

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 33 (1942)  
**Heft:** 9

**Artikel:** Die Möglichkeiten der Fernübertragung grosser Leistungen durch Kabel  
**Autor:** Müller, P.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1056661>

### **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:** 24.12.2024

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

REDAKTION:

Sekretariat des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
Zürich 8, Seefeldstrasse 301

ADMINISTRATION:

Zürich, Stauffacherquai 36 ♦ Telephon 5 17 42  
Postcheck-Konto VIII 8481

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

XXXIII. Jahrgang

N<sup>o</sup> 9

Mittwoch, 6. Mai 1942

Bericht über die Diskussionsversammlung des SEV

vom 13. Dezember 1941 in Zürich

über

Höchstleistungsübertragung auf grosse Distanzen

(Fortsetzung von Seite 193)

Die Möglichkeiten der Fernübertragung grosser Leistungen durch Kabel

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 13. Dezember 1941 in Zürich,  
von P. Müller, Brugg

621.315.21

*Es werden die wichtigsten Bauformen von Hochspannungskabeln und Beispiele ausgeführter Hochspannungskabelanlagen kurz beschrieben.*

*Bei der Energieübertragung mit Wechselstrom über Fernkabelleitungen muss die bedeutende Ladeleistung der Kabel durch zusätzliche induktive Belastung kompensiert werden, weshalb solche Anlagen gegenüber der Uebertragung mit Freileitungen stets unwirtschaftlich sind. In vielen Fällen ist jedoch die Einschaltung einer kurzen Kabelstrecke im Zuge einer Freileitung vorteilhaft.*

*Infolge des günstigeren Verlaufes der Zeitdurchschlagskurve des Kabels bei Gleichspannung und des Wegfalles der Ladeleistung ergeben sich für die Gleichstrom-Energieübertragung bedeutend vorteilhaftere Verhältnisse, so dass die Kabelleitung hier auch mit der Freileitung in Wettbewerb treten kann. Für die Zukunft sind überdies noch wesentliche Verbesserungen im Bau der Hochspannungskabel für Gleichstrom zu erwarten.*

*Le conférencier décrit brièvement les principaux types de câbles à haute tension et donne des renseignements sur des installations existantes.*

*Le transport d'énergie en courant alternatif par de longues lignes en câbles exige une compensation de l'importante puissance de charge des câbles par une charge inductive additionnelle. C'est pourquoi ces installations sont toujours moins économiques que les transmissions par lignes aériennes. Dans de nombreux cas, l'insertion d'un court tronçon en câbles à la suite d'une ligne aérienne offre cependant des avantages.*

*En raison de l'allure plus favorable de la courbe temps-perforation du câble à courant continu et de la suppression de la puissance de charge, la transmission d'énergie en courant continu est nettement plus avantageuse, de sorte que les lignes en câbles peuvent concurrencer dans ce cas les lignes aériennes. Il est d'ailleurs fort probable que d'importants perfectionnements seront apportés par la suite aux câbles pour courant continu à haute tension.*

Wenn dem Kabel als Uebertragungsweg für Ferntransport elektrischer Energie ein Mitspracherecht eingeräumt werden soll, so müssen als erste Voraussetzung sämtliche Bauelemente für die in Frage stehenden hohen Spannungen vorhanden und gründlich erprobt sein.

A. Wechselstromanlagen

Zahlreiche Drehstromanlagen von 150 kV und 220 kV haben ihre Bewährungsprobe bestanden. Der verwendete Kabeltyp ist sozusagen ausschliesslich das Oelkabel; für Spannungen bis 150 kV sind auch Gasdruckkabel ausgeführt worden.

