensschen Bleipressen, bei denen das Kabel oben oder unten in die Presse eintrat und vertikal durch diese ging, läuft es bei allen neuen Konstruktionen von stehenden Pressen nun auch in horizontaler Richtung durch, wie bei der liegenden Huberpresse.

Aufbau des Kabels.

Das Starkstromkabel ist im allgemeinen aus vier prinzipiellen Bauteilen konstruiert und zwar:

1. dem Leiter;
2. dem Dielektrikum;
3. dem Bleimantel;
4. dem Bleimantelschutz.

Der Leiter wird normalerweise aus Kupfer oder Aluminium verseilt, damit das fertige Kabel möglichst flexibel und handlich wird. Der Verseilvorgang ist abhängig vom Leiterquerschnitt und u. U. von der Verwendungsart des Kabels. In verschiedenen Lagen werden die einzelnen Kupferdrähte

entweder zu runden oder sektorförmigen Leitern zusammen verseilt. Diese Verseilung erfolgt auf speziellen Verseilmaschinen.

Nach erfolgter Leiterfabrikation wird die Isolation aufgebracht, welche bis heute speziell für Hochspannungskabel ausschliesslich aus Papier be-

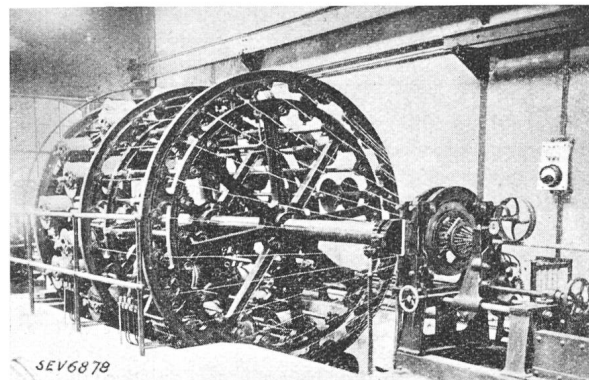


Fig. 1.
Kabelverseilmachine.

steht, einem Papier allerdings, an dessen Qualität ganz spezielle Anforderungen gestellt werden. In den meisten Fabriken wird das vor dem Gebrauch auf die günstigste Breite geschnittene Papier mit Tangentialspinnern auf den Leiter gebracht. Hier ist in erster Linie danach zu trachten, dass das Papier sorgfältig, falten- und möglichst lückenlos auf den Leiter aufgebracht wird, damit ein homogenes Dielektrikum entsteht. Dies ist insbesondere für

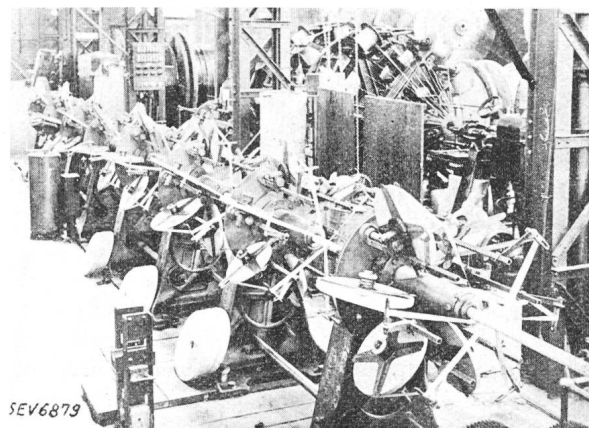


Fig. 2.
Tangentialspinner zum Herstellen der Papierisolation.

Hochspannungskabel nötig, wo Isolationsdicken bis 24 mm (bei 220-kV-Kabeln) ausgeführt werden müssen.

Ist der Leiter isoliert, so wird er, sofern es sich um Mehrleiterkabel handelt, auf speziellen Leiter-Verseilmaschinen mit andern zum Drei- oder Mehrleiterkabel verseilt.

Nach diesem Fabrikationsvorgang ist ein Kabel zum Trockenprozess und zur Imprägnierung bereit. Diese beiden Vorgänge sind für die Betriebssicherheit des Kabels massgebend und bedürfen deswegen der grössten Aufmerksamkeit des Fabrikanten und der besten Einrichtungen. Die Trocknung und Im-

prägnierung erfolgt in besondern Vakuumgefässen, die mit allen neuzeitlichen Registrierinstrumenten ausgerüstet sind. Diese Gefässe erlauben die Anwendung von Vakuum und Druck, sowie Erwärmung

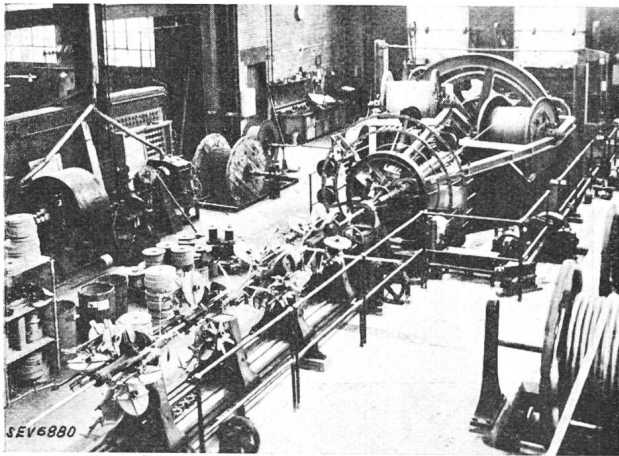


Fig. 3.
Maschine zum Verseilen von Mehrleiterkabeln.

und künstliche Abkühlung. Auch die Fabrikation der modernen Höchstspannungskabel, wie Druck- und Oelkabel, bedarf wenigstens teilweise dieser Einrichtungen. Das fertig imprägnierte Kabel wird nun durch einen Bleimantel gegen alle äussern Einflüsse mechanischer und chemischer Art abge-

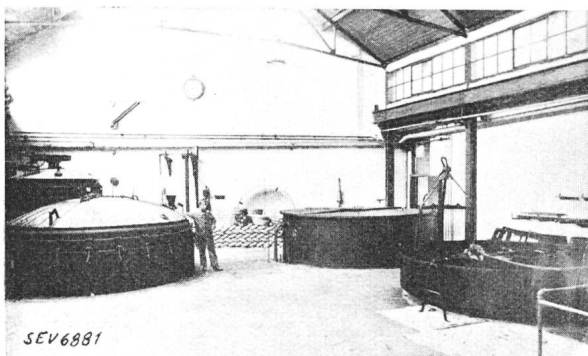


Fig. 4.
Vakuumgefässe.

schlossen. Die zur Herstellung dieser Bleimäntel dienende Presse darf als die interessanteste Maschine der Kabelindustrie betrachtet werden.

Der Bleimantel.

Ueber die Arbeitsweise der Bleikabelpresse sei folgendes erwähnt: Das Blei wird in besondern, mit

Kohle, mit Oel oder elektrisch geheizten Schmelzkesseln geschmolzen, lediglich, um es in den Rezipienten der Presse einfüllen zu können. Dort erstarrt es sogleich wieder und wird dann noch weiter geheizt, aber nur auf eine weit unter dem Schmelzpunkt liegende Temperatur, um es für die Pressung möglichst plastisch zu erhalten und dessen Binden im Innern der Presse zum Bleirohr zu erleichtern. Dabei muss anderseits genau darauf geachtet werden, dass das Blei im Rezipienten nicht auf eine zu hohe, dem flüssigen Zustand zu nahe Temperatur gebracht wird, da es sonst bei dem gewaltigen Druck, unter welchen es im Rezipienten und Pressekopf steht, explosionsartig aus der Pressemündung ausspritzen kann.

Das Blei wird also in festem Zustand, als ein im Innern der Presse durch Dorn und Matrice geform-

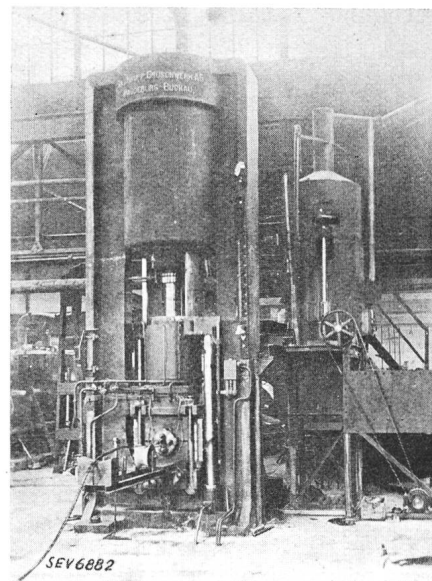


Fig. 6.
Vertikalbleipresse.

tes, auf dem Kabel satt aufliegendes Bleirohr ausgepresst. Durch den Vorschub des Bleirohres wird das durch den hohlen Dorn durchgeführte Kabel mitgenommen. Der oder die Pressestempel werden durch hydraulischen Druck mit einer in der Regel dreizylindrigen Kolbenpumpe angetrieben.

Bei den liegenden *Huber-Pressen* von Krupp beträgt der Wasserdruck maximal 300 kg/cm^2 und, entsprechend dem Verhältnis von 11 : 1 der Fläche des Kolbens im Wasserzylinder zu derjenigen des Pressestempels, der spezifische Druck auf dem

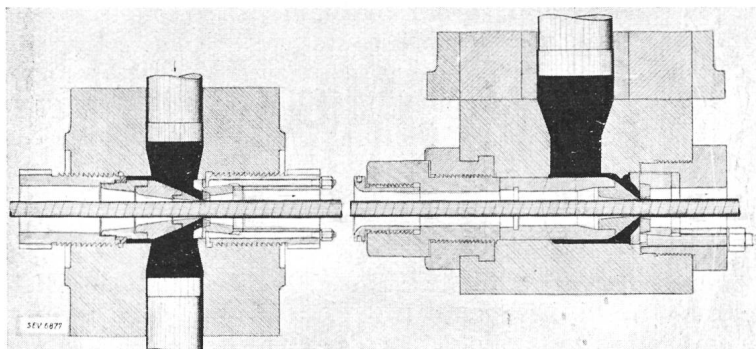
Fig. 5.

Links:

Horizontalbleipresse, System Huber,
Horizontalschnitt.

Rechts:

Vertikalbleipresse, System Krupp,
Vertikalschnitt.



Blei im Bleirezipienten rund 3300 kg/cm^2 . Bei der stehenden *Krupp-Press* dagegen beträgt der Wasserdruck maximal 400 kg/cm^2 und bei einem Druckflächenverhältnis von 14 : 1 der spezifische Druck auf dem Blei 5600 kg/cm^2 . Entsprechend den Flächen des Pressestempels beläuft sich so der maximale Totaldruck bei der liegenden Huberpresse auf rund 1 150 000 kg und bei der stehenden Krupp-Press auf rund 1 800 000 kg.

Die nutzbare Füllung, d. h. das Quantum Blei, welches in einem Pressvorgang ausgepresst werden kann, variiert bei den Huber-Pressen zwischen 150 bis 200 kg und bei den stehenden Krupp-Pressen von 300 bis 1200 kg.

Mit den stets zunehmenden Durchmessern der mit Blei zu umpressenden Kabel wurde auch die Frage der *Dichtigkeit* und der *Druckfestigkeit* der Bleimäntel immer wichtiger. Dabei spielen die sogenannten Nähte im Bleimantel eine besondere Rolle. Dadurch, dass sich das Blei im Innern des

Rezipienten oder des Pressekopfes von zwei verschiedenen Seiten her zum Bleirohr vereinigt, und sich zwischen der Pressung des Pressestempels und dem Austritt des Bleies aus der Presse ein Richtungswechsel vollzieht, können sich, wenn die Bindung im Innern der Bleikammer nicht vollkommen ist, sogenannte Längsnähte im Bleimantel ausbilden.

Ein wichtiges Moment für die Erzeugung fehlerfreier Bleimäntel besteht ferner auch in der genauen Einhaltung des richtigen Druckes und der richtigen Geschwindigkeit der Presse, sowie gleichzeitig auch der günstigsten Bleitemperatur. Dies wird einerseits erreicht durch sorgfältige Regulierung des hydraulischen Druckes und möglichst vorsichtiges Anfahren nach jeder neuen Füllung, sowie

durch genaue Ausregulierung des gleichmässigen Vorschubes beider Pressestempel bei den liegenden Pressen. Ferner ist die richtige Heizung des Bleirezipienten sowie bei der stehenden Presse auch des Pressekopfes von ausschlaggebender Bedeutung. Die Temperatur des Bleis im Rezipienten kann variieren zwischen minimal 100° bis maximal 140° und soll im Pressekopf zwischen 140° und 180° und bei mit Zinn legiertem Blei bis maximal 210° betragen.

Das Problem, auf diesen Pressen wirklich nahtlose und damit möglichst drucksichere Kabelbleimäntel herzustellen, ist in letzter Zeit durch die gesteigerten Anforderungen, welche in dieser Beziehung für die modernen Kabeltypen gestellt werden, noch aktueller geworden. Speziell widerstandsfähige Bleimäntel werden nötig für die Neukonstruktionen der Oel- und Druckkabel für besonders hohe

Betriebsspannungen. Zur Erhöhung der Härte, und damit der Tragfähigkeit und Festigkeit der Bleimäntel, kann eine Beimengung von 1 bis 3 % Zinn gegeben werden. Es wird dies speziell bei Schwachstromkabeln mit Papierlufttraumisolierung angewendet, welche wegen der innern Hohlräume gegen äussern Druck besonders empfindlich sind; ferner auch bei Einleiter-Hochspannungskabeln, die ohne Eisenarmatur bleiben müssen. Die Beifügung des genannten Prozentsatzes von Zinn zum Bleimantel hat den weitem grossen Vorteil, dass dadurch die interkristalline Korrosion des Bleis ganz bedeutend vermindert wird.

Den äussern Schutz des Bleimantels, der ja mechanisch nicht sehr stark und leider auch den chemischen und elektrischen Korrosionen unterworfen

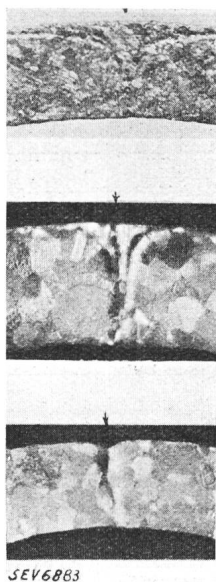


Fig. 7.
Längsnähte
im Bleimantel.

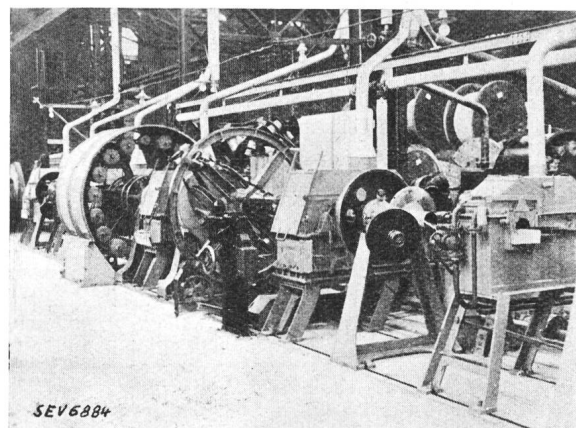


Fig. 8.
Maschine zum Aufbringen der Juteumspinnung
und der Armatur.

ist, übernehmen spezielle *Schutzmittel*. Ein wichtiges Kapitel ist der Schutz des Bleimantels gegen die drei hauptsächlichsten Angreifer, nicht ganz richtig Korrosionen genannt. Man unterscheidet im besondern

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

Der erste Fall kann auftreten, wenn Blei lange Zeit *Vibrationen* ausgesetzt ist. Bei Brückenpfeilern, Bahnunterführungen, Luftkabeln usw., treten diese interkristallinen Korrosionen auf. Das so korrodierte Blei zerfällt in kleine Teile und das ganze Metall sieht wie auskristallisiert aus. Wie bereits gesagt, werden Bleimäntel mit einem Zusatz von 1...3 % Zinn oder geringern Mengen Antimon gegen diesen Zerfall wesentlich widerstandsfähiger.

Die *rein chemische Korrosion* ist eine Folge der Einwirkung von Ammoniak, Sauerstoff, Kohlendioxyd, Kalk und Chloriden, welche im Erdboden immer vorhanden sind, auf den ungeschützten Bleimantel. Das Korrosionsprodukt ist bei dieser Art Korrosion immer basisches Bleikarbonat oder Bleioxyd. Eine sorgfältige Bitumierung des Bleimantels mit bitumierten Papieren und Jutefäden ver-

hütet im normalen Erdreich die Zerstörung des Bleis mit grosser Sicherheit.

Die *elektrolytische Korrosion* kommt dann zustande, wenn vagabundierende Gleichströme an irgend einer Stelle aus dem Erdreich in den Bleimantel eintreten und hierauf den metallischen Mantel als Leiter benützen. An bestimmten Orten verlässt der Strom den Bleimantel wieder. Dabei tritt Elektrolyse auf, die die Oberfläche des Bleimantels chemisch angreift. Diese Angriffe treten je nach Art des aktiven Stromes und der allgemeinen Disposition normalerweise an der Austrittsstelle auf; es bildet sich Bleichlorid, Bleisulfat, Bleisuperoxyd u. a. Das Vorkommen von Bleisuperoxyd ist bei dieser Art Korrosion besonders charakteristisch. Die Stromstärke, die von den Korrosionsspezialisten als nicht mehr gefährlich betrachtet wird, beträgt, je nach verschiedenen Landesvorschriften, $0,2 \dots 0,8 \text{ mA/dm}^2$ ²⁾. Der ideale Schutz gegen die elektrolytische Korrosion wäre unzweifelhaft eine absolute Isolation des Bleimantels gegen Erde. Da dies nicht ohne sehr grosse Schwierigkeiten möglich ist, werden in den letzten Jahren umfangreiche Arbeiten über Massnahmen zur Korrosionsverhütung durchgeführt. Neben den Studien für die Kabelnetze trugen auch diejenigen für die Gas- und Wasserleitungen viel zur Abklärung dieser Fragen bei. Die in letzter Zeit entwickelten Schutzmassnahmen, z. B. Elektronenfilter³⁾, Gutta-perchaschutz, Isoliercompound und andere Behandlungen, verdienen alles Interesse und die nun angesetzten praktischen Untersuchungen werden in absehbarer Zeit die Eignung der verschiedenen Verfahren abklären.

Das Dielektrikum.

Bei der Uebertragung elektrischer Energie erfolgt eine dauernde Umwandlung der Energie elektrischer Felder in solche magnetischer Felder und umgekehrt; dabei wird in einem nicht verlustfreien Dielektrikum durch intermolekulare Vorgänge und auch durch den Jouleschen Effekt Wärme erzeugt, welche bei entsprechender Steigerung zur Zerstörung führen kann.

Betrachtet man in einem Einleiterkabel die elektrische *Feldverteilung*, so findet man, dass die Feldstärke im Gegensatz zum Plattenkondensator nicht homogen ist. Sie nimmt nämlich in der Richtung Leiter-Bleimantel stetig ab, d. h. der Spannungsgradient wird mit wachsendem Radius kleiner und zwar so, dass am Leiter die höchste und am Bleimantel die geringste elektrische Beanspruchung vorhanden ist. Diese Verteilung lässt sich im Einleiterkabel sehr eindeutig berechnen, im Gegensatz zum Mehrleiterkabel, wo die Verhältnisse wesentlich komplizierter sind. Diese Berechnung der Spannungsgradienten erlaubt im allgemeinen, auch die elektrische Festigkeit eines Kabels zu erfassen unter der Voraussetzung, dass das Dielektrikum bis

zum Durchschlag seine elektrische Feldverteilung beibehält. Die elektrische Festigkeit, bzw. Sicherheit ergibt sich dann aus der Betriebsfeldstärke und der experimentell bestimmten Durchbruchfeldstärke.