Die Aufgabe, ein absolut homogenes Dielektrikum ohne ionisierende Hohlräume zu schaffen und im Betriebe aufrecht zu erhalten, wird bei den erwähnten Kabeltypen auf verschiedene Art erreicht. Beim Oelkabel, das nur unter einem mässigen inne-

ren Ueberdruck von 1...3 kg/cm<sup>2</sup> steht, wird das durch Temperaturvariationen bedingte «Atmen» durch Uebertreten des sehr dünnflüssigen Imprägnieröles in Druck- und Speisegefässe bei Muffen und Endverschlüssen ermöglicht. Das Druckgaskabel, welches im allgemeinen als normales Massekabel ausgeführt ist, lebt unter einem beständigen äusseren Ueberdruck von etwa 15 kg/cm<sup>2</sup>; das Kabel wird zu diesem Zwecke entweder in eine Druckleitung eingezogen, oder es enthält eine entsprechend druckfeste Armaturn (Fig. 1 bis 3). Einige charakteristische Bauformen von Oel- und Massedruckkabeln sind in Fig. 1 und 2 dargestellt. Beim Einleiterölkabel wird ausschliesslich eine Hohlleiterkonstruktion mit zentralem Oelkanal angewandt, bei verseilten Mehrleiterkabeln hingegen erfolgt die Oelzirkulation durch die Zwickel. Die beiden Massedruckkabel von Fig. 2 sind in ein druckfestes Stahlrohr eingezogen. Das Prinzip einer Oelkabel-

anlage ist in Fig. 3 dargestellt. Fig. 4 bis 8 zeigen ausgeführte Oelkabelanlagen nach System Pirelli.

Die vorgenannten Beispiele sind wahllos herausgegriffen worden; heute stehen rund 2200 km Hoch-

Kompensation 33 MVA erforderlich und Drossel-  
spulen von 44 MVA installiert.

Um sich über die Grössenordnung der erforderlichen Blindleistung bei langen Leitungen Rechen-

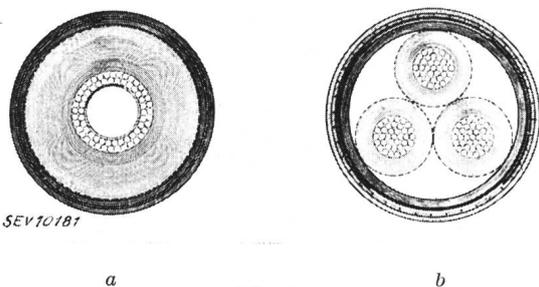


Fig. 1.  
Oel-Kabel.  
a Einleiter 132 kV. b Dreileiter 50 kV.

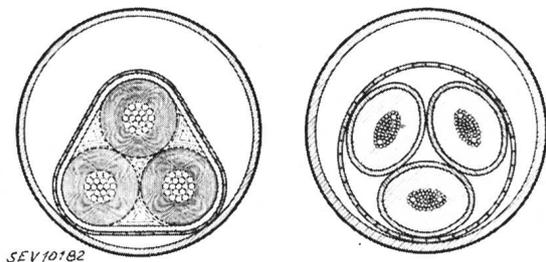


Fig. 2.  
Massedruckkabel.

spannungs-Oelkabel für Spannungen zwischen 50 kV und 220 kV und einige hundert km Druckgas-kabel für Spannungen zwischen 50 kV und 150 kV im Betriebe.

Beim Einbau einer längeren Kabelstrecke zeigt sich eine erste Schwierigkeit, die in Fig. 9 dargestellt ist. Das Streben nach guter Materialausnutzung ruft dünnen Isolationsschichten und damit zwangsläufig grosser Kapazität pro Längeneinheit. Die erforderliche Blindleistung ist ganz respektabel. Diese Sachlage zwingt uns, Kabelleitungen zu kom-