Diese Berechnungen sind in erster Linie für Kabel höherer Betriebsspannung massgebend, da für

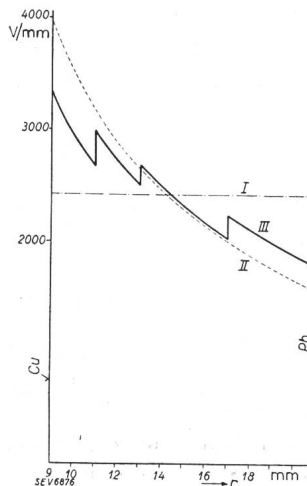


Fig. 9.

Theoretische Kurven der dielektrischen Beanspruchung, Kabel $1 \cdot 180 \text{ mm}^2$, Isolation 12 mm .

$U = 50/\sqrt{3} \text{ kV}$. Cu Kupferleiter. Pb Bleimantel. I ideale Beanspruchung. II Beanspruchung bei homogener Isolation. III Beanspruchung bei 4fach abgestufter Isolation.

Niederspannungskabel die Isolierung aus mechanischen Gründen schon reichlich gewählt werden muss. Hochspannungskabel sind bei normaler, sorgfältiger Fabrikation erfahrungsgemäss betriebssicher, wenn, unter Berücksichtigung der für Massenkabel nötigen thermischen Voraussetzungen, eine Spannungsgradient von ca. 4 kV/mm nicht überschritten wird.

Die theoretische Betrachtung der Feldgradienten lässt erkennen, dass es möglich ist, die ungleiche Feldverteilung durch eine Aenderung der Dielektrizitätskonstanten der einzelnen Isolierschichten zu verbessern. Dies geschieht durch Aufbringen von Isolierpapieren verschiedener Dielektrizitätskonstanten. Alle diese theoretischen Ueberlegungen ha-

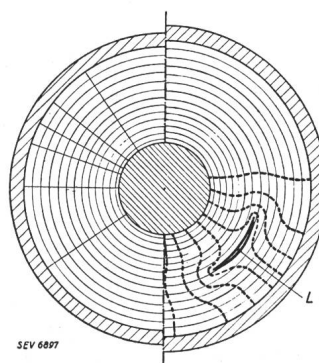


Fig. 10.

Prinzip d. Luftblasenbildung in der Kabelisolation.

Links: Kabelschnitt vor der Belastung. Rechts: Kabelschnitt nach der Belastung. L Luftblase.

sieren natürlich auf einem homogenen Dielektrikum, d. h. einer Isolationsschicht, die in allen ihren Teilen gleiche Zusammensetzung hat. Wie verhält es sich nun damit eigentlich im Kabel? Wenn man sich vor Augen hält, wie die Kabelisolation hergestellt wird, so sieht man, dass in erster Linie zwei Baustoffe sich vereinigen müssen, das Papier und die Tränkmasse. Dass diese Vereinigung unzweifelhaft möglichst innig sein muss, ist verständlich, aber es ist schwierig, sie so zu gestalten,

²⁾ Vergl. die Tätigkeit der Korrosionskommission, in der ausser dem SEV und der PTT auch die Gas- und Wasserfachmänner und die Bahnen vertreten sind und mitwirken.

³⁾ Bull. SEV 1937, Nr. 3, S. 54.

dass die in beiden Stoffen vorhandenen Gaseinschlüsse und deren Feuchtigkeit vollständig eliminiert werden. Befindet sich an irgend einer Stelle im Dielektrikum ein Hohlraum oder eine Gasblase, so kann unter Umständen sogar eine solche Blase an der Peripherie der Isolation, also am Bleimantel, eine Feldstärke aufweisen, die grösser ist als diejenige am Leiter. Diese Hohlräume müssen nun für die Ionisationserscheinungen bei Hochspannungskabeln in erster Linie verantwortlich gemacht werden und deren weitgehende Eliminierung ist der Fortschritt, der bei der Fabrikation dieser Kabel gemacht wurde. Die Hohlräume können während der Fabrikation und im Betriebe entstehen.

Da ein absolutes Vakuum in den Imprägnierkesseln nicht erreicht werden kann, bleiben immer kleine Luftreste zwischen den Papierlagen oder im Papier selbst zurück. Ebenso wird die Tränkmass immer wieder, trotz aller Vorsichtsmassregeln, *Lufteinschlüsse* behalten. Speziell in Gürtelkabeln, wo die Isolationspapiere nicht dicht aufgebracht werden können, ist die Ionisationsgefahr immer grösser als bei Kabeln mit rein zylindrischem Dielektrikum.

Im Betriebe entstehen die Hohlräume in erster Linie infolge der Wärmewirkung des Uebertragungsstromes, welche ein Ausdehnen des Bleimantels bewirkt, der wegen seiner Unelastizität nach erfolgter Ausdehnung nicht mehr in seine Anfangsstellung zurückkehrt. Da der Querschnitt des Kabeldielektrikums dadurch grösser wird, ohne dass aber mehr Füllmaterial zur Verfügung steht, werden zwangsläufig Hohlräume entstehen müssen, die bei erhöhten Spannungen eine Verschlechterung des Kabels bedingen. Die Erkenntnisse dieser elektrischen und mechanischen Vorgänge beim Hochspannungskabel ebneten dem Kabeltechniker auch den Weg zu Verbesserung der Fabrikationsmethoden und der Baustoffe und führten zu den modernen Oel-, Druck- und Gaskabeln.

Das Papier.

Den Grundstoff eines Kabeldielektrikums bildet immer noch Papier. Während vor einigen Jahren Manilapapiere (Hader) verwendet worden sind, hat doch in immer grösserer Masse das Zellulosepapier in die Isoliertechnik Eingang gefunden. Voraussetzung ist natürlich, dass man das Papier entsprechend sorgfältig behandelt und zwar von der Papiermaschine bis zum fertigen Kabel. Zur Verwendung kommen in der Kabelfabrikation spezielle Natronzellulose-Papiere von ganz bestimmten Mahlgraden. Neben der mechanischen Festigkeit, die durch die maschinelle Isolierung der Leiter bedingt ist, sind Aufnahmefähigkeit für den Imprägnierstoff und Stabilität im fertigen Zustand Hauptbedingungen. Selbstverständlich dürfen im Papierstoff keine metallischen Verunreinigungen oder anorganischen Metallsalze vorhanden sein. Die Homogenität eines Dielektrikums ist der ausschlaggebende Faktor für die günstigsten Arbeitsbedingungen im elektrischen Feld. Deshalb wird das Kabelpapier aus Zellulose, also vorgekochten Holzfasern, herge-

stellt im Gegensatz zum Holzschliff, wo durch reine mechanische Zertrümmerung das Ausgangsmaterial zur Papierfabrikation geschaffen wird.

Da die Papiere während des Trocken- und Imprägnierprozesses ziemlich hohen Temperaturen ausgesetzt werden, sind auch betreffend Hitzebeständigkeit gewisse Bestimmungen nötig. Ein äusserst wichtiges Charakteristikum ist die *Durchlässigkeit*. Betrachtet man das Papier unter dem Mi-

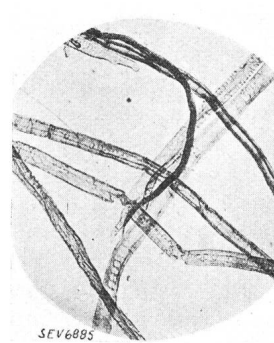


Fig. 11.
Nadelholzstoff.

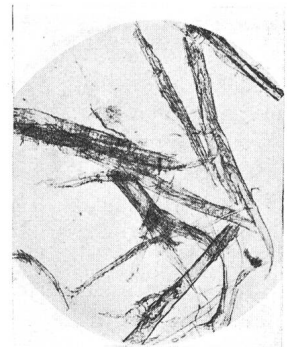


Fig. 12.
Weisser Holzschliff von
Nadelholz.

kroskop, so findet man eine Zusammenstellung von Fasern, die regellos zueinander liegen und eine Unmasse von Kanälen bilden. Je stärker ein Papier gepresst oder, wie der Fachausdruck lautet, kalandriert ist, desto kleiner sind diese Kanäle, und desto grösser ist seine Dielektrizitätskonstante. Diese Kanäle gestatten dem Imprägnierungsmittel das Wandern im Papier. Daraus ergibt sich ohne weiteres, dass diese Eigenschaft des Kabelpapiers von eminenter Wichtigkeit ist. Die Durchlässigkeit wird deshalb auch regelmässig kontrolliert und zwar mit dem Porosimeter von L. Emanuelli.

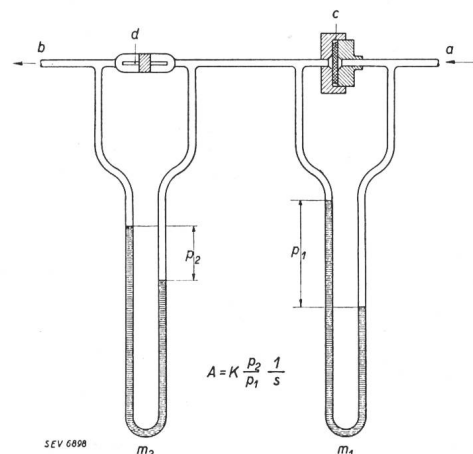


Fig. 13.
Porosimeter nach Emanuelli.

Sind nun die Papiere durch die verschiedenen Proben auserlesen, so werden sie für die Kabelfabrikation freigegeben. Während des Fabrikationsprozesses wird das Papier auf den Leiter gewickelt und hernach weiter behandelt. In erster Linie muss sämtliche Feuchtigkeit entfernt werden, damit das Papier für das Isolieröl aufnahmefähig wird und als Isolator dienen kann. Feuchtigkeits-

einschlüsse werden speziell in hochbeanspruchten Kabeln immer eine gefährliche Rolle spielen. Papier enthält unter normalen Verhältnissen 3... 10 % Wasser bei einer Raumfeuchtigkeit von normalerweise 50... 70 %. Ein absolut trockenes Blatt Papier wird in etwa 2 Stunden diesen Sättigungsgrad wieder erreichen. Es geht daraus hervor, dass das Imprägnieren des Kabels ohne Zutritt von atmosphärischer, also normalerweise feuchter Luft vor sich gehen muss.