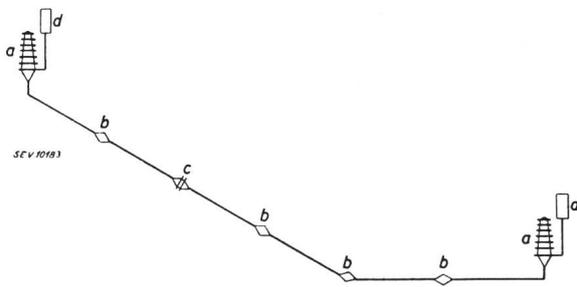


Fig. 3.  
Prinzipielle Darstellung einer Oelkabelanlage.  
a Endverschluss.  
b gewöhnliche Muffe.  
c Sperr-Muffe.  
d Ausgleichgefäss.

pensieren, auch wenn es sich nicht um eine eigentliche lange Leitung handelt. Bei der 150-kV-Anlage Rotterdam-Den Haag, die mit 22 km Stranglänge nicht als lange Leitung anzusprechen ist, sind zur

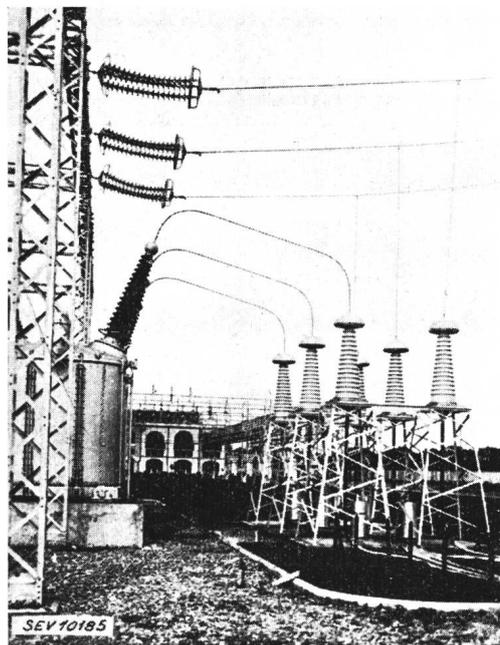


Fig. 4.  
Anlage Cislago, 220 kV.  
Erstellungsjahr 1932 (Pirelli, Mailand).

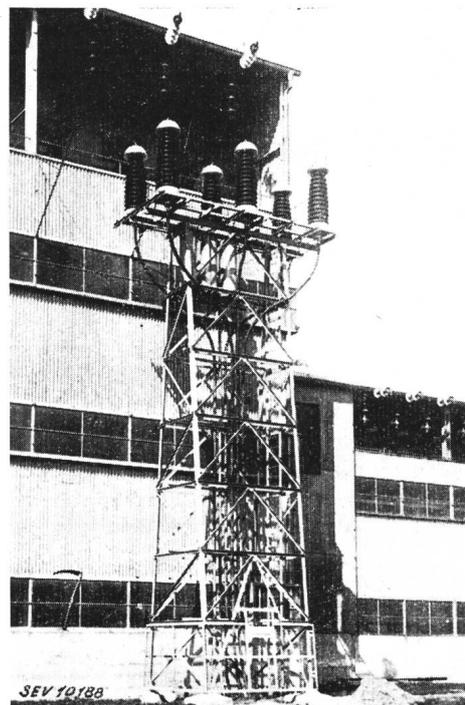


Fig. 5.  
Anlage Töss, 150 kV.  
Erstellungsjahr 1934 (Kabelwerke Brugg).

schaft zu geben, ist in Fig. 10 die Abhängigkeit zwischen Spannung und natürlicher Leistung von zwei Drehstromsystemen einander gegenübergestellt; der Wellenwiderstand wurde als konstant angenommen,

und zwar der Betriebswellenwiderstand der Freileitung zu 375  $\Omega$ , jener des Kabels zu 50  $\Omega$ . Aus dem Kurvenverlauf geht hervor, dass für Freileitungen die Zusatzblindleistung positiv oder negativ

sierung» einer Hochspannungskabelleitung muss daher prinzipiell durch Querdrosselspulen erfolgen, welche die Kabelblindleistung im Grenzfall annähert kompensieren.