Imprägnierungsmassen.

Das normal angewandte Material zur Imprägnierung von Massekabeln ist Mineralöl, welchem bei Massekabeln in der Regel ein gewisser Prozentsatz Harz zugesetzt wird.

Eine der wichtigsten Daten eines Kabel-Isolieröles ist die *Viskosität* des Oeles, weil der Imprägnierungsvorgang davon sehr abhängig ist. Ein weiteres wichtiges Charakteristikum dieser Oele ist der *Wärmeausdehnungskoeffizient*, der besonders für die Betriebsstabilität eines Kabels von Wichtigkeit ist. Der Harzzusatz darf keine wesentliche Änderung des Ausdehnungskoeffizienten zur Folge haben.

Von einschneidender Bedeutung, besonders bei den modernen Oelkabeln, ist der *Gasabsorptionskoeffizient*. Wenn ein Gas in Verbindung mit Oel

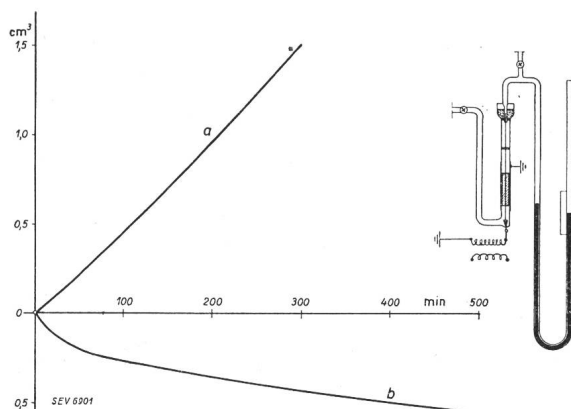


Fig. 14.

Messung der Gasabsorption von zwei verschiedenen Oelsorten, a und b.

tritt, so löst sich u. U. ein Teil dieses Gases im Oel. Wie bereits erwähnt, haben alle Gaseinschlüsse auf die Arbeit des Dielektrikums einen ungünstigen Einfluss und es ist immer vorteilhaft, Oele zu verwenden, die ein geringes Gasaufnahmevermögen haben, vorhandenes Gas leicht abgeben oder, wie dies beim Oelkabel z. T. geschieht, bestimmte Gase ganz zu absorbieren vermögen.

Natürlich sind die *elektrischen Eigenschaften* eines Isolieröles von wesentlicher Bedeutung. Der elektrische Widerstand, bzw. das Isoliervermögen dieser Oele ist bei niedrigen Temperaturen sehr hoch, nimmt aber bei hohen Temperaturen rasch ab.

Eine weitere wichtige Erscheinung ist der Einfluss der Metalle auf das Isoliermaterial; umfassende Versuche der Detroit Edison Cie. führten in letzter Zeit zu ganz interessanten Schlüssen, aus de-

nen sich für die Imprägnierung der Kabel neue Gesichtspunkte ergeben.

Es würde zu weit führen, alle Diskussionen und Mutmassungen theoretischer und rein praktischer Art über den Wert und die Zweckmässigkeit der Messung der dielektrischen Verluste von Isolierölen

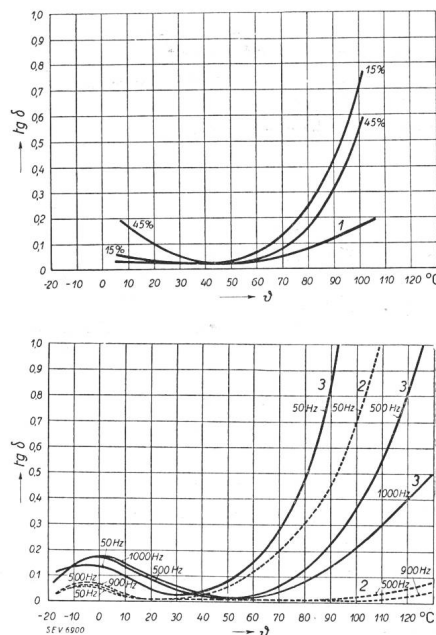


Fig. 15.

Oben: Einfluss des Harzzusatzes auf die dielektrischen Verluste eines Kabelöles.

Unten: Einfluss von Temperatur und Frequenz auf die dielektrischen Verluste eines Kabelöles.

1 Oelkabel. 2 Imprägnieröl. 3 Masse.

auch nur zu streifen und ich begnüge mich, an Hand einer Kurve den Einfluss von Temperatur und Frequenz auf die dielektrischen Verluste eines Oeles zu zeigen. Ferner zeigt eine zweite Kurve bei gleichen Grundbedingungen (Frequenz und Temperatur) den Einfluss des Harzzusatzes.

Imprägniertes Papier.

Massgebend für die Güte des Kabels ist das fertig imprägnierte Papier. Bereits während des Trocken- und Imprägnierungsvorganges werden die

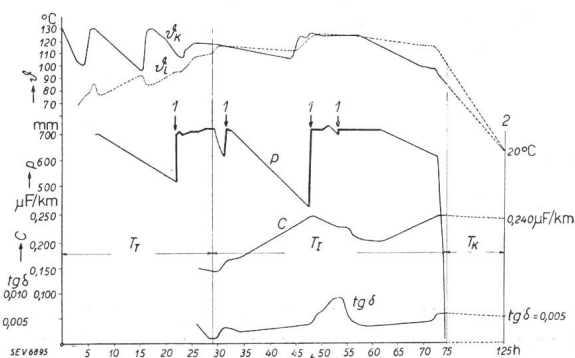


Fig. 16.

Imprägnierungsprozess eines Hochspannungskabels. ϑ_K Kesseltemperatur, ϑ_L Leitertemperatur, p Kesselvakuuum, C Kabelkapazität, $\text{tg } \delta$ Verlustwinkel, T_I Trockenzzeit, T_I Imprägnierungszeit, T_K Kühlzeit.

Bei 1 ist die Pumpe in Betrieb. Bei 2, also nach 125 h, ist die Imprägnierung beendet, und das Kabel kommt in die Bleipresse, bei folgenden Daten: Presstemperatur 20° C, Endkapazität 0,24 $\mu\text{F/km}$ und $\text{tg } \delta$ 0,005.

Eigenschaften des Dielektrikums verfolgt und die nötigen elektrischen Eigenschaften des Kabels vor dem Pressen kontrolliert. Die dielektrischen Verluste und die Isolationswerte geben ziemlich einwandfrei Auskunft über den Trockenzustand und den Füllfaktor des Kabels.

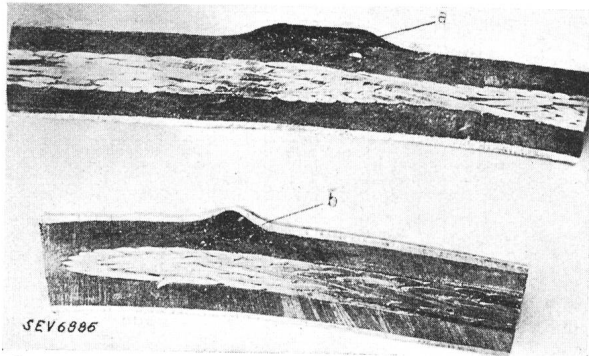


Fig. 17.
Durchschläge.

Eine weitere Probe, die besonders am fertigen Kabel gemacht wird, ist die Durchschlagsprobe, die entweder als Zeitprobe, welche zum Wärmedurchschlag führt, oder als Momentanprüfung, die den kurzzeitigen, bzw. den Ionisationsdurchschlag gibt. In letzter Zeit werden diese Untersuchungen auch mit Stossanlagen mit genau definierter Stossweite durchgeführt.

Die Kabeltypen.

Die bis jetzt behandelten Thesen sind für alle Typen von Starkstromkabeln massgebend und nur in der praktischen Ausführung verschieden. Das-

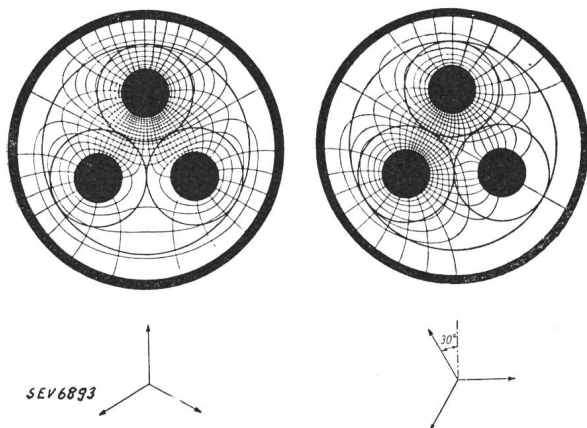


Fig. 19.
Feldlinien im Gürtelkabel.

selbe gilt für die verschiedenen Konstruktionstypen der Kabel. Man unterscheidet in mechanischer Hinsicht Ein- und Mehrleiterkabel und bei den letztern Kabel mit Rund- oder Sektorleitern. Im elektrostatischen Aufbau findet man Kabel mit Gürtel- oder geschwächter Gürtelisolierung und Kabel mit statischer Abschirmung, das sog. Höchststädterkabel, oder auch das Dreimantelkabel.