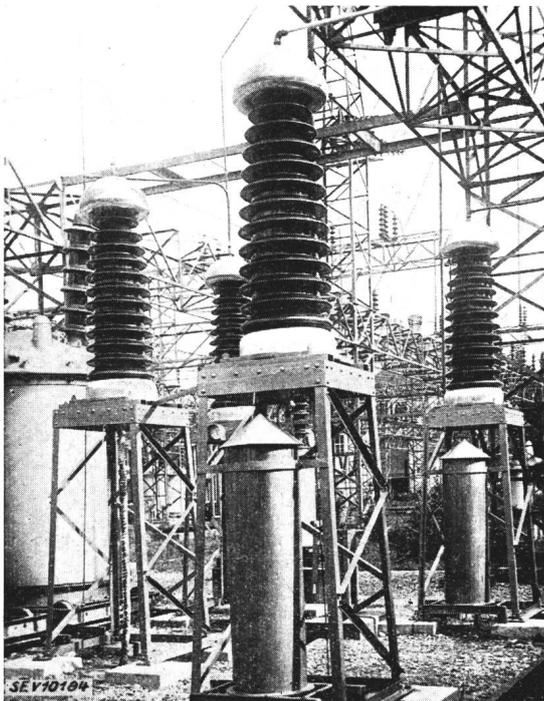


Fig. 6.  
Anlage Ruppertswil, 132 kV.  
Erstellungsjahr 1935 (Kabelwerke Brugg).



Fig. 8.  
Auslegung des 150-kV-Kabels Haag-Rotterdam.  
Erstellungsjahr 1939 (AEG, Berlin).

Diese grossen Kompensationsleistungen, verbunden mit den an sich höheren Gestehungskosten einer Wechselstromkabelleitung sorgen in natürlicher Weise dafür, dass ein Kabel für Fernübertragung technisch zwar interessant ist, aber aus wirtschaftlichen Gründen immer ausscheidet.

Eine Verwendungsart bleibt indes dem Kabel vorbehalten. Ohne Bedenken können kürzere Kabelstrecken von einigen km Länge in den Zug von Freileitungen eingeschaltet werden. Bedingung hierfür bleibt, dass die elektrische Festigkeit der Kabelstrecke mindestens gleichwertig jener der Freileitungsstrecke gemacht wird. Solche gemischte Leitungen sind nicht nur ein Wunschtraum des Heimatschutzes, sondern ermöglichen nicht selten eine wesentliche Verkürzung oder Vereinfachung und damit auch eine Verbilligung des Leitungstracés. Auch gibt es hin und wieder Strecken, wo die Er-

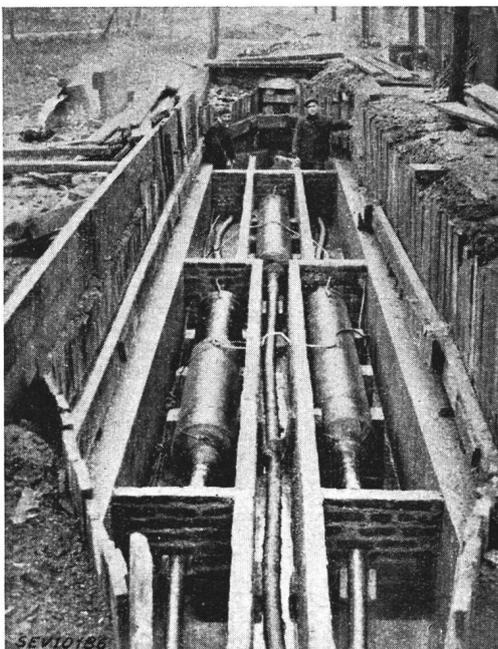


Fig. 7.  
Anlage Paris, 220 kV.  
Erstellungsjahr 1936 (Jeumont, Lyon, Clichy, Le Havre).

sein muss, je nachdem die zu übertragende Leistung unterhalb oder oberhalb der sogenannten natürlichen Leistung der Kabelanlage liegt. Die «Pupini-

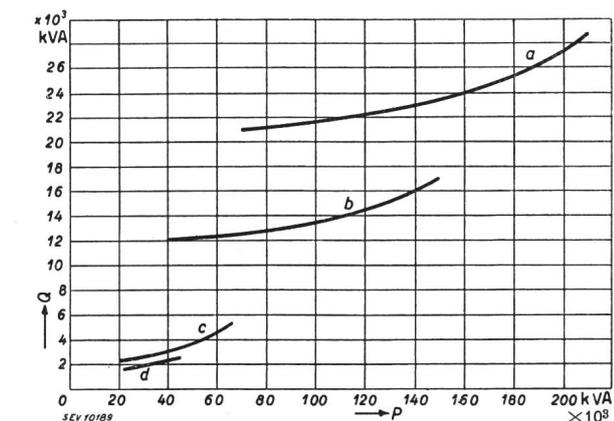


Fig. 9.  
Ladeleistung  $Q$  einer Kabelleitung von 10 km Länge in Funktion der zulässigen Uebertragungsleistung  $P$ .  
 $a$  220-kV-Oelkabel.  $b$  150-kV-Oelkabel.  $c$  50-kV-Oelkabel.  $d$  50-kV-Massekabel.

richtung einer unter allen Umständen betriebssicheren Freileitung nicht möglich ist, wogegen man mit einer Kabelleitung sehr wohl durchkommt. Dies

war z. B. für die 50-kV-Verbindungsleitung zwischen dem Maschinenhaus Handeck der Kraftwerke Oberhasli A.-G. und der Schaltstation Innertkirchen auf der Strecke Handeck-Guttannen der Fall, wo die Erstellung einer auch im Winter zugänglichen Freileitung ein Ding der Unmöglichkeit gewesen wäre <sup>1)</sup>. Zwar besteht bei den Betriebsleuten ein

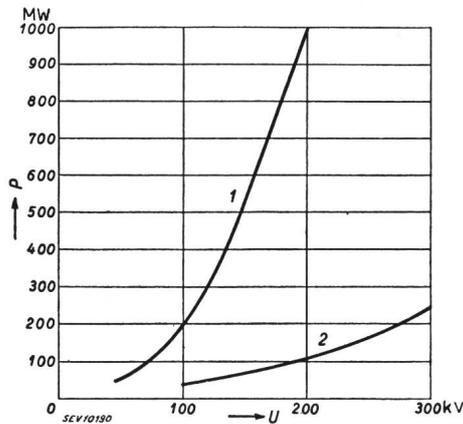


Fig. 10.

Natürliche Leistung  $P$  und Spannung  $U$  von Drehstromübertragungen.  
1 Kabel. 2 Freileitung.

gewisses Unbehagen, die Homogenität einer Leitung zu stören und Kabel mit Freileitungen hemmungslos zu mischen. Diese Hemmung ist bis zu einem gewissen Grade verständlich, denn die Betriebssicherheit der Kabelanlagen hat früher darunter gekrankt, dass die Kabelendverschlüsse und Verbindungsmuffen ungenügende Betriebssicherheit aufwiesen. Wir sind uns heute jedoch darüber im

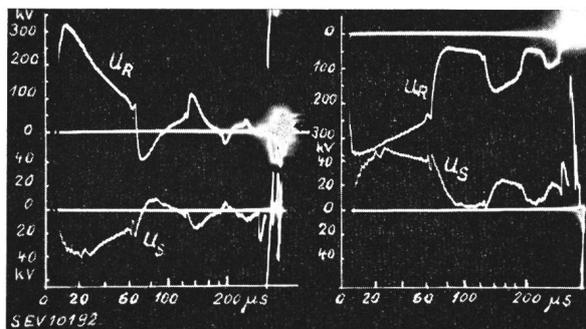


Fig. 11.