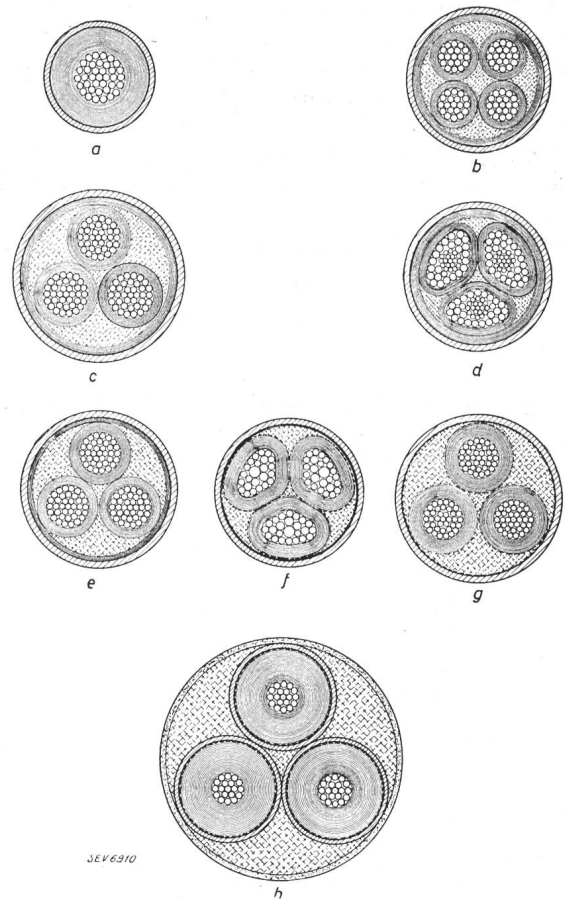


Fig. 18.

Kabeltypen, Maßstab 3 : 1.

- a 1·240 mm², 16 kV.
- b 4·100 mm², 11 kV Gürtelkabel.
- c 3·185 mm², 12 kV Gürtelkabel.
- d 3·185 mm², 12 kV Sektorgürtelkabel.
- e 3·150 mm², 15 kV reduzierter Gürtel.
- f 3·150 mm², 12 kV Sektorkabel mit Höchststädterschutz.
- g 3·150 mm², 15 kV Rundkabel mit Höchststädterschutz.
- h 3·(1·95 mm²), 50 kV Dreimantelkabel.

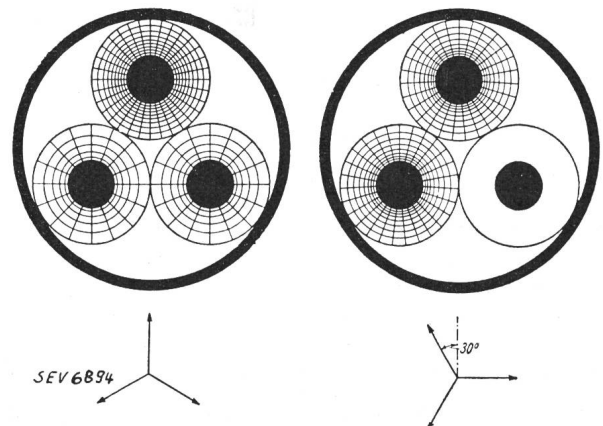


Fig. 20.

Feldlinien im Dreileiterkabel mit Höchststädterschutz.

Das Kabel im Betrieb.

Die bisherigen Ausführungen bezogen sich grossenteils auf die rein elektrischen Probleme des Kabels, also speziell auf den Träger des elektrischen Feldes. Von ebensolcher Wichtigkeit, und mit den elektrischen Vorgängen in wärmetechnischer Hinsicht verknüpft, sind die Wirkungen der übertragenen Energie.

Die Uebertragungsverluste dürfen aus wirtschaftlichen Gründen und, mit Rücksicht auf die Erwärmung und damit die Betriebssicherheit des Kabels, nicht über eine bestimmte Höhe hinausgehen. Die zweckmässige Wahl des Leiterquerschnittes und der Verlegungsverhältnisse sichert in weiten Grenzen einen vernünftigen und wirtschaftlichen Kabelbetrieb.

Die *Erwärmung eines Kabels* setzt sich aus drei Komponenten zusammen, nämlich aus:

1. den Stromwärmeverlusten im Leiter durch den Belastungsstrom,
2. den Energieverlusten im Bleimantel,
3. den dielektrischen Verlusten in der Isolation.

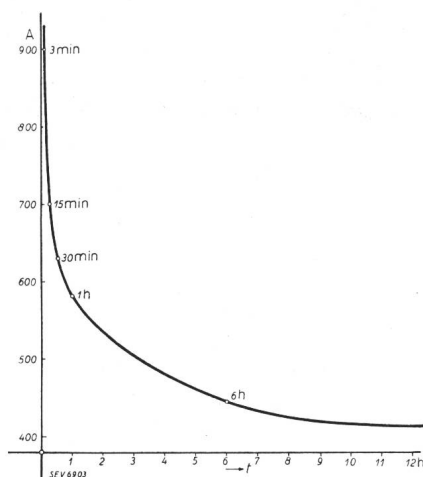


Fig. 21.

Belastungsmöglichkeiten eines 50-kV-Kabels, $1 \cdot 240 \text{ mm}^2$.

Der Hauptanteil der Wärmeerzeugung fällt natürlich auf die reinen Verluste im Leiter. Durch das Dielektrikum muss die erzeugte Wärme abfliessen und, entsprechend dem spez. Wärmewiderstand der Isolation (etwa $600 \frac{\text{W}}{\text{cm}^0 \text{C}}$), erhält man die Wärmeableitungskurve. Zwischen Kupfer und Blei besteht immer ein Temperaturgefälle, das bei normaler Verlegungsart (im Erdboden direkt oder in Kabelsteinen mit ausgefüllten Zwischenräumen) und Dauer-Nennbelastung $10 \dots 20^\circ \text{C}$ beträgt, je nach Isolationsstärke. An Hand eines umfangreichen Versuchsmaterials und durch experimentell erhärtete mathematische Behandlung der Belastungsprobleme lassen sich heute die zusätzlichen Erwärmungen einer Kabelanlage als Funktion der übertragenen Energie ziemlich genau vorausberechnen.

Die an zweiter Stelle angeführten Energieverluste im Kabelmantel sind eine Folge der durch den Kabelstrom im Bleimantel induzierten Spannungen. Sie haben aber nur Bedeutung in Anlagen mit Einleiterkabeln. Durch eine Eisenarmierung würden bei diesen Kabeln die Verluste im Mantel ganz enorm gesteigert, so dass eine wirtschaftliche Energieübertragung nicht mehr möglich wäre. Man kann aber durch Unterteilung des magnetischen Kreises der Kabelarmatur diese zusätzlichen Mantelverluste auf ein erträgliches Mass herabsetzen. Die einfachste Lösung ist in diesem Fall der Auf-

bau eines Dreibleimantelkabels. Die Grösse der Bleimantelströme ist ferner abhängig von der Verlegungsart der einzelnen Kabel zueinander⁴⁾.

Der dielektrische Verlust spielt in rein wirtschaftlich-wärmetechnischer Hinsicht für den Nor-

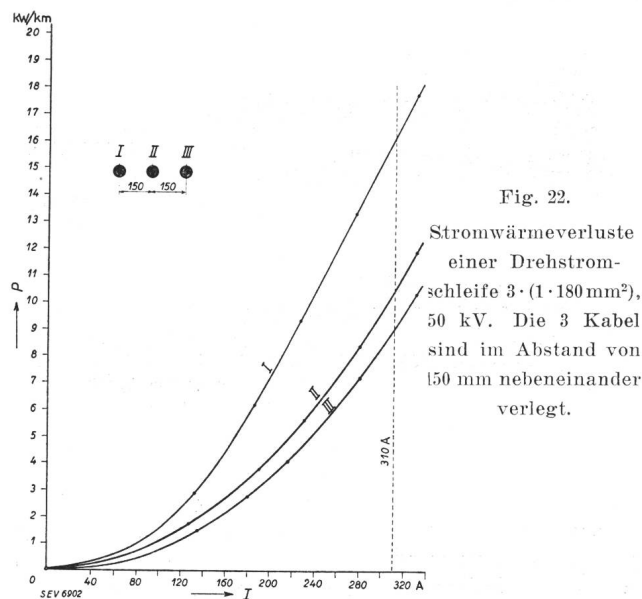


Fig. 22.

Stromwärmeverluste einer Drehstromschleife $3 \cdot (1 \cdot 180 \text{ mm}^2)$, 50 kV. Die 3 Kabel sind im Abstand von 150 mm nebeneinander verlegt.

malbetrieb keine Rolle und er kann im allgemeinen vernachlässigt werden.

Im Rahmen dieses Abschnittes wäre noch ein Wort über die *Kurzschlusswirkungen* auf ein Kabelnetz zu sagen. Diese Wirkungen sind thermischer oder mechanischer Art.

Betrachtet man die thermische Wirkung eines Kurzschlusses auf ein Kabel, so findet man, dass die Erwärmung eines Leiters nicht nur von der Grösse des Stromes, sondern ebenso sehr von der

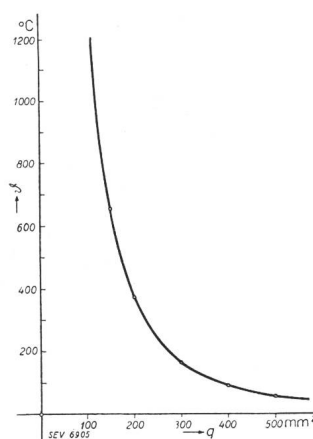


Fig. 23.

Wärmewirkung eines Kurzschlußstromes von 50 000 A Effektivwert in einer Sekunde bei verschiedenen Querschnitten q .

Dauer seines Einwirkens abhängig ist. Ein Kabel mit einem Querschnitt von 240 mm^2 erträgt normalerweise bei etwa 12 mm Isolation eine Dauerlast von 400 A. Berechnet man auf Grund dieser Normallast die Belastungen und Zeiten, so findet man eine Kurve, welche die Möglichkeiten der Ueberlastung ohne Beschädigung des Kabels ergibt. Wenn auch die Dauer eines Kurzschlußstromes bis zur Abschaltung nur wenige Sekunden oder

4) Bull. SEV 1927, Nr. 11, S. 707.

Bruchteile davon dauert, so genügt die Zeit in gewissen Fällen doch, um schwerwiegende Beschädigungen durch zu starke Erwärmung zu verursachen. Die Versuche haben gezeigt, dass ein elektrisch hochbeanspruchtes Kabel bereits bei Temperaturen

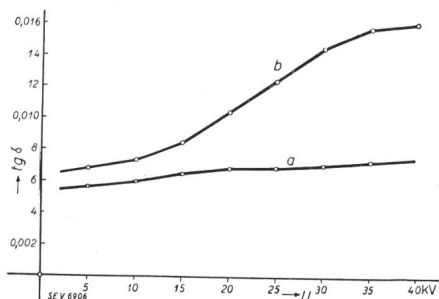


Fig. 24.