Spannungsverlauf am offenen Ende einer Einphasenleitung, hervorgerufen durch Stoss auf einen Leiter in 8,3 km Entfernung vom Leitungsende.

- a) Stossgenerator  $1/8 \mu$ F, Stosshöhe 210 kV, Halbwertdauer der Generator-Stosswelle 25  $\mu$ s.
- b) Stossgenerator  $1/2 \mu$ F, Stosshöhe 214 kV, Halbwertdauer der ausgesandten Stosswelle 95  $\mu$ s.

Obere Kurve: Gestossene Leitungsphase R.  
Untere Kurve: nicht gestossene, influenzierte Leitungsphase S.

klaren, dass die Forschung mit Stossanlage und Kathodenstrahloszillograph gerade auf diesem Gebiete schwache Stellen aufgedeckt und restlos beseitigt hat.

<sup>1)</sup> Siehe P. E. Schneeberger, Die Hochspannungskabelanlage der Kraftwerke Oberhasli A.-G. Bulletin SEV 1929, Nr. 22, S. 753...767.

Die Oszillogramme Fig. 11 und 12 verdanke ich Herrn Dr. Berger; sie illustrieren den Fall der in eine Freileitung eingeschalteten Kabelstrecke.

Wenn es sich andererseits um eine «pupinierte» Hochspannungsleitung handelt, ist klar, dass der Beitrag der Kabelstrecke in der übrigen Kompensation einzukalkulieren ist.

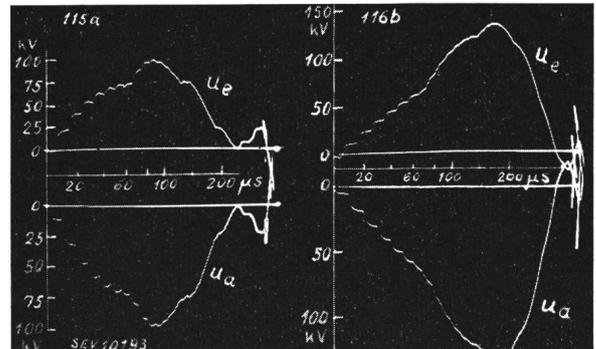


Fig. 12.

Spannungsverlauf am offenen, mit einem Schutzkabel von  $C = 0,38 \mu$ F geschützten Ende einer Einphasenleitung, hervorgerufen durch Stoss auf einen Leiter in 8,3 km Entfernung vom Leitungsende.

- a) Stossgenerator  $1/8 \mu$ F, Stosshöhe 315 kV, Halbwertdauer der ausgesandten Stosswelle 25  $\mu$ s.
- b) Stossgenerator  $1/2 \mu$ F, Stosshöhe 166 kV, Halbwertdauer der ausgesandten Stosswelle 95  $\mu$ s.

Obere Kurve:  $u_e$  Spannung am Ende des Schutzkabels.  
Untere Kurve:  $u_a$  Spannung am Anfang des Schutzkabels.

### B. Gleichstromübertragung

Die bisherigen Ausführungen werden Sie in Ihrer Ansicht bestärkt haben, dass dem Kabel als Uebertragungselement in Hochspannungsfernleitungen ein bescheidener Lebensraum zugewiesen bleibt. Dieses Bild ändert sich von Grund auf, wenn man die Gleichstromfernübertragung ins Auge fasst. Der

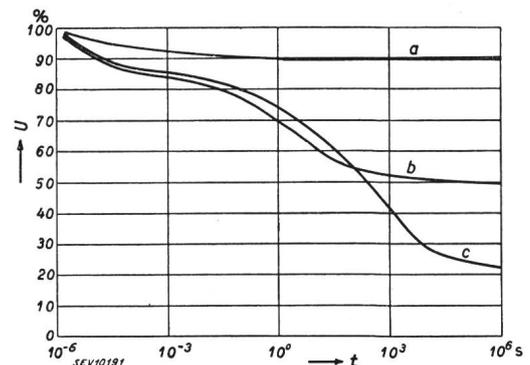


Fig. 13.

Zeitdurchschlagskurven verschiedener Kabel.

- a Gleichspannungskabel.
- b Oelkabel für Wechselspannung 50 Hz.
- c Massekabel für Wechselspannung 50 Hz.
- t Zeit. U Durchschlagsspannung.

Hauptgrund hierfür liegt in der Tatsache, dass die Zeitdurchschlagskurve für Gleichspannung praktisch horizontal verläuft (Fig. 13). Betriebserfahrungen an Gleichstromkabeln liegen aus bekannten Ursachen leider nur wenig vor; ich kann mir daher nicht versagen, aus einem Rapport unseres Altmeisters Thury an der VDE-Tagung 1930 in Ber-

lin einige Sätze über die Anlage Moûtiers - Lyon (Fig. 14) zu zitieren. Thury sagt<sup>2)</sup>:

«Ich schreibe demnach den Gleichstrom nur den Kraftübertragungen auf sehr grosse Entfernungen zu, z. B. über 500 km; denn es ist festgestellt, dass er Entfernungen über 1000 km mit ganz bemerkenswerter Sicherheit und Wirtschaftlichkeit überbrücken kann, während bei diesen Entfernungen Drehstromleitungen wirklich zu teuer und weder technisch noch finanziell gerechtfertigt sind. Ich ziehe auch — auf Grund längerer Erfahrungen — in Betracht, dass der Gleichstrom, weil er jede nachteilige Beanspruchung des Dielektrikums unterirdischer Kabel vermeidet und weil diese letztern wirtschaftlich und sicher für mehrere hundert Kilovolt zwischen Leiter und Umhüllung gebaut werden können, als einzige Stromart gestattet, die Verbindungsfreileitungen durch unterirdische Kabel zu ersetzen.»

«Das Kabel verdient erwähnt zu werden; es ist (1906...1930) nie repariert worden und der Isolationsgrad ist so hoch geworden, dass es unmöglich ist, ihn durch Messung festzustellen... Dieses Resultat ist um so mehr bemerkenswert, als Zweifler damit gerechnet hatten, dass die Elektrolyse das Kabel prompt ausser Betrieb setzen würde. Und was geschah? Seit 24 Jahren erscheint auch nicht die geringste Spur von Elektrolyse; sie lässt sich wahrlich Zeit!

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die in Lyon erworbenen Erfahrungen beweisen, dass der hochgespannte Gleichstrom bei konstanter Stromstärke einwandfrei über Kabel fortgeleitet und mit Erfolg für den Antrieb von Wechselstrom- oder Bahngeneratoren verwendet werden kann.»



Fig. 14.

Gleichstrom-Hochspannungsübertragungsleitung von Savoyen nach Lyon.

Wenn wir den heutigen Stand der Forschung charakterisieren wollen, dann müssen wir zugestehen, dass wir sehr wohl ein Gleichstromkabel wirtschaftlich für eine Nennspannung von 400 kV bauen können, jedoch nicht genau wissen, wo die zulässige Grenze der Dauerbeanspruchung mit Gleichstrom liegt. Wir hatten Gelegenheit, für die Arbeit Ehrensperger Kabel zu berechnen und haben dabei durchweg einen Faktor von mindestens 3 für das Verhältnis Durchschlagsstoßspannung gegenüber Betriebsspannung zugrunde gelegt. Wir haben ferner für Nennspannungen von mehr als 200 kV Oelkabel vorgesehen; denn es scheint uns gefährlich, bei Gleichspannung eine Alterung, die im Massekabel naturgemäss auftritt, als harmlos zu bezeichnen. Wir haben ausserdem verzichtet, die Erde zur Stromführung heranzuziehen und schliesslich nur 25° C Erwärmung beim Massekabel und 50° C beim Oelkabel zugelassen. Trotz dieser «Angstfaktoren» hat die Nachrechnung ergeben, dass für Gleichstromfernübertragung die Kabelleitung keinen ausschlaggebenden Preisunterschied gegenüber der Freileitung aufweisen wird. Gerade die genann-