Dielektrischer Verlustwinkel eines 15-kV-Kabels. *a* vor der Erhitzung, *b* nach der Erhitzung auf 200° C, 3 Sekunden.

von 200° C in sehr kurzen Zeiten Veränderungen im Dielektrikum zeigt. Die durch Kurzschlüsse bedingte Ueberhitzung des Leiters sollte während

1 s	nicht über	200° C
3 s	«	180° C
5 s	«	150° C

betragen.

Auch die elektrodynamischen Kräfte sind, bei grossen Kurzschlußströmen, für die Kabeltechnik von Bedeutung. Bei diesem Vorgang erfolgt eine Umsetzung von elektrischer Energie in magnetische und zwangsläufig in mechanische Arbeit. Diese Arbeit hat zwei Kraftwirkungen zur Folge und zwar die eine zwischen Leitern und die andere in der Längsrichtung des Leiters. Die zweite wirkt auf den

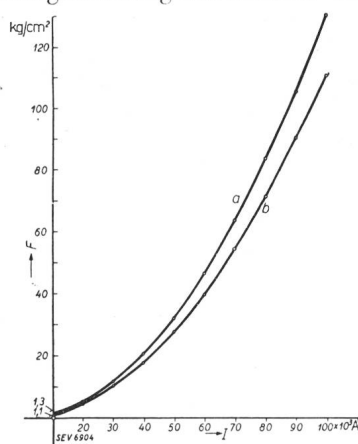


Fig. 25..

Elektrodynamische Wirkungen auf ein 10-kV-Kabel, 3.95 mm². *a* Gürtelkabel. *b* Höchststädterkabel.

Leiter zusammenziehend, im Gegensatz zur ersten, welche die Leiter eines Kabelsystems auseinander zwingen will. Da diese schweren Kurzschlüsse besonders in 6...10 kV-Anlagen auftreten, wo man mit Vorliebe noch Gürtelkabel verwendet, die für diese mechanische Beanspruchung am empfindlichsten sind, ist etwelche Vorsicht am Platze. Immerhin hat man es auf einfache Weise in der Hand, durch geeignete Armierung die Gefahr einer elektrodynamischen Kabelzerstörung zu bannen.

In letzter Zeit haben *Kabelanlagen als Ueberspannungsschutz* sehr an Bedeutung gewonnen, um so mehr, als sie eine hohe Sicherheit gegen Stossbeanspruchungen aufweisen. Die hauptsächlichste Aufgabe eines Ueberspannungsschutzes ist, die Höhe und Steilheit einer Welle auf einen unschädlichen Wert zu bringen. Die Wirkung eines Kabels, das

als Kondensator aufgefasst werden kann, auf eine Wanderwelle lässt sich kurz so darstellen: Die von einer Freileitung kommende Welle sinkt beim Eintritt in ein Kabel, infolge des im Verhältnis zum Wellenwiderstand der Freileitung geringen

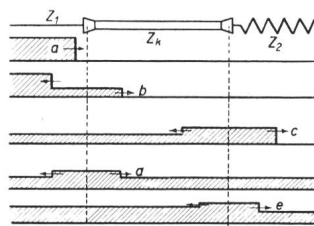
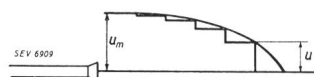


Fig. 26.

Aufbau des Spannungsanstieges an einem Kabelkondensator



Wellenwiderstandes des Kabels, stark zusammen. Der Wellenwiderstand eines Kabels variiert zwischen 20 und 60 Ω, im Gegensatz zur Freileitung mit etwa 300...500 Ω, je nach der Dielektrizitätskonstante und den geometrischen Daten eines Kabels.

Ein einfaches Beispiel soll die Wirkung eines Kabels als Verbindung zwischen einer Freileitung und einem Transformator zeigen: Am Eingang zum Kabel sinkt die Welle zusammen; nur ein Teil der Stoßspannung tritt in das Kabel ein. Die Reflexion auf die Freileitung ist infolge des Abbaues am Kabel natürlich ebenfalls geringer als bei offenem Freileitungsende. Am Ausgang des Kabels ergibt sich

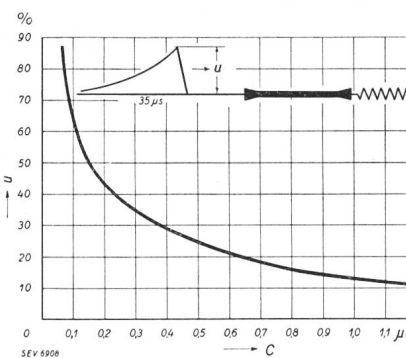


Fig. 27.

Reduktion der Wanderwellenhöhe in Funktion der Kabelkapazität.

eine Spannungserhöhung als Folge des wesentlich höhern Wellenwiderstandes des Transformators. In diesem Moment wird auch ein Wellenteil in das Kabel zurück reflektiert. Dieses Spiel wiederholt sich und die dadurch erzeugten Wellenköpfe treffen auf die Transformatorwicklung. Die Wellenköpfe werden aber immer kleiner, so dass die Beanspruchung der Wicklung theoretisch treppenartig aussieht. Die Breite dieser Treppenstufen ist eine direkte Funktion der Kabellänge und entspricht der doppelten Kabellänge. An Hand der Versuchs-, bzw. der Betriebsergebnisse, ist es nun möglich, den Kabelschutz zu berechnen und für jede Betriebsspannung und Leitungsart die geeignete Kabelanlage zu bauen. Die von den Anlageteilen ertragene Stoßspannung ergibt den Ausgangspunkt für die Berechnung der Schutzkapazität. Die Grösse der zu

wählenden Kapazität lässt sich aus der Wellenlänge und dem Verhältnis aus der maximal zulässigen und maximal auftretenden Wellenhöhe bestimmen. Entsprechend der Freileitungskapazität, welche zur Aufnahme der reduzierten Stoßspannung nötig wäre, wird dann die Kabelkapazität errechnet.

Aus vorliegenden Gründen stellt sich nun die Frage, ob die modernen Hochspannungskabel in der Lage sind, diesen hohen Ansprüchen, welche zur Verwendung als Ueberspannungsschutz erforderlich sind, gerecht zu werden. Die in den letzten Jahren ausgeführten Versuche ergaben eindeutige Anhaltspunkte über die elektrische Festigkeit der Kabelisolation bei Stossbeanspruchungen. Die Durchschlagsversuche wurden mit Normalwellen von etwa $1 \mu\text{s}$ Steilheit und einer Halbwertszeit von $30 \dots 50 \mu\text{s}$ mit positiver und negativer Polarität durchgeführt.

Die Durchschlagsfestigkeit liegt bei Stossbeanspruchung zwischen etwa 80 kV/mm bei positivem und etwa 100 kV/mm bei negativem Stoss und zwar bei Masse- und Oelkabeln. Für Betriebsfrequenz (Größenordnung 50 Per./s) findet man für

	Massekabel kV/mm	Druck- u. Oelkabel kV/mm
Dauer-Beanspruchung (während Stunden)	15 ... 20	35 ... 40
Minuten-Beanspruchung	30 ... 35	40 ... 45

Aus den Versuchsergebnissen lässt sich der Schluss ziehen, dass bei der Bearbeitung von Kabelprojekten die spezifische Beanspruchung nicht nur auf die normale Betriebsspannung zu beziehen ist, sondern dass die Stossbeanspruchung ebenso sehr zu berücksichtigen ist.

Gleichstromkabel.

In letzter Zeit werden nun durch die Entwicklung der Mutatoren für hohe Spannungen die Uebertragungsmöglichkeiten für sehr hohe Gleichspannungen aktuell. Wir haben bereits seit einigen Jahren Versuche durchgeführt, um die Eignung des Hochspannungskabels für die neue Leistungsübertragung zu prüfen. Grundsätzlich wird sich der Aufbau des Kabels für sehr hohe Gleichspannungen nicht ändern. Die Durchschlagsfestigkeit ist bei Gleichspannung ungefähr 2,5mal höher als bei gleicher effektiver Wechselspannung von 50 Hertz. Es hat sich aber herausgestellt, dass die Spannungsbeanspruchung eine Funktion des Wärmegefälles zwischen Leiter und Bleimantel ist. Die Berechnung dieser Spannungsbeanspruchung kann natürlich nicht mehr nach der O'Gormanschen Formel

$$\frac{dU}{dr} = \frac{U}{r \cdot \lg \frac{r^2}{r}}$$

erfolgen, sondern nach der Formel

$$\frac{dU}{dr} = \frac{U}{r \varepsilon \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r \varepsilon}}$$

Man ersieht daraus, dass die Dielektrizitätskonstante hier für die Berechnung eine Rolle spielt

und da diese wärmeabhängig ist, das Temperaturgefälle im Dielektrikum von Bedeutung ist. Als Funktion der Leitertemperatur gibt Fig. 28 die spezifische Beanspruchung eines 50-kV-Kables.

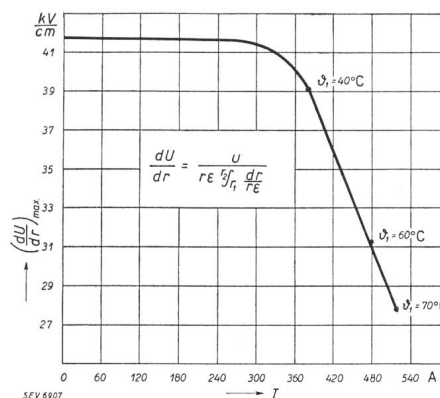


Fig. 28.
Maximaler Spannungsgradient für Gleichstromkabel bei verschiedenen Belastungen.

Die bisherigen Versuche ergeben heute schon eindeutig, dass es ohne besondere Schwierigkeiten möglich sein wird, Gleichspannungen von 600 kV mit zwei Kabeln zu übertragen. Da die Ableitungsverluste bei Gleichspannung für Porzellanisolatoren sehr hoch sind, dürfte das Kabel das wirtschaftlichste und sicherste Gleichstrom-Uebertragungssystem werden.

Kabelverlegung.

Wie aus den bisherigen Ausführungen hervorgeht, bedingt die Fabrikation der Kabel grosse Sorgfalt und gewissenhafte Arbeit. Wie wird aber manchmal ein Kabel während der Verlegung behandelt! Die Tatsache, dass bei sorgfältig verlegten und montierten Kabelanlagen sozusagen keine Defekte auftreten, spricht dafür, dass jede Vorsicht bei Kabelarbeiten sich reichlich bezahlt macht. Die Ver-

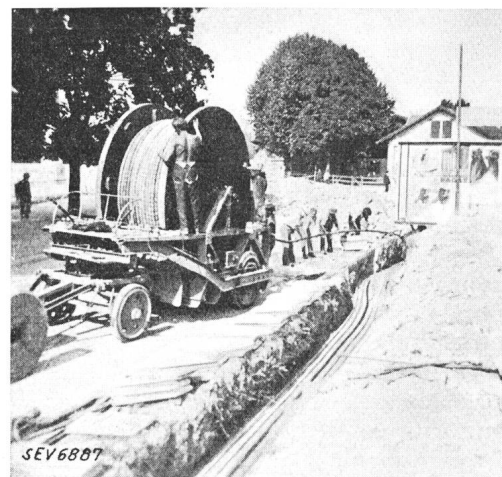


Fig. 29.
Abrollen eines Kabels in den Kabelgraben.

legung grösserer Längen erfordert entsprechende Vorbereitungen, genügend Personal und Material. Die Spezialverlegewagen und die nun allgemein verwendeten Verlegerollen erlauben mit relativ wenig Personal, ganz grosse Kabelgewichte zu verlegen, unter absoluter Schonung der Kabel. Die ideale Verlegung vom Kabelwagen aus kann leider nur in wenigen Fällen durchgeführt werden. Je

nach Terrainverhältnissen und Kabeltyp können, wie schon bemerkt, bereits bei der Bestellung der Kabel Vorbereitungen, die ein gefahrloses Verlegen garantieren, getroffen werden. Häufig wird auch der Fehler gemacht, dass Kabel für jede Betriebsspannung bei tiefen Temperaturen verlegt werden. Es darf nie vergessen werden, dass die einzelnen Papierschichten eine gewisse Biegsamkeit bedingen. Bei gefrorenen Kabeln ist Bruchgefahr der Isolation vorhanden und die Folgen augenscheinlich: Die Homogenität der Isolation wird gestört und die Betriebssicherheit herabgesetzt.

Ein weiterer Punkt, der ebensohäufig übersehen wird, ist die Einhaltung gewisser Krümmungsradien. Dazu ist zu bemerken, dass für 50-kV-Kabel der minimale Radius 100 cm, also ungefähr das 20fache des Durchmessers über Blei betragen soll. Je nach der Betriebsspannung, also entsprechend der Isolationsstärke, soll der Krümmungsradius den 15fachen Wert des Kabeldurch-



Fig. 30.
Kabeltransport auf Rollen im Kabelgraben.

messers über Blei nicht unterschreiten. Dieser Ansatz bezieht sich auf Niederspannungskabel und ist, wie bemerkt, je nach Betriebsspannung bis zum 20fachen Wert zu steigern.

Bei besonderer Armierung der Kabel geben die rein motorisch durchgeführten Verlegungen ebenfalls sehr gute Resultate und zwar bei Telefon- und Starkstromkabeln.

Eine Verlegungsart, die in der Schweiz bei unsern ausgedehnten See- und Flussgebieten immer mehr zur Anwendung kommt, ist die Unterwasserlegung von Kabeln. Eine kurze Beschreibung der am 16. und 17. August durchgeführten Seekabelverlegung durch den Zürichsee zwischen dem Etzelwerk und Rapperswil mag einen Einblick in diese sehr interessanten Arbeiten geben.

Das besonders armierte Telephonkabel wurde auf einem Kabelhaspel aus Eisenkonstruktion mittelst eines Spezialtransportwagens der Schweiz. Bundesbahnen nach Tiefenbrunnen spedit. Eine zweite Kabelrolle wurde auf einem Ledischiff aufgebänkt und konnte durch eine Verlegungsmaschine angetrieben werden.

Das Kabel wurde nun vom Transportwagen auf das Schiff umgewickelt und nach Rapperswil überführt. Da die Landungsstellen sorgfältig vorbereitet waren, konnte am näch-

sten Morgen mit der Verlegung begonnen werden, die, nachdem noch ein Taucher die Kabellage am Baggergraben am Rapperswiler Ufer kontrolliert hatte, bereits nach 5 Arbeitsstunden erledigt war. Die reine Verlegungszeit, d. h. die Legung durch den See, erfolgte mit etwa 1,5 m/s, d. h., man

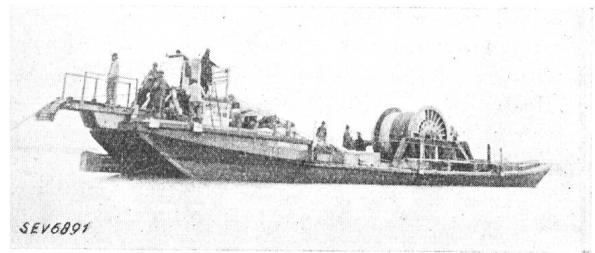


Fig. 31.
Verlegen des Kabels im Zürichsee.

brauchte für die 2500 m lange Strecke 30 Minuten. Das reine Kabelgewicht betrug 25 Tonnen.

Diese Einrichtung erlaubt, Kabel bis zu 50 Tonnen Gewicht in einer Länge zu verlegen.

Armaturen.

Keine Konstruktion ist stärker als ihr schwächster Teil. Dies hat auch in der Kabeltechnik volle Berechtigung und bei der Ausführung von Kabelmontagen wird in dieser Hinsicht viel gesündigt. Gerade die Fehlerstatistiken geben Aufschluss über die häufig nachlässigen Ausführungen von Muffen- und Endverschlussmontagen.

Bei allen Armaturen, seien es nun Endverschlüsse oder Verbindungsstellen, sind wieder grundsätzlich zwei Arten zu unterscheiden: Erstens die mehrheitlich angewandten Massearmaturen und zweitens die Armaturen mit rekonstruiertem Dielektrikum.

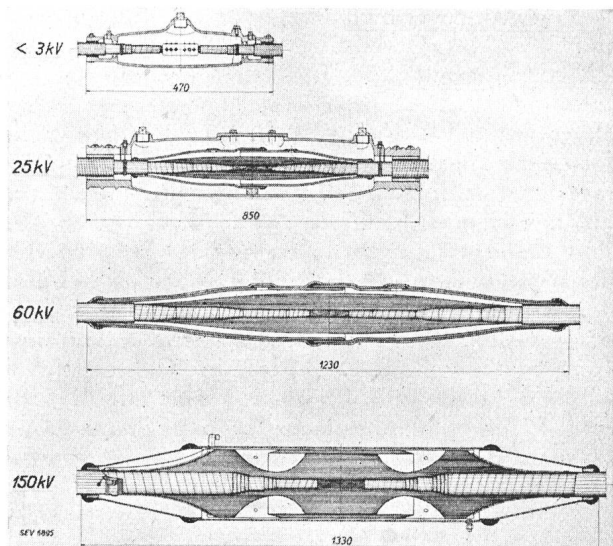


Fig. 32.
Verbindungsmuffen, Typ M.

Die Hauptbestandteile einer Massearmatur sind:

- a) die Schrauben- (oder Löt-) Hülsen zur Verbindung der Leiter,
- b) das Schutzgehäuse, welches, auf das zu verbindende Kabelende gesetzt, die Verbindungsstelle von allen Seiten umschliesst, und

- c) das Isoliermittel, mit welchem zur Isolierung der Verbindungsstelle der zwischen Kabel und Schutzgehäuse verbleibende Hohlraum vollständig gefüllt wird.

Das Isoliermaterial ist eine in heissem Zustande flüssige, kalt aber feste, als Ausguss- oder Füllmasse bezeichnete Substanz, die neben hohem Isolationswiderstand und elektrischer Festigkeit den folgenden Anforderungen entsprechen muss. Ihre Wärmeausdehnung soll möglichst klein sein, damit die periodischen Volumenänderungen mit der Temperatur innerhalb mässiger Grenzen bleiben; sie darf weder porös noch rissig sein und muss an Eisen, an Blei und an den Trennstegen festhaften, damit sich für eindringende Feuchtigkeit keine Kriechwege bilden können. Im übrigen muss die Beschaffenheit der Füllmasse dem jeweiligen Verwendungszweck angepasst sein; für Endverschlüsse in warmen Maschinenhäusern ist eine härtere, bei höheren Temperaturen schmelzende Füllmasse zu verwenden, während für eine normal verlegte unterirdische Kabelmuffe eine mehr plastische Füllmasse mit niedriger liegendem Schmelzpunkt geeigneter ist.

Für höhere Betriebsspannungen werden in den letzten Jahren ausschliesslich Muffen mit rekonstruiertem Dielektrikum angewandt. Diese Wickelmuffe hat den grossen Vorteil, dass die Tangentialbeanspruchungen und die allgemeinen Unstetigkeiten des elektrischen Feldes sehr gering werden. Die Isolation wird in Form von Papierbändern von

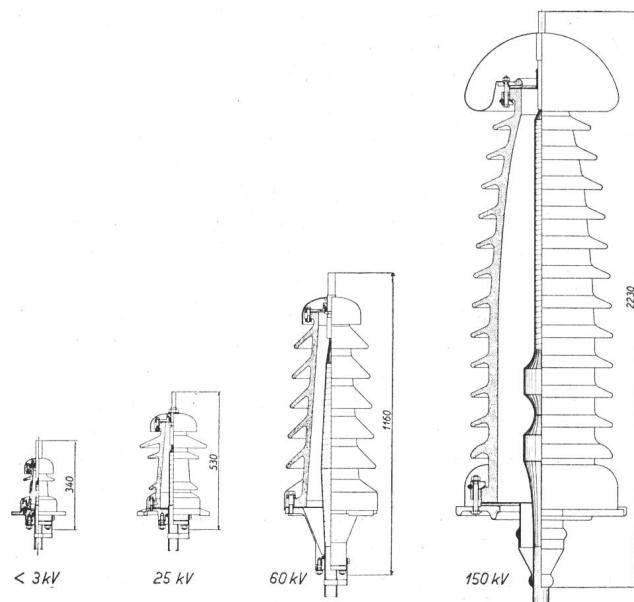


Fig. 33.
Vertikal-Endverschlüsse, Typ VEF.