ten Punkte zeigen aber auch, wo beim Gleichstromkabel der Forschung ein Arbeitsfeld einzuräumen ist. Ich erwähne hier die Fragen:

a) Lässt sich das einfache Massekabel bei Gleichstrom für Nennspannungen bis zu 400 kV verwenden und welche Betriebstemperaturen sind zulässig?

b) Lässt sich die Durchschlagsfestigkeit der Gleichspannungskabel erhöhen? Einige durch konstruktive und fabrikatorische Massnahmen bemerkenswerte Resultate sind hiefür bereits vorhanden.

c) Können wir durch geeignete Mittel im Betriebe den nötigen Abstand von Durchschlagsspannung zu Betriebsspannung reduzieren?

Die Frage der Armaturen für Gleichspannung stellt sich zwar auch, doch ist ihre Lösung einfach, da uns die Erfahrungen mit Stoßspannungen zur Verfügung stehen.

Auch für Kabelbetrieb erscheint es als sehr verlockend, die Erde als Stromleiter zu benützen. Die Uebertragungsverluste würden stark sinken und praktisch auf die Hälfte gegenüber der Doppelleitung zurückgehen. Die Korrosionsgefahr lässt sich durch genügendes Tieflegen der Erdelektrode und grosse Elektrodenflächen sicher vermeiden.

Bei der Beurteilung der Betriebssicherheit einer Gleichspannungskabelanlage müssen auch die Mittel zur Lokalisierung eines Fehlers kurz erwähnt werden. Die für kurze Längen üblichen Verfahren sind wegen der begrenzten Genauigkeit nicht für Strecken von einigen 100 km anwendbar. Eine erste Annäherung lässt sich aus der Wellenlaufzeit, z. B. mit Kathodenstrahloszillograph ermitteln. Auch die sogenannte Spannungsabfallmethode, bei welcher der Spannungsabfall Leiter - Bleimantel an beiden Enden gemessen wird, gestattet ein Eingrenzen des Fehlers. Die genaue Bestimmung wird dadurch erleichtert, dass in gewissen Intervallen, z. B. alle 100 km, einfache Durchschaltstationen vorgesehen sind, die ermöglichen, die kranke Strecke zu unterteilen.

Ich glaube davon Umgang nehmen zu können, viele Vergleichszahlen über die Kosten der Gleichstromkabelleitung anzuführen; aber abschliessend möchte ich doch ein einfaches Beispiel zeigen, nämlich eine 50-kV-Drehstromanlage, Nennstrom 385 A, bestehend aus drei Einleiterkabeln von 185 mm<sup>2</sup> Querschnitt (Oberhasli); diese ermöglicht die Uebertragung von rund 33 000 kVA. Dieselbe Anlage mit Gleichstrom von 150 kV gegen Erde betrieben, gestattet die Uebertragung von 125 000 kW; dabei bleibt ein Leiter als Reserve. Die Leitungsverluste werden absolut und prozentual niedriger; denn sie betragen bei der Gleichstromübertragung (gleicher Leiterstrom vorausgesetzt, d. h. bei 33 000/116 000 kW) nur rund das 0,55fache jener der Drehstromübertragung.

Es ist heute verfrüht, ein abschliessendes Urteil zu geben über die definitive Gestaltung der kommenden Fernübertragungen; sicher wird jedoch dem Gleichstromhochspannungskabel damit ein weites Feld geöffnet.

<sup>2)</sup> R. Thury, Transmission de force motrice à grande distance par courant continu à haute tension. Bull. SEV 1930, Nr. 5, S. 157...177.