Hand aufgewickelt und der fertige Wickel wird durch eine Bleihülse abgeschlossen. Wichtig ist bei diesen Verbindungsmuffen, dass der Leiter nach seiner Verbindung keine Aenderung des elektrischen Feldes hervorruft. Dies geschieht entweder durch den Einbau einer Klemme in den Leiter oder aber durch das Hartlöten der beiden Leiterenden; dieses Verfahren hat sich für Massekabel-

anlagen bis 66 kV sehr bewährt. Für Oelkabel wird mit grossem Vorteil das Presseverfahren von Pirelli angewandt, welches neben einer mechanisch und elektrisch absolut sichern Verbindung einen einwandfreien Oeldurchlass erlaubt.

Durch das Entgegenkommen meiner Kollegen aus der Kabelbranche, der Herren Dr. J. Borel und Ing. E. Foretay, wurde meine Aufgabe in der Weise erleichtert, dass Herr Borel den Vortrag über die modernen Höchstspannungskabel und Herr Foretay denjenigen über die Kabelmesstechnik übernahmen. Diese Referate werden die Lücken meiner Ausführungen bestens ausfüllen und das Gesamtbild des heutigen Standes der Kabeltechnik vervollständigen. Ich möchte aber nicht unterlassen, zum Schluss meines Vortrages noch auf eine Kabelkonstruktion einzutreten, die in den nächsten Jahren in verschiedenen Ausführungen zur Verwendung gelangen wird. Es betrifft dies das

Hochfrequenzkabel,

im besondern ein Kabel, welches für die neue Antennenanlage des Senders Beromünster gebaut wurde.

In diesem Zusammenhang wäre zu sagen, dass für den gegenwärtig in Montage begriffenen Kurzwellensender der Eidg. Techn. Hochschule ebenfalls ein Hochfrequenzversuchskabel der Kabelfabrik Cossonay verwendet wird, dessen Isolationsträger aus einem schweizerischen Produkt, dem Cibanit, besteht. Die damit erworbenen Resultate geben wertvolle Erkenntnisse für die Weiterentwicklung der Hochfrequenzkabel für Vielfachtelephonie und Fernsehübertragungen.

Das bis heute angewandte Uebertragungssystem für Telephonie umfasst einen Frequenzbereich bis höchstens 10 000 Hertz; die Telephonkabel mussten diesen Bereich bewältigen können. Die Entwicklung der sog. Breitbandübertragung und die Notwendigkeit, hochfrequente Energie auch über Kabel zu leiten, führte zur Konstruktion des Hochfrequenzkabels. Die durch diese neuen Kabel zu übertragenden Frequenzen umfassen das Gebiet von 0,1 ... 20 MHz (100 000 bis 20 000 000 Per./s). Das Frequenzband bis 1 MHz wird normalerweise dem Fernsprechen, dasjenige über 1 MHz dem Fernsehen reserviert werden.

Für eine Hochfrequenzenergieübertragung sind natürlich die gleichen Prinzipien anzuwenden, die für Signalübertragung nötig sind, da ja bei beiden Systemen die Betriebsfrequenz massgebend für die Konstruktion sein muss.

Es wurde uns die Aufgabe gestellt, auf eine Länge von etwa 1600 m eine Kabelverbindung herzustellen, die bei Normalfrequenz von 556 000 Hz, 100 kW bei 7000 V Spitzenspannung mit einem Wirkungsgrad von 95 %/km zu übertragen imstande ist. Ferner wurde, um günstige Abstimmungsverhältnisse zwischen Sender, Kabel und Antenne zu erhalten, ein Wellenwiderstand von über 60 Ω gewünscht. Da man bei Hochfrequenzenergieleitun-

gen das Auftreten von stehenden Wellen absolut vermeiden muss, damit die gesamte, vom Sender kommende Energie an die Antenne abgegeben wird,

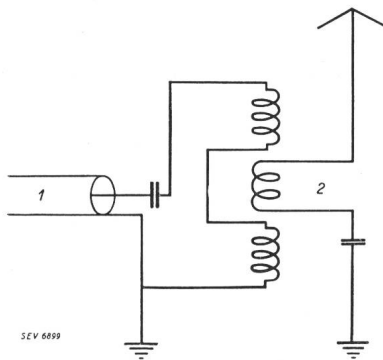


Fig. 34.
Anpassungsschaltung. 1 Antennenkabel, 2 Antennensystem.

müssen die Bauteile einander reflexionsfrei angepasst werden.

Die wichtigste Uebertragungseigenschaft eines solchen Hochfrequenzkabels ist, neben der Dämpfung, die Durchschlagsfestigkeit. Deshalb musste bei der Berechnung des Kabels im Gegensatz zum gewöhnlichen Breitbandkabel dieser Faktor entsprechend berücksichtigt werden.

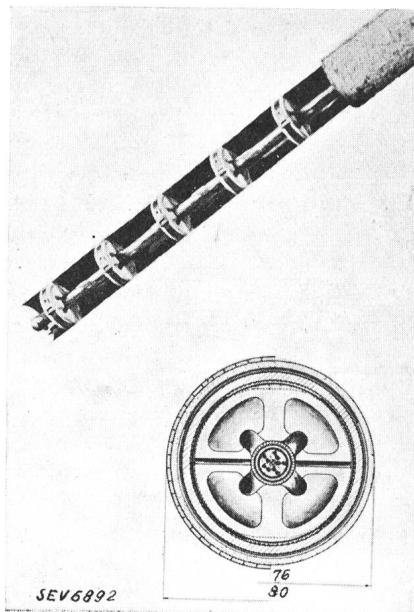


Fig. 35.
Antennenkabel: Uebertragungsleistung 100 kW
Frequenz 556 kHz
Betriebsspannung 7000 V.
Unten: links: Querschnitt des Turmkabels
rechts: Querschnitt des Landkabels.

Das Hochfrequenzkabel ist mathematisch gut erfassbar. Die drei Grössen Induktivität, Kapazität und Wellenwiderstand hängen nur vom Verhältnis der Radien des Aussen- und Innenleiters ab.

Da das magnetische Feld bei diesen hohen Frequenzen fast vollständig aus dem Innern des Leiters verdrängt ist, fliesst der Strom nur noch in einer dünnen Schicht auf der Leiteroberfläche.

Die Dämpfung eines solchen Kabels setzt sich zusammen aus zwei Teilen, und zwar der Widerstandsdämpfung und der Ableitungsdämpfung, welche die dielektrischen Verluste berücksichtigt. Im Gegensatz zur Widerstandsdämpfung, welche sich bei Erhöhung des Kabelquerschnittes vermindert, bleibt der Leerlaufverlustwinkel, bzw. die Ableitungsdämpfung konstant. Hieraus folgt, dass als Dielektrikum für Hochfrequenzkabel nur Material verwendet werden kann, dessen Verlustwinkel auch bei hohen Frequenzen sehr gering ist.

Für unsere Zwecke haben wir ein keramisches Produkt verwendet, dessen dielektrische Eigenschaften den Bedürfnissen einer Hochfrequenzübertragung entsprechen. Das angewandte Calit ist ein auf der Basis von Magnesium-Silikat aufgebauter Werkstoff, der bei einer Dielektrizitätskonstanten von 6,5 einen Verlustfaktor von $3,2 \cdot 10^{-4}$ bei 50 MHz ($\lambda = 6$ m) bis $4,1 \cdot 10^{-4}$ bei 0,3 MHz ($\lambda = 100$ m) aufweist (Papier etwa $300 \cdot 10^{-4}$). Der Nachteil der hohen Dielektrizitätskonstante wird durch die räumliche Anordnung der Calitscheiben als Hohlkörper und durch reichlichen Scheibenabstand nach Möglichkeit vermindert. Die relativ grosse Hochfrequenz-Uebertragungsleistung von 100 kW ergibt bei einem erzielten Wellenwiderstand von 65Ω eine Normalspannung von 2560 V, welche bei einem Modulationsgrad von 100 % einen Spitzenwert von 7160 V erreichen wird. Damit diese Spannung mit genügendem Sicherheitsgrad übertragen werden kann, musste das Kabel als Druckkabel ausgebildet werden, da bei Atmosphärendruck die Durchschlagsfestigkeit des Luft- bzw. Hohlraumes nicht genügend Sicherheit geboten hätte. Das Kabel wird deshalb im Betrieb mit einer Gasatmosphäre bei einem den Betriebsverhältnissen entsprechenden Druck gefüllt sein. Als günstigstes Füllgas erwies sich nach den neuesten Untersuchungen Sauerstoff, dessen guten Eigenschaften jedoch auch getrocknete Luft nicht wesentlich nachsteht. Reiner Stickstoff bewährt sich, wie die experimentellen Untersuchungen von Lange im Physikalischen Institut der Techn. Hochschule Aachen ergaben, nicht, da sein elektropositiver Charakter die frühe Einleitung des Sprüheinsatzes begünstigt. Als interessante Neuerung wurde in den Leiter des Kabels ein Fernmeldekabel eingebaut, das erlauben wird, durch einen Spezial-Transformator den Hochfrequenzstrom in den Verbindungsmuffen zu messen. Als erste Anlage in dieser Ausdehnung werden deren Betriebsergebnisse für die zukünftige Entwicklung der Hochfrequenz-Kabeltechnik von wesentlicher Bedeutung sein.